

人与生物圈

Man and the Biosphere 双月刊 2017 · 1-2 Man and the Biosphere

专题 多彩南极

南大洋
二氧化碳的“源”和“汇”
磷虾
小身躯支撑起大生态
科研
人类认识宇宙与地球的窗口

南极冰盖下隐藏着秘密

定价：32.00元
邮发代号：82-253
国际标准刊号：ISSN 1009-1661
国内统一刊号：CN11-4408/Q

ISSN 1009-1661



9 771009 1660 8



发起于 1971 年的联合国教科文组织人与生物圈计划
是关于人与环境关系的全球性科学计划

海云天企业支持

人与生物圈计划在中国的实施与推广

践行生态文明 建设美丽中国



深圳市海云天投资控股集团
Shenzhen Seaskyland Investment Holdings Group Ltd



《人与生物圈》杂志 · 1999 年 1 月创刊
双月刊 2017 年第 1-2 期合刊
总第 103-104 期

主管单位 中国科学院
主办单位 中国人与生物圈国家委员会
出版 《人与生物圈》编辑部
名誉主编 许智宏 李文华
科学顾问 赵献英 游忠惠

总编辑 王 丁
执行副总编辑 罗娅萍
副总编辑 陈向军
图片总监 郭晓涛
编辑 先义杰
校对 何芬奇 陆 霏
行政主管 马雪蓉
电脑制作 笑 涛 王 伟
印 务 李泽琦

本期特约顾问 周 朦 效存德
本期摄影顾问 肖 戈

国际标准刊号 ISSN 1009-1661
国内统一刊号 CN 11-4408/Q
国内发行 北京报刊局
订购处 全国各地邮局
邮发代号 82-253
国外发行 中国国际图书贸易总公司
(北京 399 信箱, 100044)
国外发行代号 1383 BM

编辑部地址 北京市三里河路 52 号
邮政编码 100864
电 话 (010) 68597516
印 刷 北京新华印刷有限公司
出版时间 2017 年 4 月

法律顾问单位 北京市博人律师事务所

公 示 《人与生物圈》杂志新闻记者证持有者陈向军
职务: 杂志副总编辑
记者证号为 K11440855000001
国家新闻出版广电总局举报电话: 010-83138953
编辑部监督电话: 010-68597516

版权声明

作者向本刊所投稿件, 除有特殊声明, 凡一经采用, 即视同作者同意将稿件著作权中属于《著作权法》第十一条第(五)项至第(十七)项规定的权利全部转让给本刊。本刊对已采用的作品可继续无偿使用, 并决定使用的方式, 包括但不限于改编、汇编、展览、表演、用于光盘、互联网、手机、可移动的平板电脑以及将来可能出现之任何传播形式; 并可翻译为外文或转换为繁体字及其他字体形式。本刊将一次性向作者支付稿费并视为受让上述权利的全部费用。来稿文责自负, 对于抄袭或涉密、侵犯他人版权或其他权利的稿件, 本刊不承担连带责任; 对所投稿件, 本刊编辑有权根据本刊办刊要求对其进行适当删改或调整; 如作者不同意上述声明, 请在来稿时向本刊书面声明, 本刊将作适当处理。



United Nations
Educational, Scientific and
Cultural Organization



Man and
the Biosphere
Programme

联合国教科文组织发起的人与生物圈计划,
是关于人与环境关系的全球性科学计划。

CONTENTS 目录

8 南极大陆的演化与科学探索

刘小汉

冰下科学篇

12 寻找冰盖消融的证据

刘小汉

18 翻阅天书: 南极冰芯述说的地球往事

效存德

23 南极冰盖是否曾经消融

刘小汉

24 探知南极大陆冰雪下的秘密

赵越

30 南极冰盖与全球海平面变化

李荣兴 冯甜甜

34 南极科考情结, 愈久而弥坚

孔晓宁

40 亲历中国第 33 次南极科学考察

荣启涵

认识南大洋

44 马里奥·希尔南大洋水下摄影

马里奥·希尔

48 探索南大洋的食物网

周朦

54 罗斯海的浮游植物

Walker O. Smith, Jr.

59 南大洋与二氧化碳的“源”和“汇”

李铁刚 王家凯

62 研究南极“生物泵”

潘建明

66 南大洋里的“湖”

史久新

72 当潜标遇上冰山

史久新

76 南大洋观测系统

南极研究科学理事会

与宇宙对话

77 中国南极天文科考

宫雪非

80 地球联系外太空的窗口

张北辰

86 南极与全球气候变化

陆龙骅

生态南极篇

92 南极磷虾

孙松 杨光



只为攀登
MADE TO CLIMB



发起于 1971 年的联合国教科文组织人与生物圈计划
是关于人与环境关系的全球性科学计划

KAILAS 品牌支持
人与生物圈计划在中国的实施与推广

践行生态文明 建设美丽中国

摄影 / 蔡石

彩南极专辑 · 多彩南极专辑 · 多彩南极专辑 · 多彩

CONTENTS

目录

96	南极鱼类——冰海里演化出的奇迹	陈良标
100	南极四季话鸟兽	吴福星 张正旺
106	菲尔德斯半岛的海豹和海狮	祝茜
111	文明的代价——海豹毛中的汞含量	孙立广
112	我在南极拍摄帝企鹅	冈瑟·里尔
120	中国生态学家的南极科考	陈建伟
126	南极生态简史	孙立广
130	南极的绿洲	李承森
134	真菌、地衣与极地环境变化	李莹
137	保护南极植物和地衣	李承森
138	地球是一个家	张庆华
	科技在南极的应用	
141	“天眼”看南极	程晓
146	给南极画像	李航
	关注南极事物	
150	解读南极条约中的生态与科学	刘惠荣
154	南极旅游的思考	王自磐
158	中国南极旅游现状	极之美旅游公司
159	南极的价值	位梦华

封面故事



加拿大著名摄影师马里奥·希尔在南大洋拍摄到了这只水母。水母是一种非常漂亮的水生动物，它的身体外形就像一把透明伞，伞状体的直径有大中小，大水母的伞状体直径可达2米。水母身体的主要成分是水，并由内外两层所组成，两层间有一个很厚的中胶层，不但透明，而且有漂浮作用。它们在运动时，利用体内喷水反射前进；有些水母的伞状体还带有各色花纹，在蓝色的海洋里，这些游动着的色彩各异的水母显得十分美丽。

水母早在6.5亿年前就存在了，它们的出现甚至比恐龙还早。全世界的水域中有超过250余种水母，它们分布于全球各地的海洋中。目前，受全球气候变化的影响，南大洋食物网正发生改变，水母等有触须动物将会出现异常增殖，原因在于水母的食物——桡足类动物的种群数量可能会逐渐增多。

© Mario Cyr



发起于 1971 年的联合国教科文组织人与生物圈计划
是关于人与环境关系的全球性科学计划

Bestard 品牌支持

人与生物圈计划在中国的实施与推广

践行生态文明 建设美丽中国

摄影 / 蔡石

多彩南极专辑 · 多彩南极专辑 · 多彩南极专辑 · 多彩





南极的冰山 摄影 / 冈瑟·里尔

南极大陆的演化与科学探索

文 / 刘小汉

南极洲是地球上具有最极端环境的地理单元，也是最后被人类认识的冰雪世界。与北冰洋不同，南极洲的主体是大陆，面积约 1400 万平方公里。科学家研究认为，早在 5 亿多年前，与北半球的劳亚超级古大陆相对应，在南半球也有一个超级古大陆，称为冈瓦纳古陆。当时的冈瓦纳古陆包括现今的南极大陆、非洲、南美洲、印度，我国的青藏高原南部和华南，以及澳大利亚和新西兰。这个超级大陆是在被称为“泛非运动”的行星尺度板块构造运动过程中逐渐聚合形成的。这个超级古陆存在了 4 亿多年，直到 1 亿多年前的白垩纪时，南极板块周围的各个陆块又开始裂解并先后向北漂移，只把南极孤零零地留在原地。也就是说，今天中国南极中山站所在的拉斯曼丘陵原来是和印度板块连在一起的。此外，中外地质学家在那里还发现了更古老的地质记录，显示东南极板块在 10 亿年前属于罗迪尼亚超级古陆的一部分，经历过剧烈构造运动的影响。

南极原来并不像今天这样寒冷，而是属于暖温带至寒温带气候类型，森林绵延，绿草如茵。地质学家在南极找到了许多恐龙（如水龙兽）、鲸、各种鸟类和植物的化石。大约 3400 万年前，南美洲板块最终与南极板块脱离，于是德雷克海峡打开，南极大陆彻底孤立，并在其周围形成环绕南极的洋流和猛烈的西风带。环极洋流和西风带在很大程度上隔离了南极大陆与中低纬度区域的热交换，使南极开始变冷，气候环境从亚温带逐渐向寒带的泰加林和苔原环境过渡，高山上开始出现山麓冰川。到距今 1400 万年前的中新世中期，随着一次全球尺度的二氧化碳浓度降低气候事件，南极大陆的地表温度迅速下降，逐渐形成类似今天规模的大陆型冰盖。南极冰盖平均厚 2300 米，最厚的地方达到 4600 米。如此多的冰雪是从哪里来的呢？它们

来自本地的降雪，由于温度太低，降雪绝不融化，于是年复一年的降雪堆积起来，不断加厚。当雪层超过大约 100 米时，由于雪粒自身的重量，下层的雪就会开始固结成冰。随着雪层继续加厚，深部压出的冰比重越大，一部分原本存在于雪中的空气分子也会被压入冰的晶格中，形成坚硬的蓝冰。

南极和北极地区的极端气候条件，在全球气候变化过程中扮演着重要角色。如南极周边的南大洋覆盖的冰架和垮落到海里的巨大冰山，融化成大量冷水，形成巨大的洋底冷水流。这种冷水洋流可以越过赤道，影响到北半球气候。对于地球来说，全球的大洋环流体系就像人体的血液系统，而南极冷水则是参与启动了这个系统的运行。我们在南极最容易观测全球气候变化的波动。如果全球气温稍稍升高一点，南大洋的季节海冰面积就会迅速减少，反之亦然。而海冰面积的变化又会加剧全球气温的进一步变化，因为海水和冰雪对阳光的反照率差很多倍，海冰面积减少，海水就会吸收更多的太阳辐射能，使地球气温更快上升。因此，也可以说南极是全球气候变化的放大器。

南极和北极都在以不同方式和不同程度影响着全球气候变化，但二者相比较，南极的影响更大一些。无论是年平均温度还是极端温度，南极都比北极低 20 多摄氏度。北冰洋的海冰融化与否，对于全球海平面变化的影响不会很大（格陵兰冰盖融化可使海平面上升 5 米多），而南极冰盖如果全部融化，全球海平面将上升 66 米，必将直接影响人类的生存环境。所以，尽管南极离我们更遥远，气候环境更恶劣，但科学家丝毫不会放松对南极的考察与研究。

南极陆基科学考察与研究活动早在英雄探

险时代就已开始,迄今已经有 100 多年历史。各国考察的内容也随着时代进步从领土和自然资源逐渐进入以全球变化为主题的大科学时代。除了美国极点站中微子探测等纯基础理论外,南极冰川学、地质构造、臭氧洞、天文观测、气象、高空大气、大地测量、古气候环境与现代环境监测、人体医学等都是长期开展的学科领域。由于近年陆续发现了约 400 个冰下湖,其中还有一半是湖水互相连通并流动的“活”湖,促使“冰下水系统”成为当前国际南极陆基考察最热门的领域之一。

与发达国家相比,我国的南极考察开始时间相对较晚。为学习南极考察研究的经验,我国在 20 世纪 80 年代初就陆续派出科学家到各国南极考察站参与实地考察,开展了实地观测和采样,并以合作或者独立考察方式实际进行了研究工作,他们是中国南极陆基考察研究的先驱者。

1980 年,我国首次选派董兆乾和张青松前往南极到澳大利亚凯西站进行综合考察,并参观访问了美国麦克默多站、新西兰斯科特站和法国迪尔维尔站。他们在那里进行了气象、地质、生物和海洋等学科的现场观测和取样,取得了第一批南极科学资料、数据和样品。随后董兆乾又被派到澳大利亚“内拉丹”号考察船上,参加“首次国际南极海洋系统和储量的生物调查”项目中的水文调查。此外,他还利用登上 3 个南极站的机会,采集了南极大陆上的地质样品 30 余个,海洋动植物样品 33 个以及海水样品 10 瓶。国家海洋局第二海洋研究所专门组织专家对这些样品进行了分析研究,写出了考察报告和论文。张青松于 1981 年 1 月被派往澳大利亚戴维斯站越冬,主要从事西福尔丘陵的第四纪地质地貌考察。他采集了大量标本和样品,并对该区陆缘冰地貌进行了定位观测。1981 年 11 月,吕培顶到澳大利亚戴维斯站越冬,进行海洋生物考察;卞林根到澳大利亚莫森站越冬,进行气象学研究;谢自楚到澳大利亚凯西站越冬,进行冰川考察;王声远和叶德赞到新西兰斯科特站度夏,进行地球化学和生物学考察;颜

其德到澳大利亚“内拉丹”号考察船参加澳大利亚首次南极海洋地球物理考察;1982 年 11 月,蒋加伦到澳大利亚戴维斯站越冬,进行浮游生物考察;陈善敏和宁修仁赴智利马尔什站度夏,进行气象学考察;钱嵩林赴澳大利亚凯西站越冬,进行冰川考察。秦大河于 1983 年 11 月到澳大利亚凯西站越冬,进行冰川考察;王自磐和曹冲到澳大利亚戴维斯站越冬,分别进行浮游生物和高空大气物理考察;卞林根到阿根廷马兰比奥站度夏,从事气象观测;陈时华随日本的“白凤丸”船,从事南大洋生态系统和生物资源考察;王友恒到阿根廷布朗站越冬,进行气象学观测;魏春江和董金海赴智利马尔什站度夏,进行海兽考察;李华梅和许昌赴新西兰斯科特站度夏;王荣到阿根廷的马兰比奥站和尤巴尼站进行了生物学考察。

随着中国南极中山站的建成,中国南极陆基科学考察与研究活动快速发展起来,研究领域也从初期的亚南极环境、滨海与海岸带环境逐渐向内陆扩展。一大批涉及国际南极科学研究最前沿的项目得以开展,并取得令人瞩目的进展。其中,秦大河横穿南极的雪冰环境研究、普里兹-格罗夫大地构造演化研究、格罗夫山的古气候环境研究、南极陨石回收与研究、无冰区古生态环境的地球化学研究、东南极冰盖起源与初期过程研究、冰穹 A 的天文观测与研究、极区等离子体云的形成过程与机制研究等领域,均获得了国际一流的科学成果。目前,中国南极陆基研究在国际科学刊物发表的论文数量已居世界前列。不久前,国际南极研究科学委员会制定了未来 10 ~ 20 年宏大的国际合作战略计划——地平线计划(Beyond Horizon)。在这个计划中,中国极地科学家将承担或者参加古气候环境(深冰芯和冰下湖等)、地质与地球物理、海洋学、大气与深空探测、遥感与测绘、生物学和人体医学等许多领域的考察与研究活动。相信随着祖国改革开放和经济腾飞,中国南极科学考察必将以更快的速度向前发展。

本文作者系中国科学院青藏高原研究所副所长,研究员



寻找冰盖消融的证据

文、图 / 刘小汉

20 世纪 90 年代以来，科学家在南极地区查尔斯王子山、拉斯曼和西福尔丘陵地区的新世（距今 533 万年 ~ 258.8 万年）冰川沉积地层中发现了大量再搬运（指自然力量的作用）的微体化石，这一发现引起相关研究领域学者的广泛关注。从沉积相的分布来看，西福尔和拉斯曼丘陵地区大多数为海相沉积；北查尔斯

王子山具有海湾沉积的特征；南查尔斯王子山地区具陆相冰川沉积特征；而普里兹湾陆架上的新世沉积主要为间冰期的深海相沉积软泥。这样一来，从普里兹湾陆架到西福尔丘陵和拉斯曼丘陵，再到内陆查尔斯王子山这一剖面上，新世的沉积相记录了从深海到海湾再到陆相逐渐过渡的现象。这一沉积相带的空间展布格



摄影 / 李航

局显示了上新世东南极冰盖的边缘可能位于内陆腹地，即其发育规模应当远远小于现在的水平。由此可以暗示上新世暖期时冰盖消融和边界退缩事件的存在。格罗夫山恰好位于普里兹湾上游与南查尔斯王子山之间，该地区在 300 万年前冰盖的表现和性质，成为研究这一重大科学问题的关键点。

从 1998 年起，我们开始深入南极腹地、对中山站以南 400 公里的格罗夫山进行了 6 次考察。在格罗夫山地区，除发现并回收 12065 块陨石以外，还发现了新生代土壤、冰碛沉积岩砾石及其中的孢粉化石，并开展了冰川地质分析和宇宙核素暴露年龄测试，这些新数据都是人类首次获得，为研究该地区上新世以来冰川



作者一行在格罗夫山开展地质和地貌考察

演化提供了新的关键性物证，其地质时代的确定也为东南极冰盖演化历史的重建提供了重要依据。

地理与冰川地质

格罗夫山属于东南极冰盖内陆的冰原岛峰群，位于东南极伊丽莎白公主地兰伯特裂谷右岸，介于南纬 $72^{\circ} 20' \sim 73^{\circ} 10'$ ，东经 $73^{\circ} 50' \sim 75^{\circ} 40'$ 之间。在格罗夫山 3200 平方公里范围的雪冰面上共出露着 64 座相互独立的冰原岛峰，其北界距中山站约 400 公里，西侧以世界最大的冰川系统艾莫里冰川为界，并与南查尔斯王子山和北查尔斯王子山遥遥相望。这些冰原岛峰大体分 5 组沿北北东—南南西方向成岛链状分布，宏观呈现山脊纵谷地貌。岛峰与蓝冰表面的相对高度介于几十米至 800 米不等。由于格罗夫冰原岛峰群对东南极冰盖冰穹 A 流域的阻隔作用，在这里形成大冰盖的积累区与消融区之间的平衡线。此外，格罗夫岛峰群又处于南极内陆下降风极盛区，狂风对冰面新雪的吹蚀力极强，因此在格罗夫地区出露大面积的古老蓝冰。

格罗夫山出露麻粒岩至高角闪岩相的深变

质杂岩，如同我们熟悉的造山运动或造山运动晚期出现的花岗岩，以及构造后期的花岗质、花岗闪长质细晶岩脉和长英质伟晶岩。由于冰盖自南东向北西运动的攀升作用，岛峰的迎冰面（南东侧）雪线较高，雪冰面坡度相对比较平缓。而由于冰流的侧向刮削和岛峰岩石本身的垂直节理的共同作用，岛峰北西侧则往往是近直立的断裂垮塌陡壁。冰流将岛峰上垮塌下来的碎石向北西方向（下游）搬运，在冰面上形成数公里长的碎石带。相对较低矮的岛峰往往保留末次上升冰流的覆盖研磨形态，成为典型的羊背石。

通过对大部分甚高大冰原岛峰的冰川地质地貌观测，我们发现距现今冰盖表面之上约 100 米处存在一个区域性界线。位于界线之上的岛峰岩石表面主要显示狂风剥蚀特征，原有的冰蚀痕迹太多被后来的风蚀痕迹覆盖或改造，尤其在高大岛峰的山脊线一带出现大量风棱石，这些花岗质片麻岩被狂风吹蚀掉的岩石部分（风蚀孔洞深度）可达数米至数十米。根据蜂巢岩的风蚀程度和东南极地区基岩（花岗质片麻岩）的平均风化速率，显示它们至少应当在数十万年以前就已经从冰盖掩埋中出露，而不是末次冰盛期后冰退时出露的。

而这个界线之下的岩石则显示强烈的冰流剥蚀特征,如冰川磨光面和擦痕、漂砾等,说明其经历了相对较近期的冰蚀作用,也反映了冰盖表面的频繁振荡史,但总体上讲,冰面上升的最高高度没有超过 100 米。

沉积岩转石沉积环境

位于格罗夫岛峰群核心区的哈丁山北东和南西两端为高大基岩,比冰面高约 200 米。两端山脊向中段平缓下降,至中心部位几乎与现今冰面齐平,中段山脊的北西陡坡上保留有末次冰退时遗留的悬冰川。由于哈丁山对主冰流的阻挡作用,在其西侧形成末次冰退以来的静止蓝冰区。在静止蓝冰区的西侧边界连续分布有长约 5 公里的弧形悬浮冰核终碛堤。当末次冰进时,冰盖越过哈丁山中段山口,在原有的古老蓝冰表面上向西推进。后来冰面下降,冰盖重新退缩至哈丁山以东,并在古老蓝冰面上遗留下这个悬浮冰核终碛堤。终碛堤高 20 ~ 30 米,上覆冰碛碎石层,碎石粒度向下变细,最下面是薄层石粉。由于碎石层的保护,其下的冰核(古冰面)得免于被狂风气化,所以比周边的静止蓝冰表面高 18 ~ 28 米。

我们在这条古冰舌遗留的古冰核终碛堤中发现了一批再搬运的混杂堆积岩(物)漂砾。这些漂砾成分复杂,除了大量哈丁山的原地花岗质片麻岩外,还有从东南极冰盖腹地长途搬运来的漂砾,如陨石、超基性岩、糜棱岩和沉积岩等格罗夫地区未曾发现过的异地岩石。对这些异地沉积岩碎石的颗粒形态、粒度分布和沉积环境的分析结果表明,这些冰碛岩(物)的沉积物颗粒具有多种搬运方式,是一种由冰川底部带、冰川内部及冰上带所搬运的沉积物的混杂堆积,其沉积环境为含水的冰川前缘地带,而不是目前东南极冷冰盖底部的无水环境。由于这些冰碛岩(物)的唯一来源是由其东南方冰盖腹地的纵深地带,而它们的形成环境又是冰盖前缘,暗示东南极冰盖的边缘曾经位于格罗夫山以南,距现今冰盖边缘后退约 400 公里。如果这些冰碛岩(物)的形成年龄早于南极大陆冰盖形成时的 1400 万年,则可

能属于南极冰盖形成过程中的前缘产物。但如果在这些漂砾中发现年轻的冰碛沉积岩,就说明东南极冰盖形成以后曾经发生过大规模的垮塌和退缩。

孢粉化石组合的年代学意义

我们在格罗夫山的沉积岩漂砾和土壤中发现了多种孢粉化石,其主要成分均来自冈瓦纳大陆第三纪以来的生物群落。格罗夫山样品的孢粉组合中已发现的草本被子植物花粉虽然不丰富,但在部分标本中出现了藜科和蒿粉属。草本被子植物花粉的存在及其在孢粉组合中的含量和变化是识别并划分新近纪(距今 2300 万年 ~ 260 万年)生物地层时代的重要特征之一。一般认为,草本被子植物花粉自中新世(距今 2300 万年 ~ 533 万年)早期开始少量出现,但限于少数或个别科属;中新世晚期较常见,而且科属数量也大大增加;至上新世这类植物才开始大量出现,尤其是在上新世末期常可形成一些优势组合(如藜-蒿-蓼等组合)。当前样品的孢粉组合中出现了藜科和蒿粉属,故其所代表的时代可以推测为新近纪。值得关注的是本组合中出现了 Weddellian 生物地理区中典型分子假山毛榉,而且可能是本区被子植物花粉的主要属种。一般认为,假山毛榉最早出现于白垩纪(距今 1.455 亿年 ~ 6550 万年),在渐新世(距今 3400 万年 ~ 2300 万年)最为繁盛。20 世纪 80 年代中期,科学家在横贯南极山脉广泛发育的新生代(距今 6500 万年 ~ 今)冰川沉积地层天狼星群内发现了假山毛榉花粉和植物大化石,同时因其内含有海相硅藻化石而将时间确定为距今 533 万年 ~ 258.8 万年的上新世。此外,在南极其他地区,罗斯海深海钻孔中,均发现了大量假山毛榉花粉,而据硅藻和放射虫确定其年龄在 300 万年左右。由此表明假山毛榉可能是构成南极上新世植物群的主要属种。

综上所述,格罗夫山孢粉的形成时代很可能为上新世。此外,除去再沉积花粉,本地菊

从南极大陆边缘采集到的岩石可以瞥见南极的过去，相关研究暗示着南极和世界上其他温暖的地域有很大差别。由于我们极少探查南极核心地带以及周边海洋的岩石，因此还无法就此断言。对于覆盖在南极大陆上的厚厚的冰层，我们对相关的地壳反应、火山作用以及地球内部涌出的热量对冰层产生的影响还是描述不够。同时，我们对南极地壳与地幔结构，以及南极大陆如何影响超级大陆的形成和分裂都知之甚少。存在于南极冰下的古代景观揭示了固态地球和冰川之间相互作用的历史。以往的相对海平面地质信号，将能揭示行星冰川在何时何地生成和消失。我们需要更多有关冰川、岩石和沉积物的记录，以便知道过去的气候是否会轮回。

编译自英国《自然》杂志 2014 年 8 月 6 日发表的评论

科花粉蒿属比北查尔斯王子山 *Pagodroma* 群更多。同时，我们还发现比蒿属出现更晚的菊科菊苣族。格罗夫山沉积岩漂砾的年龄应该不会早于晚中新世，上新世的可能性最大。以上推论如果被证实，说明当时格罗夫山西侧属于无冰的苔原环境，南极冰盖的边缘位于格罗夫山甚至更南的位置。

古荒漠土壤研究

格罗夫山极寒冷古荒漠古土壤的母质来自周围的基岩风化产物以及土壤底部基岩的风化产物。它们应当是在相对温暖的气候条件下，冰融水片流搬运上游风化碎屑物质至冰蚀坑中沉积形成的。土壤的石英砂表面结构分析也显示短距离冰水搬运痕迹。土壤的粒度分析显示其母质形成于一种近源的密度流至片流沉积环境，局部发育地表径流。由于水是土壤形成的必要条件，而格罗夫山现今夏季最高气温是零下 14 摄氏度，不存在冰雪融水的可能。因此，土壤本身暗示了历史上温暖气候事件的存在。科学家坎贝尔和克拉里奇根据已经研究的大量南极土壤的风化特征，将其划分为 6 个风化阶段，以此作为对缺乏化石的南极土壤的年代序列进行概率性判断的参考标志。对照这些标志，格罗夫山地区的土壤处于该土壤风化程度划分表的第三和第四阶段，主要是第四阶段，即地表岩石圆化、风棱石化和孔穴状风化发育强烈，染色和抛光发育良好，荒漠漆皮有一定程度的发育，土壤上层颜色深，下层颜色变浅，在地

表岩石下面有丰富的盐分，局部甚至延伸至整个土壤剖面，盐分断续或者连续呈层状分布在土壤地表以下 5 ~ 10 厘米处。所对应的土壤年龄是距今 50 万 ~ 350 万年，而不是 1400 万年或者更早。

宇宙成因核素定年研究

我们选择了两个典型的冰原岛峰——萨哈罗夫岭和哈丁山南岭的基岩连续剖面，利用宇宙成因核素定年法测定了东南极内陆格罗夫山地区冰退导致的岩石暴露年龄和冰退过程。这两条剖面均处于山脊线上，坡度稳定，萨哈罗夫岭剖面为 3 度，哈丁山南岭为 5 度。基岩的岩性均为花岗质片麻岩，变质叶理与岩石表面大体平行，因此剖面光滑平整。之后，我们将样品送到澳大利亚核技术组织利用高功率加速器质谱仪进行测试。

初步结果显示，这两条剖面上的连续基岩样品暴露的年龄基本随其高程的降低而减小，反映了冰盖表面连续平缓下降的过程。剖面位置较高的七个样品暴露出的最小年龄在距今 200 万年左右，与南极内陆其他一些地区测量出的最小暴露年龄相似。考虑到侵蚀作用，其暴露最早开始时间可能达到距今 500 多万年的上新世早期。这样，格罗夫山地区从所测到的最早岩石暴露以来至今，冰盖厚度下降了约 200 米。但由于剖面最高位置的两个样品中的数值比率未达到平衡点，说明当时冰面下降到剖面顶部

的高度时，仍有约 200 米的冰层覆盖在这两个剖面的顶峰之上。这样，可以推断在格罗夫山地区冰面平缓下降之前，当地的冰盖高度比现今高约 400 米。具有简单暴露历史的样品反映出冰面平稳下降的过程一直延续到距今 160 万年。在两条剖面的下部，大约比现今冰面高 100 米的位置上，即区域性风蚀与冰蚀界限的高度以下，五个样品都具有复杂暴露历史。这说明该地冰面下降后又发生过重新上升，即对岩石的重新覆盖，而且这种重新覆盖可能发生过不止一次。我们对这五个基岩样品进行了早期暴露时间和后期埋藏时间的模拟计算，其暴露和埋藏时间总和可达中晚上新世，也就是说从 160 万年以来，格罗夫山地区的冰盖进退过程一直处于第四纪振荡期。

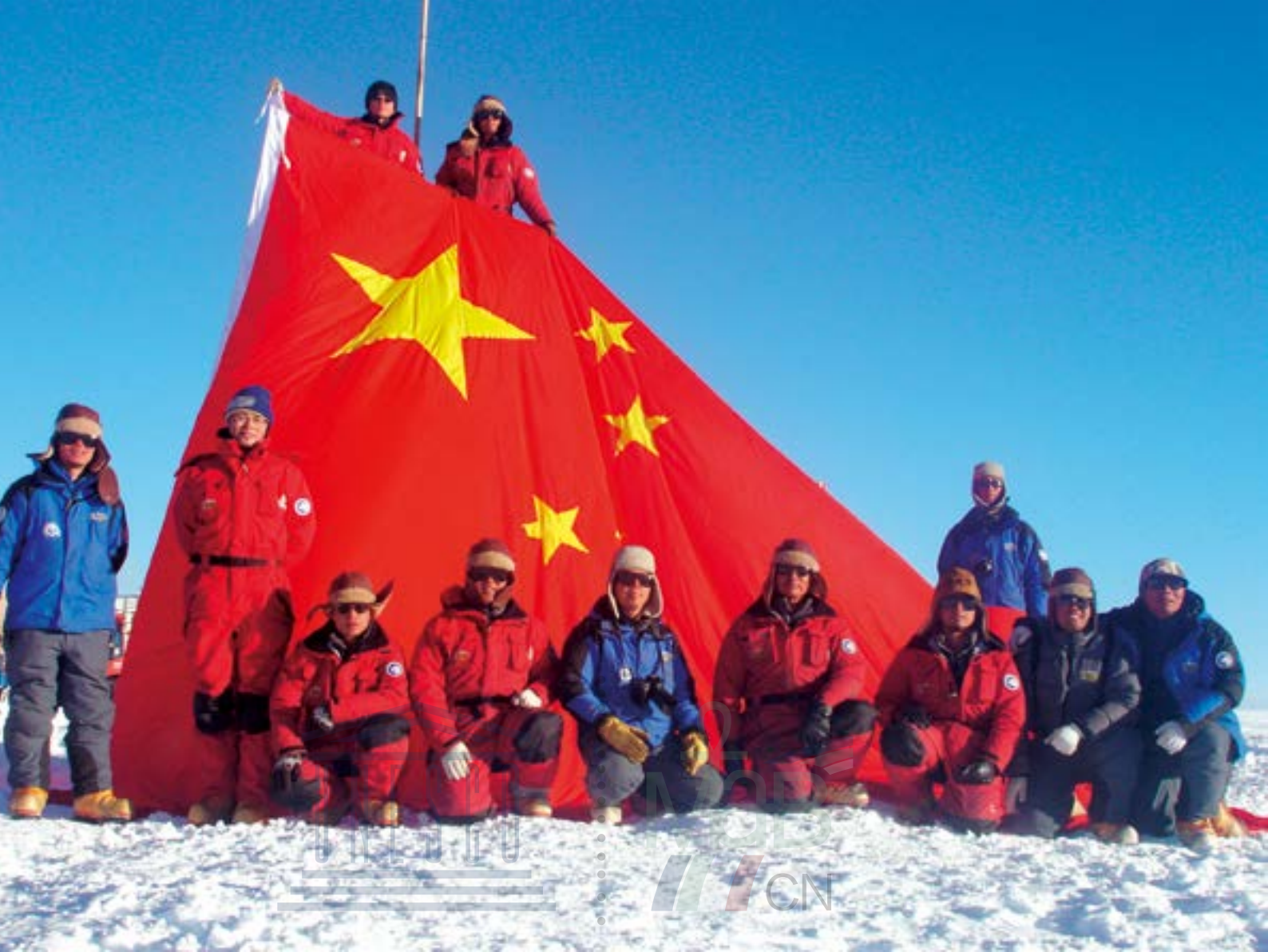
结束语

综合格罗夫山地区冰川地质地貌的风蚀与冰蚀特征，极寒冷荒漠土壤的形成年代，沉积岩转石的沉积环境分析、沉积岩和土壤中的孢粉组合的古气候环境及年代分析，以及原地生成宇宙成因核素等多种方法手段的研究结果，可以详细描绘出格罗夫山地区上新世早期以来

冰盖进退的历史过程。东南极大冰盖形成以后并非稳定演化至今。在上新世早期以前，东南极内陆冰盖曾经出现过大规模的消融，即东南极大陆冰川的前缘至少曾经退缩到格罗夫山地区，距现今冰盖边缘 400 公里。当时的冰盖规模甚至不到现今的三分之一。之后，东南极冰盖又迅速膨胀，到距今 230 万年时，冰面至少超过现今高度约 400 米。以后冰面缓慢平稳下降，至距今 160 万年时，东南极冰盖进入第四纪振荡期，但重新上升的冰面再也没有超过现今高度的 100 米以上。

东南极冰盖胀缩主要受全球气候变化和局地年降水量的控制。南极冰盖在上新世时的这种大规模消融—膨胀事件应当在行星尺度上有所响应。尽管东南极大冰盖剧烈消融事件的年代尚不能精确确定，但根据目前的研究水平，应当发生在上新世（距今 533 万年～258.8 万年）期间。这个时间段内地球上发生了许多重大的气候环境变化事件，例如地中海的莫西拿盐化事件、青藏高原整体剧烈隆升事件、西域砾岩开始沉积事件，以及塔里木开始风尘堆积事件等。一般认为，北半球大冰盖的形成是在距今 300 万年～260 万年之间完成的，但北大西洋和挪威海的冰筏沉积研究显示，北冰洋海冰和沿岸冰川—冰盖早至距今 550 万年时已经出现。这也从另一方面解释了迄今尚未找到对应于南极冰盖消融而导致的全球海平面大幅度上升的确切地质记录。东南极近海地球物理勘探和深海钻探结果显示，上新世早期时南极冰盖发生过剧烈膨胀，面积和体积都大大增加，总体积可能比目前的总体积还多出 18%，冰盖边缘（接地冰）达到南极大陆的陆架位置，尽管当时处于相对温暖的时期。我们的研究结果也显示在冰盖大规模塌缩之后，冰盖表面又剧烈上涨，比今天的冰盖高约 200 米。而从距今 230 万年开始的简单稳定的冰退，在时间上与巴拿马地峡关闭，南北美大陆连成一片导致的洋流变化和大气对流变化，以及全球上新世中期的气候暖期相对应。





翻阅天书：南极冰芯 述说的地球往事

文、图 / 效存德

古往今来，下雪是司空见惯的事，远如极地雪原，近至“窗含西岭”，雪与人类始终相伴。然而，“雪里有奥秘、雪里有故事、雪里有科学”仅仅是半个世纪以来人类的认识。这一切盖因认识到雪作为载体，承接并包裹了来自大气的各类杂质。杂质被雪所捕获通过两种过程：湿沉积和干沉积。这个道理常人也能体会，比如古诗里“雪洗虏尘静，风约楚云留”说的是湿沉积过程（雪花里包含了冰结核）；“烟尘

犯雪岭，鼓角动江城”暗含了干沉积过程（雪面接收大气杂质沉降）。人们从生活常识知道，白雪融化后的痕迹往往是泥土。

杂质一旦被雪所捕获，而这些雪在特定地理环境下（极地、高山）往往能够年复一年地叠加并长久留存，这就构成了冰雪“叙事”的基础。高山冰川厚达数百米，极地冰盖厚达数千米，年代分别达到数百年至数十万年，科学

家对包裹于其中的各类杂质进行解读，重建历史时期气候和环境演变以及人类活动印记，就如同翻阅天书。这种“翻阅”已经经历了几代人的探索，成果丰富！而今，这种探索仍在延续。

在遥远的南极，这种探索来得更晚。而且，科学基础是先在北极的格陵兰冰盖奠定的。

美国人亨瑞·巴德 (Henri Bader) 于 1954 年提出 “Snow flakes fall to Earth and leave a message” (雪花飘落地面，留下丝丝信息)，并于 1956 和 1957 年夏季先后主持了在格陵兰 Site 2 的两支冰芯的钻取，第一次提出了现代意义上的冰芯研究思想。丹麦科学家威利·丹斯加德 (Willi Dansgaard) 发现了降水稳定同位素比率变化的温度效应和降水量效应，第一次找到了降水稳定同位素比率是古温度计这一重大线索，提出了“过量氘”概念并指出了其环境指示意义，并率先在北极格陵兰冰盖冰芯研究中得以证实，使人们对过去气候变化有了革命性的认识。这些认识后来被科学家带往南极，加以应用和深化。

南极冰芯研究始于“国际地球物理



极地主要深冰芯钻取点分布图 (黑点: 已钻取冰芯;
白圈: 正在钻取的冰芯; 红圈: 拟钻取的冰芯)

年”，之后钻取了长度不等的许多支冰芯。1957 ~ 1958 年在南极伯德站钻取一支 309 米冰芯，1958 ~ 1959 年在罗斯冰架的小美洲 -5 钻取一支 264 米冰芯，1968 年钻取了南极伯德站 2164 米冰芯，1979 年钻取了南极冰穹 C 冰芯，20 世纪 80 年代初钻取了南极东方站冰芯。近 20 年来，科学家在南极成功钻取了冰穹 C、冰穹富士等多地的冰芯。至于数十米至数百米长度的冰芯，则无法统计，估计有数百上千支之多。

下面，我从长序列记录（超过万年）和短期记录（万年以内）两个方面，概略地谈谈南极冰盖这本“天书”讲述了怎样的地球往事。

地球气候的长期演变

说起来非常偶然和有趣，20 世纪 70 年代，苏联人和法国人在南极钻取冰芯的劳作之余，将冰芯的边料碎块丢进威士忌酒杯里，享受酒香的同时，细心的科学家看到酒杯里哗哗地冒出了气泡。仔细观察发现这些气泡来自于冰块。原来动力变质冰（雪压密后成冰）完全不同于平常的水成冰，前者内含大量封闭的气泡，从而引发了法国科学家克劳德·劳瑞斯 (Claude Lorius) 的好奇心。其后，他孜孜不倦地设计装置以便提取这些被封存在冰里的气泡，最终大获成功。自此，人类从地球上寻找到了古大气“活化石”。迄今，人类尚未有从冰体以外的任何其他材料中找到忠实记录古代大气气体的介质，冰芯是唯一的。这又是一次冰芯研究的里程碑式进展。连同前人奠定的理论基础，深冰芯这本“天书”才可以用来讲述比较精彩的地球故事。让我们来了解一下科学家从冰芯中获得的几个重要发现：

一、通过俄罗斯东方站冰芯和冰穹 C 冰芯，科学家发现过去 80 万年以来，地球气候主要受地球轨道周期支配：冰期—间冰期旋回具有 10 万年、4 万年及 1.9 ~ 2.3 万年的变化周期，其中 10 万年旋回为主导周期，在一个完整的冰期—间冰期旋回中，冰期通常占旋回长度的 80% 以



首次远征南极冰穹 A 途中（前排左一为作者）



南极点合影（前排左一为秦大河）

上，而间冰期只占不到 20%，持续大约从 1 万年到 3 万年。地球气候既对地球轨道变化引起的太阳辐射格局有规律性响应，也与温室气体和温度变化紧密联系。在 80 万年里，地球气候以及与之紧密相关的温室气体浓度经历了 8 次旋回，其中二氧化碳浓度在 180 ~ 300 ppmv 之间波动。全球平均气温变幅约 5 摄氏度（间冰期约 15 摄氏度，冰期约 10 摄氏度）。当今全球大气二氧化碳浓度已达 400 ppmv，是过去 85 万年来的最高值。这为联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）报告得出的主要结论提供了重要的基础。

二、大约在 43 万年前后，地球气候的变化特征与今天完全不同，科学家称之为“中布仑”事件。从冰芯记录看，43 万年前的气温波动幅度和周期较 43 万年以来的气温波动要小。迄今，学界对这一现象没有令人满意的答案。

三、南极和北极之间的气候联系。全球不同地区气候变化之间有何联系，机制是什么，是一个复杂的问题。南北极之间气候变化有何关联，驱动机制如何？碰巧这个问题被南极冰芯和北极格陵兰冰芯“唱双簧”式地给予了解答。大西洋北部的冷水驱动了贯穿整个南北大西洋的热盐环流，随着南北两极冰盖响应气候变化，热盐环流这一驱动机制也表现出节律性变化，这是以两极冰盖温室气体浓度变化作为时标参考得出的。表现为千年和数千年尺度上南极和北极气候的关联性：南极暖事件超前于格陵兰暖事件，且南极开始变暖的时期正好对应于格

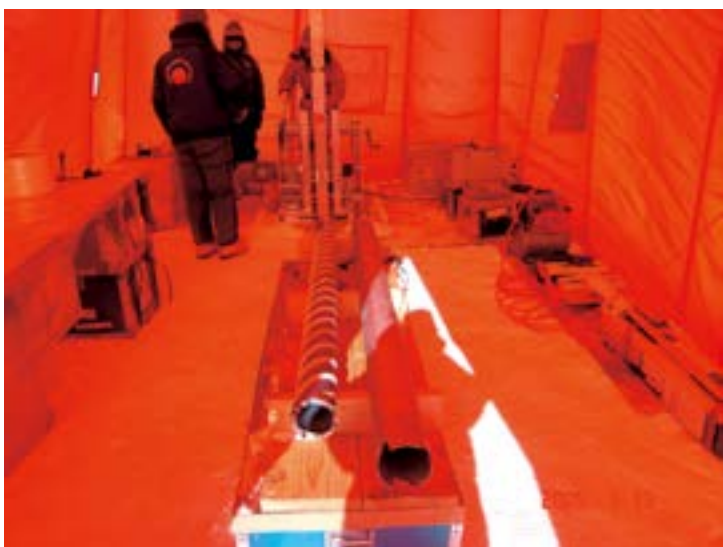
陵兰最冷时期。此外，南极变暖相对缓慢，格陵兰变暖相对较快速。这种对应关系揭示了热盐环流缓慢地响应时间，一次完整的热盐环流大约需要 1000 年。

地球气候的近期变化

冰芯越接近上部其平均年层越厚，越往下因为压密的原因其年层越薄。因此，上部冰层往往可以高分辨率地恢复历史气候和环境变化的细节。这里，我从全新世（约 1 万年以来）和百年尺度两个方面，谈谈科学家从冰芯里获得的主要发现：

首先，全新世气候：主要贡献是温室气体的精细化解读给出了 18 世纪中叶工业化以来温室气体与之前的自然本底浓度相比快速上升的事实。数支南极高分辨率冰芯温室气体记录都讲述了这一不争事实。此外，认识到南极气候对全球气候的影响相对滞后，一些极端事件在南极的幅度比北半球小甚至不明显，例如，8200 年前的冷事件——小冰期。这与广袤南极形成的相对稳定的局地气候有关系。全新世南极地区最显著的大气环流变化是发生于大约 5200 年前的西风环流的突变，以及 1200 ~ 1000 年之间的西风环流和阿蒙森海低压的加强。

其次，百年际气候变化：国际横穿南极探险计划（ITASE）组织了多国联合考察模式，各国在南极冰盖考察断面上钻取浅冰芯，以联合描绘全南极气候与环境变化综合图式。此计划于 1992 年启动，组织相对松散，也没有注明计



南极冰芯钻取



南极冰芯

划何时结束，因此当前还在继续。20 多年来，各国在南极冰盖钻取的浅冰芯不断累积，国际横穿南极科学探险计划也将其一开始瞄准的过去 200 年记录这一目标重新定位于过去 1000 年。数据库的建设在美国缅因大学搭建，目前还很初步。基于这些冰芯资料，得到了南极地区百年尺度气候变化的一些基本认识，主要是：南极各区域冰盖表面积累率区域差别很大，从大区域平均看，东南极冰盖略呈上升，西南极地区下降。过去 50 年来，南极最显著的大气模态（南极环状模 -SAM）转入正位相；各区域冰芯代用指标恢复的海冰范围变化。总体而言，范围海冰在 20 世纪呈上升趋势，即使在显著变暖的过去 40 年里，这种趋势未曾中断，引发科学界纷纷猜想。

中国科学家的主要成果

在过去的 25 年里，中国科学家开展了从南极中山站至南极冰盖最高区域冰穹 A 的综合科学考察，是目前在南极冰盖内陆地区考察频次最高的断面，也建立了雪冰现代过程研究的完整监测系统。其中冰芯研究是重要内容之一。取得的主要认识如下：

首先，我国科学家采用雪冰化学记录重建了南印度洋长期气候变化序列，阐明南极冷涡系统在东、西两半球间的年代际振荡主要受太阳磁周期驱动。我们利用冰芯记录恢复了南印度洋过去 252 年海平面气压的逐年变化序列，并揭示该海区气压变化与南极涡变化之间存在内

在联系。研究表明，南印度洋海区存在一个准定常冷涡系统，其平均海平面气压变化表现为规律性年代际变化节奏，分别于 1790、1810、1835、1860、1880、1940 和 1990 年前后出现年代际冷涡加深，而在 1750、1795、1825、1850、1870、1910 和 1955 年前后出现冷涡减弱。当然这些记录是否准确，最好有实测验证。我们发现，过去 40 年气象台站记录以及大气环流模式输出结果与本研究得出的结果非常吻合，说明所得结论具有一定的物理基础。

为了探讨这一海区气候变化与南半球大尺度大气环流之间的内在联系，我们进一步分析表明，南印度洋海平面气压与表征南极涡振荡的穿极指数之间存在一致变化，统计分析表明具有强烈的 22 年周期，正好是太阳黑子活动双周期；我们进一步寻求海平面气压与太阳辐照度之间的关系，的确发现二者在过去 252 年间保持一致，因此断定 22 年周期由太阳活动引起，即 Hale 磁周期，率先对南极涡振荡给出了明确解释。这项研究被世界气象组织（WMO）授予“2005 年度 WMO 青年科学家研究奖”。

其次，我国科学家确认南大洋不存在持续的“南极绕极波 (ACW)”，对因器测资料短而难于判断其是短期还是长期固有的气候波这一科学难题给出了明确答案。1996 年，科学家怀特 (White) 和帕特松 (Paterson) 发现南大洋存在一种顺时针传播的气候波，约四五年绕南

大洋一周，称“南极绕极波”。南极绕极波的发现被认为是近十年来对南极地区年际气候变化的突破性认识，但因为南半球高纬地区气象资料时序短，再分析资料误差大，国际科学界对南极绕极波是长期还是近期气候现象不清楚。后经我们采用高分辨率冰芯记录结合大气环流诊断分析，对这一问题给出了明确答案。办法就是从南极高分辨率（逐年）冰芯记录中提取了反映南印度洋气候变化的海平面气温和气压序列，由此再现了自 20 世纪 80 年代初以来的 4 次连续气候波列，分别对应于卫星时代以来再分析资料显现的 4 列南极绕极波，但 20 世纪 80 年代之前冰芯中并不存在南极绕极波信号。我们进一步对过去 200 多年长期记录进行详细研究后认为，南印度洋海域缺乏“气温总是超前于气压变化”等南极绕极波基本特征，从而反证了南大洋没有长期而连续的南极绕极波信号。

初步判断南极绕极波的启动区极可能在“南极半岛—德雷克海峡”地区，为此，利用该地区百年序列气象记录，我们研究了 20 世纪气候变化特征，发现 80 年代初发生了明显气候转型，即气温累积距平由负距平转入正距平，所以推断“南极半岛—德雷克海峡”极可能是南极绕极波激发区。也就是说，南极绕极波是 20 世纪 80 年代初气候出现重大转型后新出现的气候波类型。绕极波是一种驻波，还是驻波与行波的叠加，这个问题也需要继续关注。绕极波虽曾显著环绕过南大洋几十年，但并没有长期维持机制来把“故事”延续下去。

当然，中国科学家从浅冰芯中的其他发现还很多，在此就不一一赘述了。

展望

为协调和推动冰芯研究，国际科学界发起了“国际冰芯科学研究计划 (IPICS)”，其中的一个“重头戏”是寻找超过 100 万年的冰芯样品。前面介绍了迄今最长的冰芯序列仅仅是 80 多万年，为什么非要寻找超过 100 万年的冰芯？科学家解释说，因为冰期—间冰期旋回的

最显著特征是主导周期在大约 900 万年左右发生了重大转型，从在此之前 40 万年周期为主转为此后的 100 万年周期（即中更新世气候转型）。这一转变在冰穹 C 冰芯记录似乎有所体现（400 万年以前冰期—间冰期循环的周期似乎有所减小）。尽管许多与温室效应有关的假设被用于解释中更新世气候转型，但迄今其内在机理仍不清楚。因此，在南极冰盖寻取百万年尺度的冰芯意义重大，这也是“国际冰芯科学研究计划”的首要目标之一。

位于东南极冰盖最高点的冰穹 A 具有最低年平均气温（零下 58 摄氏度）、低积累率（<25 毫米/年水当量）、可以忽略的冰流速、冰厚度超过 3000 米等特征，满足了获取超过百万年冰芯记录的必要条件，是通过冰芯记录辨识中更新世气候转型（气候轨道周期从约 40 万年转变为约 100 万年）的希望之地。2005 年 1 月，我作为现场组织者之一，带队到达冰穹 A，开展了综合考察。在第四次国际极地年期间，我国在那里建立了“中国南极昆仑站”，深冰芯计划是建站的重要科学目标之一。目前在昆仑站的深冰芯下已经钻到 800 米深度。我希望，南极深冰芯研究的高塔上，能够发射出中国科学家的光芒。

南极冰盖这块神秘之地，科学谜团迭起。人们探究越多，涌现的疑问也越多，这些疑问紧紧地牵动着科学家好奇的神经。现已探知，南极冰盖下是密布的河网和湖泊，南极的“冰下科学”时代悄然到来。不仅是冰芯科学家感兴趣，生命科学家也想在此探索生命起源、地质学家想窥探大陆演化、古气候学家想据此模拟冰盖形成过程。因此，随着钻探技术的创新，将来南极冰芯研究很可能走向“冰芯—冰下湖芯—岩芯”联合钻探、合作研究的链式研究模式，这块神秘的大陆终将被智慧的一代代科学家揭开她一层层的面纱。

本文作者系北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室和中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室研究员

南极冰盖是否曾经消融

文 / 刘小汉

南极冰盖含有约 3130 万立方千米的雪冰，如果全部融化，全球海平面将上升 66 米。因此，极地古气候环境研究成为当前地球科学界关注的重点。近十多年来，该项研究取得了快速进展，研究精确度已经从定性转向定量，从百万年时间尺度精准到千年甚至百年尺度。

南极板块于 3400 万年前与南美洲板块脱离，环极洋流和西风带的形成在很大程度上隔离了南极大陆与中低纬度区域的热交换，使南极开始变冷，气候从亚温带逐渐向寒带的泰加林和苔原环境过渡，高山地带出现山麓冰川。至距今 1400 万年，随着全球二氧化碳浓度降低事件，南极大陆地表温度迅速下降，最终形成类似今天规模的大陆型冰盖。

在新近纪古气候环境研究中，上新世（距今 530 万年 ~ 258.8 万年）暖事件是科学界格外关注的焦点。原因是上新世时地球的板块构造格局、洋流模式和大气层结构与现今非常相似，甚至二氧化碳浓度也达到 400 ppm（百万分之一），与现今（380 ~ 450 ppm）数值近似。当时全球地表平均温度大约比现今高 3 摄氏度，而且气候剧烈波动。在这种行星尺度的气候事件背景下，南极冰盖是否也发生过相对应的快速进退，从而导致全球海平面剧烈升降呢？

20 世纪 90 年代起，德国、意大利、新西兰和美国等 8 个国家的 200 多位科学家共同策划了南极罗斯海冰架地质钻探计划 (ANDRILL)，主要内容是在东、西南极交界的罗斯海近岸冰架上和干谷地区开展系列地层学钻探，用以重建南极古气候环境演化历史。迄今已成功完成多口钻井，获得大量岩芯。各国科学家对于这些宝贵的岩芯开展多学科多手段分析研究，获得一大批高水平研究成果。目前该计划已经形成与冰盖内陆深冰芯钻探、南极陆架大洋钻探、

南极岸区与内陆冰川地质地貌研究和数字模型等手段相得益彰的新的平台。

例如，从罗斯冰架麦克莫多湾近岸区钻井获得的岩芯揭示了过去 500 万年以来存在 50 多个冰期—间冰期旋回。科学家威尔逊 (G. Wilson) 等根据其岩性将整个岩芯区分成 7 个不同沉积环境的特征岩性组合段，同时对岩芯采用了生物地层学、磁性地层学、地质年代学、沉积速率反演、岩芯缺失估算以及井位垂直反射地震剖面等不同手段进行研究。再结合区域人工地震探测，曲面载荷计算等数据，严格恢复了中新世中期至晚更新世该区古气候环境演化的精细过程。

科学家根据罗斯海沉积地层岩芯的岩性分析与磁性地质年代学研究，表明上新世暖期时该区确实发生了冰退事件，当时海冰已全部消失。距今 460 万年气候明显变暖，至距今 350 万年时达到高峰，气温甚至比今天高 5 摄氏度。从距今 260 万年起，气候重新变冷，至距今 170 万年时恢复到今天的温度水平。

此外，科学家在泰勒山谷完成的岩芯综合分析表明该地表也处于无冰状态。他们甚至发现了壳类生物化石碎片、植物根茎痕迹化石、植物碎片化石，以及生物扰动痕迹化石，说明当时甚至还有植被和动物。通过与邻近陆架钻探岩芯对比，科学家确定上述生物化石属于距今 492 万年 ~ 425 万年的温暖时期。不仅罗斯海在上新世时冰川消失，而且整个西南极冰盖也发生了大规模垮塌。因此，有科学家提出上新世暖期时南极半岛是绿色的。

综上所述，多国科学家合作确认了上新世暖期时该地区南极冰盖发生了大规模融化垮塌，为人们深入理解全球气候变化的机制提供了珍贵可靠的科学资料。



探知南极大陆冰雪下的秘密

文、图 / 赵越

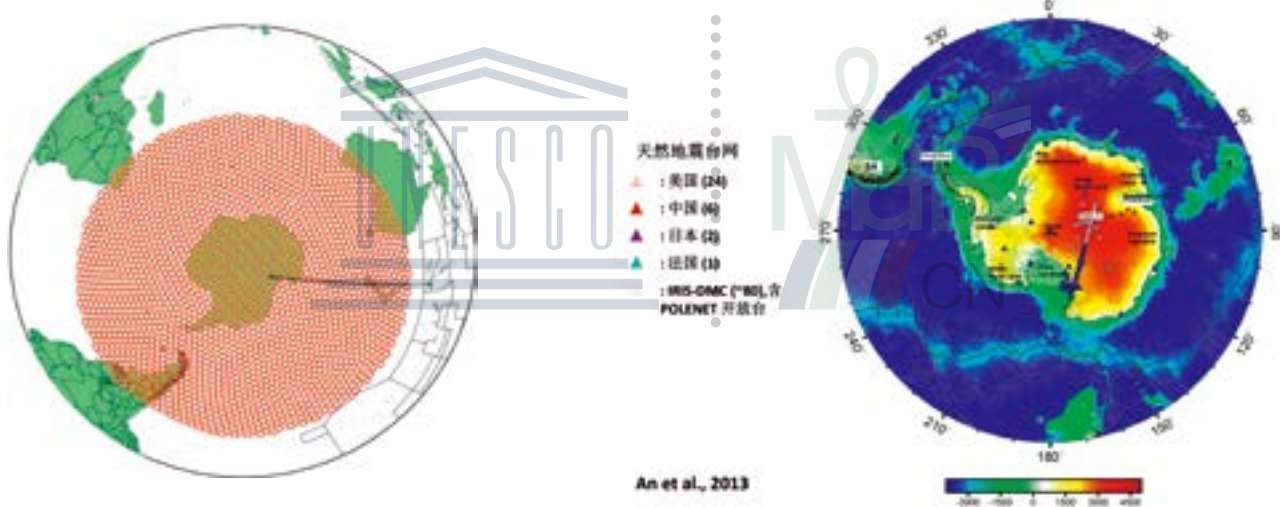
近年来，国际科学界在南极付出的巨大努力和取得的重要进展集中在南极深冰芯研究、南极冰下地质、南极大陆和周缘海域地壳以及上地幔三维结构、南极冰下湖、南极冰下极端环境下的生命等方面。一些已经开展的重要项目和后续即将开展的重要项目将逐渐揭开南极冰雪中和冰雪下隐藏的重要秘密。本文将介绍近 10 年来南极冰下地质和利用天然地震探测南极大陆深部结构的新成果。

甘布尔采夫冰下山脉研究计划

2007 ~ 2009 年是第四个国际极地年，距第三个国际极地年已经整整 50 年了，各国南极科学家利用 50 年一遇的大好时机，开展了大规模南极内陆科学合作考察。甘布尔采夫冰下山脉计划和南极内陆天然地震探测计划是其中两个国际瞩目的重大合作计划。甘布尔采夫冰下山脉计划又被国际南极科学界称为国际极地年旗舰项目，由多国科学家发起，经国际极地年组织机构批准，美国、英国、德国、澳大利亚、中国和日本的科学家分别申请批准立项。该计划由德国联邦地球科学与自然资源研究所 Detlef

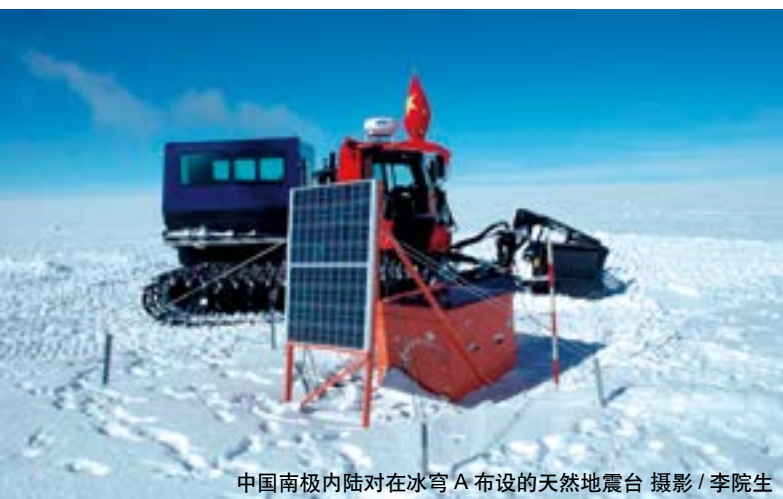
Damaske 博士为召集人的德国科学家队伍，国际极地年主席之一、美国哥伦比亚大学拉蒙特研究所的 Robin Bell 博士为核心的美国科学家队伍，英国南极局为骨干单位的英国科学家队伍和中国地质科学院地质力学研究所，以及后来加入的中国极地研究中心的中国科学家队伍为南极内陆现场执行和后期研究的中坚力量。澳大利亚科学家和日本科学家参加了项目的发起，但后来由于澳大利亚政府没有批准项目资助，而日本仅提供了 2 台天然地震仪，没有派科学家参加南极内陆大规模合作考察和提交牵头的后期成果，因此最终的重要成果由美国、英国、中国和德国的科学家分别完成。由于澳大利亚南极局提供了南极内陆现场大规模合作考察的后勤支持，因此保持了其在这一旗舰项目中的参加国地位。

这是迄今为止南极内陆最大规模的国际合作考察项目，取得了多项影响广泛的成果，也是参加国对这一非常重要区域科学投入的证明。位于南极大冰盖下的甘布尔采夫山脉与欧洲阿尔卑斯山脉大小相似，它是在 1957 ~ 1958 年



南极大陆天然地震分析网络

南极内陆天然地震台网



中国南极内陆对冰穹 A 布设的天然地震台 摄影 / 李院生

第三个国际极地年期间，由苏联南极考察队用人工地震的方法发现，并以苏联地球物理学家甘布尔采夫教授的名字命名。

国际科学界关注甘布尔采夫冰下山脉是因为其与诸多国际前沿课题密切相关。这些课题分别是：古老的东南极克拉通内部的巨大山系的成因；南极大冰盖的形成；神秘的冰下湖的构造控制因素；南极年代最老的冰川记录。

与南极甘布尔采夫冰下山脉计划一同被科学界关注的还有南极内陆天然地震探测计划。

南极内陆天然地震探测计划

南极大陆的一些重大科学问题与高精度南极大陆地壳和上地幔三维结构研究结果有关，如南极大陆的大地构造格架与甘布尔采夫冰下山脉的成因，南极冰盖的稳定性与南极冰盖下的热状态和岩石圈热结构。而南极大陆地壳和上地幔三维结构研究的关键是对南极大陆内部地震速度数据的获取。由于南极大陆内部自然条件极为恶劣，后勤保障和支持困难重重，大规模国际合作是实现这一目标的唯一方式。

从第四个国际极地年开始，以美国为首的多个国家对南极内陆实施了有史以来最大规模的天然地震探测。美国圣路易斯华盛顿大学 Douglas Wiens 教授领衔的团队布设了 24 个天然地震观测台，中国地质科学院地质力学研究所安美建研究员和笔者在以国家海洋局极地研究中心李院生研究员为首的中国南极内陆队协助下，在中国南极昆仑站至格罗夫山布设了 6 个天然地震观测台，加上美国另外布设的 2 个，以及日本的 2 个与法国的 1 个，总共布设了 33 个天然地震观测台。到 2010 年南极夏季结束时，国际极地年期间南极内陆最大规模的天然地震探测网获得了丰富的观测数据。在对原始地震

观测数据进行检查中，安美建等首次发现了地震台所记录的低精度 GPS 辅助数据可以用于分析台站之下的冰川运动，并利用中、美地震台记录数据对南极冰川运动进行了分析。

在数据分析反演过程中，安美建等开发了适用于较广泛地球科学问题的空间分辨率定量分析系列新技术，成果发表在国际顶级学术期刊。利用这些新技术，经过与美国科学家协商，中国科学家还获得了分析国际在东南极内陆所有地震台和美国在西南极的所有主干地震台所记录的、尚未公开的最新观测数据。安美建负责对以上台站记录的远震面波群速度进行分析和反演，获得了国际联合南极地震探测工作中具有代表性的、首个覆盖整个南极板块的、具有 1 度侧向分辨率的地壳和岩石圈三维剪切波速结构和温度结构，并据此首次绘出了覆盖整个南极板块的岩石圈厚度图、地壳厚度图和居里面深度图等。这是国际首个覆盖南极板块的、高精度的岩石圈三维结构图。这一结果使人类对整个南极岩石圈有了可靠的基本认识。该成果不但是南极地质学、地球物理学和地球动力学等研究必需的基础资料，也是南极冰盖稳定性、冰下热状态和冰下湖研究必需的基础资料。



西南极利文斯顿岛
拜尔斯半岛考察营地

通过对这些结果的分析，科学家进一步提出了冈瓦纳超级大陆（大陆漂移说设想的5亿年前形成的超级大陆）在新元古代末-寒武纪南极内陆碰撞山系的新证据和甘布尔采夫冰下山脉的成因解释。这些数据进一步支持了中国科学家早期提出的甘布尔采夫冰下山脉成因和南极内陆的大地构造格架。同时，科学家首次发现了南极半岛之下1000万年前的菲尼克斯板片俯冲残留等重要证据。

南极冰下地质

国际科学家团队从约占1400万平方公里的南极大陆0.3%的露岩地带所做的地质调查和研究，得出的南极大陆地质和大地构造模式，能否代表整个南极大陆，这需要南极冰下地质的调查资料验证、修改、补充和完善甚至更新。

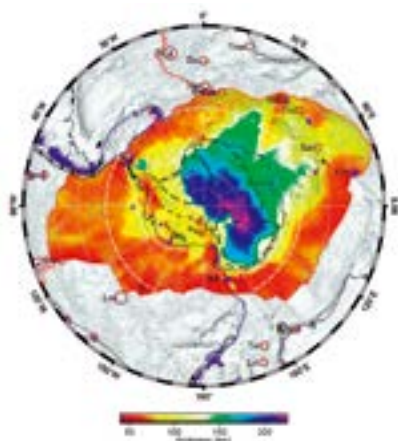
从第四个国际极地年伊始，中国地质学家就率先倡导开展南极冰下地质调查研究，并在东南极西福尔丘陵、风车行动岛和格罗夫山等地区进行冰下地质调查和研究。

冰下地质调查和研究是根据南极大陆特有的大规模冰川运动，导致其底部产生一种特殊的、强烈的地质作用——巨大的冰体对其下部基岩的强烈刨蚀，随之产生的刮削物质可以被

长距离搬运，并以冰碛物的形式迁移最终堆积到冰川的前缘，形成壮观如山的冰碛堤。科学家所开展的研究工作是分析这些冰碛物中的砾石成分和可能来源，可以对冰碛物的源区及成因进行追踪和排查；结合冰下地貌和冰川流域与地球物理分析，可获得对其源区更为可靠的地质和构造特征的推断。这是一个新而有效且又可经济地获取南极大陆冰下地质信息的途径。中国科学家在2006~2007年南极夏季已经开始了这项调查，至今已取得初步结果。

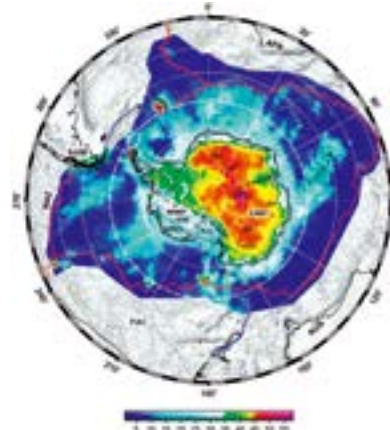
东南极西福尔丘陵东南区域是最早开展冰下地质调查的地区之一。这里是南极古老岩石出露的地区，岩石形成时代为25亿年前的太古宙末，并经历了750摄氏度高温的麻粒岩相高级变质作用。因此，西福尔丘陵地区的岩石所经历的地质历史相对短暂，岩石类型相对单一。实际上，南极冰盖周缘的冰碛物就像垃圾倾倒地，各种岩石聚集，成分非常复杂。西福尔丘陵东南冰碛岩的主要成分为：各种片麻岩、绿片岩、石英岩、浅变质沉积岩（片岩类）和沉积岩（砂岩类）等。各类岩石未经分选而杂乱堆积。

我们调查初期聚焦的对象是显著不同于原地基岩的浅变质和不变质的岩石，如片岩、千枚岩和沉积岩。它们应当是被冰川作用从南极



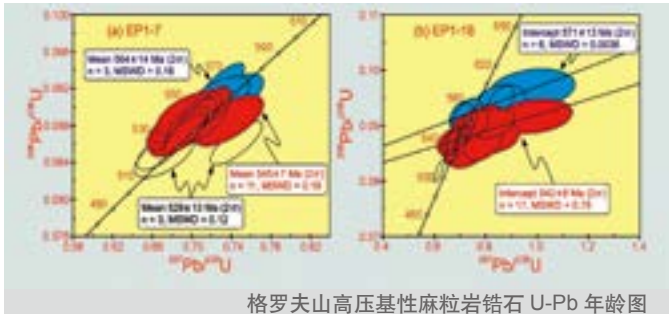
东南极多数地区岩石圈厚度大于150公里。在以南极最高点冰穹A为中心的区域岩石圈厚度可达200公里以上。

南极板块岩石圈厚度图

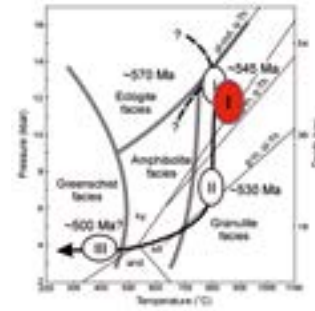


东南极多数地区地壳厚度大于35公里。在以甘布尔采夫冰下山脉冰穹A为中心的区域地壳厚度可达58公里以上。南极半岛多数地区的地壳厚度小于35公里。

南极板块地壳厚度图



格罗夫山高压基性麻粒岩锆石 U-Pb 年龄图



格罗夫山高压基性麻粒岩温压路径图
根据刘晓春等

大冰盖底部较远地区带到冰盖前缘沉积下来的，而非原地形成，因而带有南极冰盖下的重要地质信息。我们的调查首先是从冰碛岩砾石成分的统计入手，并对分布在冰碛岩中的沉积岩、浅变质岩和充填在砾石之间的松散砂进行取样。

在对一块含角闪石片岩样品的分析中，我们发现了南极最古老岩石的线索。这件编号 13-6 的样品定年矿物为锆石。其以自形或半自形结构为主，少数为次圆状。其阴极发光图像具有较为清晰的振荡环带特征，部分锆石具内核，表明其为典型的岩浆成因锆石。经分析，这是一块年龄超过 35 亿年，即古太古代的岩石。也是目前南极发现的最古老的岩石。此前国际上曾经在东南极纳皮尔地区的 Sones 山、查尔斯王子山脉的莫森陡崖和普里兹湾的赖于尔群岛等地报道过年龄超过 35 亿年的锆石，但都是继承锆石年龄，而岩石本身的年龄均不到 30 亿年。迄今为止，全球报道的年龄超过 35 亿年的岩石地点并不多。超过 35 亿年的岩石是地球早期历史的重要记录。

在随后的调查研究中，超过 35 亿年的岩石样品在西福尔丘陵东南不断被发现。结合之前国际上在赖于尔群岛的研究结果，我们可以确定东南极西福尔丘陵和赖于尔群岛东南的冰盖下存在古太古代地块。

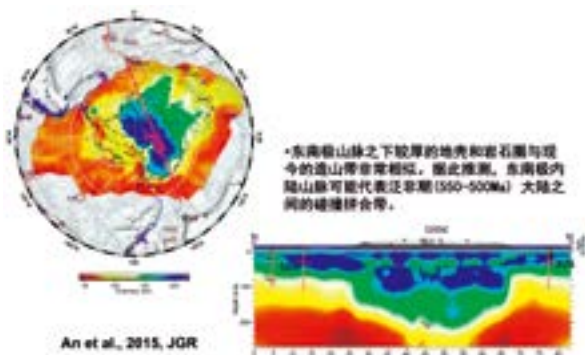
在超过 99% 的区域被冰雪覆盖的南极大陆内部，其地质构造格局是怎样的面貌，这是国际科学界研究和争论的重点。其中，一些区域的结合带，地质上称为构造带或造山带的年代

及空间展布更是焦点问题。

自从 1991 年我们最早提出东南极克拉通的形成时代是距今约 5 亿年的古生代初期，而不是距今 10 亿年的中—新元古代，20 多年来国际地学界逐渐认同了我们的观点。但是 5 亿年前造山带如何向南极内陆延伸，其是否为一个碰撞造山带，一直是南极科学界争论的焦点。

中国科学家在南极内陆格罗夫山的调查研究为解开这一谜题做出了重要贡献。格罗夫山是距中国南极中山站 400 多公里的一群冰原岛峰。其露头基岩主要由高级变质岩类（约占 80%）和花岗岩类（约占 20%）组成。变质岩以浅色和暗色长英质片麻岩为主，夹有少量镁铁质麻粒岩、变沉积岩和钙硅酸盐岩，这些岩石构成了格罗夫山地区的前泛非期基底。这些岩石的原岩形成于距今约 9.1 亿年，属于新元古代早期的岩浆岩。但是其中压麻粒岩相变质作用发生在距今 5.5 ~ 5.3 亿年，与古生代初广泛发生在非洲大陆的构造热事件基本同时，因此亦称“泛非期”。中国科学家经过长期的研究确定格罗夫山是一个典型的、仅经历泛非期单相变质—构造旋回的地体。

随后，中国科学家开始探索认识格罗夫山周围冰下地质格架。在格罗夫山碎石带的冰碛岩中采获的基性麻粒岩，记录了曾经历过压力达 14 ~ 11.8 千巴的高压麻粒岩相变质作用，峰期变质时代为距今 5.45 亿年。说明这一变质带很可能为“泛非期”碰撞造山带。后续证据进一步支持了这一结论，并将中国科学家确定的



东南极大陆地壳岩石圈厚度剖面图



东南极西福尔丘陵冰碛山



格罗夫山及其冰碛碎石带 摄影 / 胡建民



南极西福尔丘陵东南冰碛物中含角闪石片岩(右侧浅色)

以中国南极中山站所在位置的普里兹湾沿岸拉斯曼丘陵为中心的“泛非期”造山带延伸至南极内陆的格罗夫山。根据这些冰碛物应当来自南极内陆更南的冰下地区，推测其最可能的源区就是甘布尔采夫冰下山脉。这样就将这一“泛非期”造山带的南极内陆延伸和构造格架确定下来。接下来的工作是在甘布尔采夫冰下山脉地区钻探来验证这一科学推断，这也是国际南极科学界瞩目和期待的重要科学事件。

中国科学家在东南极风车行动岛和布朗山地区开展的冰下地质和冰原岛峰与露岩区的调查研究，细化了对东南极中元古代构造区的认识，并不断深入着对“泛非期”造山带的认识。

近期，南极冰下地质研究已经被国际南极科学界列为未来 20 年的优先研究领域。

南极冰下科学

南极大陆是一个名副其实的冰雪世界。迄今为止，人类对这一世界还知之甚少。20 世纪上半叶，人类对海洋的认识甚少，对洋底地貌、海洋地质和海洋地球物理更是了解甚微。但是当人类认识和了解了洋底地貌、海洋地质与地球物理等科学现象后，人类的认识便发生了飞跃，全球板块构造理论由此问世。因此我们相信，目前人类对南极的认识正在发生革命性改变。科学界对于南极冰下地貌、冰下地球物理和冰下地质的资料正在快速积累，认识在不断提升。这些学科与南极冰下湖、冰下水文、冰下极端环境的生命和冰岩界面，以及与南极冰雪中蕴藏着的气候和环境变化记录等学科和领域一起汇集成为南极冰下科学。这是一个庞大的科学体系。可以预见，探索和认识这些前沿科学问题将成为国际南极科学界的热点。而中国科学家将会为解开南极冰下之谜的一些关键环节贡献自己的力量。

本文作者系中国地质科学院地质力学研究所研究员



南极冰盖与全球海平面变化

文、图 / 李荣兴 冯甜甜

南极大陆的总面积约为 1400 万平方公里，平均海拔 2350 米，其中 98% 以上的表面都被一个巨大的冰盖所覆盖。全球 90% 以上的冰雪总量都储存在南极，占全球淡水总量的 72%，因此，南极冰层的变化是全球气候变化的重要驱动因素。

由于全球气候变化的原因，许多人对于南极冰盖是否会融化以及冰盖融化后会对地球上的其他地区产生多大的影响表现出极大的关切。为了进一步深入了解南极冰盖与全球海平面变化的关系，我们与中国极地研究中心、武汉大学、中国科学院测量与地球物理研究所、北京师范大学



大学和中国海洋大学等单位的科研人员共同承担了一项国家重大科学研究计划——全球变化研究项目——《近百年极地冰层和全球及典型区域海平面变化机理精密定量研究》。经过项目组所有科学家的共同努力，这一科研项目取得了可喜的研究成果。

南极冰盖融化流失与海平面上升

南极冰盖在西南极较薄、东南极较厚，最厚的地方可达 4600 米。尽管南极冰盖不可能在短期内全部融化，但假设其全部融化将使全球海平面上升 66 米。在之前一百年，全球海平面以平均每年约 2 毫米的速率上升，其中约三分之一的海平面上升量源自南北极冰盖。南极冰盖在太阳的照射下，其表层上的积雪渐渐融化，在冰盖表面形成大大小小的水洼，称为融池。它们可随温度的变化而或重复结冰、或集成更大的融湖，甚至与冰下湖互动，导致冰盖的不稳定，加快冰川向冰架及海洋的流动。我们所说的冰架是指陆地冰，或与大陆架相连的冰体延伸到海洋的那部分。崩解后的冰架成为冰山，或者说冰山的来源就是冰架崩解。冰架有大有小，大的冰架可达数万平方公里。近 30 年来，冰流速在西南极加剧显著，比如在 Pine Island 冰川冰流速高达每年近 4 公里。除了冰盖表面的运动，南极冰盖与

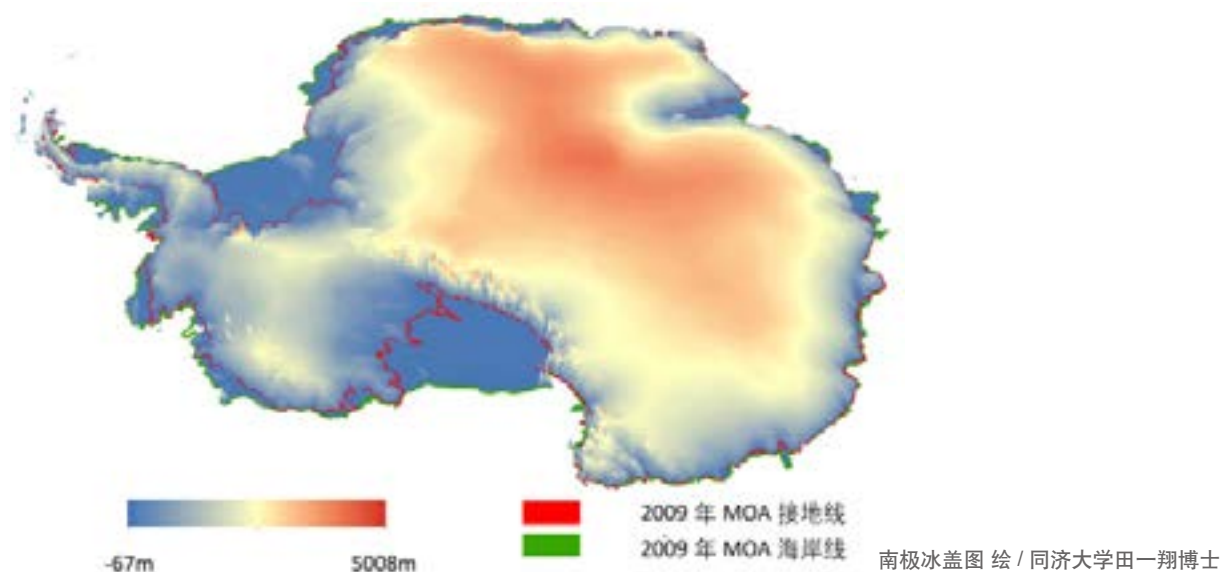
南大洋直接进行物质交换的主要形式还包括冰架前端的崩解和冰架底部的融化，比如 2002 年南极半岛拉森 B 冰架的崩塌。

总体而言，冰架的稳定对整个冰盖起到一个稳定和支撑作用，而海冰的变化是南极周边冰—海—气相互作用的结果，也是冰盖变化观测的一部分。

南极物质流失的卫星观测

南极冰流失也称为物质流失，由于其储量之大和范围之广，卫星观测是最佳监测方法。我们通常采用三种卫星观测方法：

一、光学 / 雷达卫星影像观测。利用光学或雷达遥感卫星观测冰川出口的冰流速度，结合出口截面面积和密度就能计算冰流量。除了利用近期卫星影像提取冰流速研究之外，我们还利用 20 世纪 60 年代 Argon 光学卫星遥感影像，对南极冰川表面流速进行估计，目前项目组的科研人员已经制作完成了东南极主要冰川流速图。我们研究发现，在 Rayner 冰流区域冰架前端速度降低，并向前延伸，趋向相对稳定。本研究将南极冰盖表面冰流速的数据前推到了 Landsat 影像出现之前的 20 世纪 60 年代，加深了我们对南极冰盖表面长时间序列变化过程的认识，



为我国及国际全球变化研究积累了重要的历史数据。

二、重力卫星观测。该方法类似于将南极冰盖在不同时间做整体或分区称重，以便监测其重量变化。由于该方法能直接观测到重量的变化，因此重力卫星是目前南极冰盖物质变化观测行之有效的快速观测手段之一。例如，我们用 GRACE 重力卫星数据估计东南级 Lambert 冰川 Amery 冰架区域在 2004 ~ 2008 年间的表面物质变化趋势，发现该区域的总体变化量为每年约 77 亿吨，变化的加速度约为 206 亿吨。然而，由于受到分辨率较低（约 400 千米）和不能区分垂直变化位置等限制，重力卫星观测的方法还不能应用到小区域的物质变化描述。

三、测高卫星观测。冰盖表面高程可利用激光测高或雷达测高数据确定。我们利用多颗和多期测高卫星观测数据，从中获得描述南极冰盖不同时期的表面高程数据产品，还可通过不同时期南极冰盖表面的高程差和冰盖的密度信息，计算出南极表面的物质流失量。比如，目前已有利用国际上最早的（20 世纪 60 年代）Argon 卫星遥感影像生成的南极表面高程数据产品，利用雷达测高卫星 ERS 生成的 20 世纪 90 年代的南极表面高程数据产品，利用激光测高卫星 ICESat 生成的 2004 ~ 2009 年的南极表面高程数据产品，利用最新的 CryoSat-2 卫星测高数据生成的近期南极表面高程数据产品。另外，根据这几种数据的比较和长期测高观测，

我们还可以监测到南极表面年变化率为厘米级的高程变化。

综合以上三种卫星观测方法结果，我们研究认为：南极冰盖近期冰流失率约为每年 560 亿吨，由此引起的全球海平面年上升率约为每年 0.16 毫米。我们发现，这些现象背后的大部分原因应归结于西南极的大量物质流失，而东南极由于降雪较大，冰流失量相对较低。客观地说，我们的上述估算目前还存在一定的不确定性，结果也存在争议，需要今后做进一步的完善和补充。

地面和航空考察南极冰盖变化

卫星观测提供了南极冰盖整体和长期变化研究的科学数据，而地面考察和航空观察是对卫星观测的有效补充，也是对区域性强化观测和冰盖突变研究的有效手段。世界各国的考察活动和长期数据积累是人类认识南极和地球系统的极其宝贵的财富。

我国第 29 次和第 31 次南极科学考察队中的内陆冰盖队，主导完成了两次南极内陆冰盖断面及典型区域关键过程与变化的强化观测，包括中山站—昆仑站断面、泰山站周边、冰穹 A 地区和伊丽莎白公主地周边地区的地面强化观测及航空冰雷达观测，获取了影响冰盖稳定性的冰盖底部过程及其环境的精细观测数据。依



我国南极科考队在工作中 摄影 / 崔祥斌



首架固定翼飞机航空科学观测平台 摄影 / 崔祥斌

托于我国首架固定翼飞机航空科学观测平台，我们对东南极伊丽莎白公主地开展了系统观测调查研究。共完成 19 次飞行观测，累计观测约 110 小时；完成科研测线 14 条，总长 3.25 万公里，覆盖面积约 86 万平方公里，发现了冰下湖系、冰下大峡谷以及冰盖深部大范围发育“暖冰”等存在的证据。“暖冰”是指在冰层内部，由于上部冰层重力和底部地热温度的作用，冰盖底部的冰层融点低而温度高，某些冰层的温度可以接近甚至达到冰的压力融点。通常把这类冰层称为“暖冰”层。

根据现场考察的冰雷达数据获得的冰穹 A 地区最新冰下地形三维结构特征，我们发现，在冰穹 A 区域，冰下基岩海拔最高值为 2496 米，最低值为 953 米。汇集于冰盖底部的水通过对流、冷却，或是当水从陡峭谷壁被挤迫而上遭遇超

级冷冻时，可能改变冰体的热力学和晶体结构，从而形成了重复冻结冰。

2008 年 1 月 12 日，围绕南极内陆海拔 4093 米的冰盖最高点，我国南极考察队设置了一个长 200 公里、宽 30 公里的矩形区域。在这个矩形区域的边界上，每隔 5 公里布设一个主要用于观测冰盖运动的花杆，考察队员们将其称为“中国墙”。根据对东南极冰盖昆仑站区域沿“中国墙”的冰厚和冰下地形探测数据资料的分析，我们发现沿“中国墙”的冰厚总体平均值为 2304 米，冰下地形高程总体平均值为 1722 米。接着，我们又对生成冰厚和冰下地形高程数据的所有冰雷达影像剖面进行分析，发现沿“中国墙”没有冰下水或冰下湖的存在，也没有发现冰盖底部再冻结和底部生长的现象。此外，“中国墙”处于冰盖顶部冰穹区域，冰流运动微弱，冰雪沉积过程相对稳定，因此，冰下地形对冰面地形的影响并不明显。基于我国第 29 次南极科学考察期间，科学家在冰盖底部特殊过程区域的冰雷达探测，证实了甘布尔采夫冰下山脉区域存在冰底再冻结现象。经过分析表明，复冻结区所在的冰盖区域的表面高程为 3610 ~ 3750

米，冰厚为 910 ~ 2250 米，其冰厚显著小于最早发现复冻结冰的冰穹 A 区域。

全球和我国沿海海平面的变化

科学家研究发现，全球海平面变化主要受三方面的影响：海水比容（单位质量海水所具有的体积）、山岳冰川融化以及极地冰盖融化。目前每部分的贡献量粗略为各三分之一。观测全球海平面变化量的手段主要有两种：一种是布设在沿海的验潮站，在全球范围内积累了近百年的观测数据；另一种是更精确、覆盖面更广阔的测高卫星，在近 30 年来提供了对全球海洋表面高程极具价值的连续观测。

据观测，1993 ~ 2015 年间，全球海平面的上升趋势约为每年 2.84 毫米，全球比容海平面的上升趋势在 2005 年之后约为每年 0.75 毫米。全球海平面的变化除了冰盖融化等长期趋势的影响，还有极端天气引起的短期效应。在 2003 ~ 2014 年间，几次较大的厄尔尼诺及拉尼娜现象均引起了海平面的年际变化响应。

中国沿海的海平面上升主要是由于受区域性洋流，以及中国海外围的印度洋和太平洋海平面变化影响，南海尤为突出。另外，通过对河流入海处海水温度变化和河流径流变化的观测，还可以进一步评估沿海海平面变化的区域性因素。比如，我们观测发现，1980 ~ 2011 年位于浙江舟山的大戢山站海平面上升速率为每年 0.178 毫米，其中径流量对大戢山站海平面上升的贡献率占 5.6% ~ 8.5%。另一方面，从时间序列结果中可以看出南海海平面变化速率较其他海域为高，如 1994 ~ 2014 年间南海海平面的变化速率约为每年 5 毫米，

随着城市化进程加快，沿海城市易受气候变化影响之脆弱性将会越来越显著，因此，城市发展尤其是沿海城市向低海拔区域扩张时必须要考虑海平面上升以及极端气候的影响。

本文作者系上海同济大学教授



南极科考情结，愈久而弥坚

摄影 / 冈瑟·里尔

文、图 / 孔晓宁

从 1984 年建立长城站算起，中国南极科考至今已有 33 年，但参与者仅以千计，真正了解南极考察中酸甜苦辣的人，可谓少之又少。但凡是亲历者，都会不由自主地产生一种“南极情结”，并且随着时间的推移愈久弥坚。那种超长距离跨越地球、在寒极向生命极限挑战后产生的跌宕情感，那种参与全球变化研究国际联合大行动后扩展的广博心胸，令人难以忘怀，甚至导致人生观及思维方式发生蜕变，生活轨迹由此改变。

我参加的是 1996 年的南极科学考察，那年正巧是人类首次踏上南极大陆一百周年。我记得出发的日子是 11 月 13 日，13 点离家，乘坐京沪 13 次特快列车到达上海，参加中国第 13 次南极科学考察，全体队员人数正好 130 名。当时，数量如此之多的“13”这个西方人眼中的不吉利数字凑在一起，让即将远赴生命禁区的我心里确有几分忐忑。

我们从上海乘坐“雪龙”号考察船，经过近 50 天的海上颠簸后抵达位于南纬 69° 22' 24"、东经 76° 22' 40" 的中山站。北京至中山站的球面距离差不多有 1.25 万公里，单程正好就是二万五千里长征！经过整整 4 个月的往返奔波，回到北京之后，我在自己的新闻作品中写下了这样一句感言：“一个人在有生之年能够足踏南极，可谓终生无憾；有机会加入到中国南极科学考察的队伍中来，亲自为祖国南极事业做出一份贡献，更是毕生有幸！”现在，21 年过去了，我的这种感受似乎更加强烈！

最后的净土

南极是地球上最寒冷的大陆，冬季最低气温可达零下 89.2 摄氏度，这种寒冷能冷到什么程度呢？打个比方：若把滚烫的开水泼向空中，落地便成了硬邦邦的冰碴！这里不仅极度寒冷，又是地球上风力最强的地区，呼啸而至的 15 级甚至 18 级狂风，足以把人吹得无影无踪。这里还是地球上最荒僻的角落，别处的绿色世界早

已生机勃勃，这里却一如月亮火星，始终保持着亘古的蛮荒与无限冷寂。

当然，地表荒僻与地底富有之间的相辅相成，正是地球的奥妙之一。在南极 1400 万平方公里的陆地深处，埋藏着丰富的煤、铁、铜和石油等 220 多种矿物。其中仅已探明的位于中山站附近一处高品位的带状磁铁矿，就足够全世界开采使用 200 年！特别值得庆幸的是，当世界上不少国家对于南极资源表示出日益强烈的兴趣，并且由南极条约协商国通过了“南极矿物资源活动管理条约”，允许在南极开展“谨慎的”资源开发时，经过一些有识之士大声疾呼，终于在 1989 年 12 月第 15 次南极条约协商会议上通过了否定上述条约的议案，随后明确宣布：



50 年内禁止开采南极矿产资源！

此时时刻，已有 20 多个国家在南极大陆和周围岛屿上建立了 150 多个科学考察站，其中常年考察站达到 50 多个。中国南极长城站和中山站便位列其中。科学家发现，南极犹如一个巨大的“档案库”，保存着从古至今地球气候与环境变化的丰富信息。有意思的是，尽管这里一年四季风雪交加，但仔细观察，会发现夏季的雪比较疏松，颗粒粗；而冬季的雪正好相反。于是，千万年的积雪就像树干的年轮一样，清晰地显示出层理结构。科学家们采用氧同位素

法测定每个层次的温度，即可知晓该层所代表年代的气温。用此方法，还可测出深层冰的年代。

更为重要的是，当雪花从天而降时，往往裹挟着许多空气。南极冰在积累过程中便把这样的许多气泡都保存了下来。采用科学方法解剖分析这些气泡，即可获知某一时段大气中二氧化碳等温室气体含量，还可找出从其他大陆火山、沙漠和森林等处飘来的微粒，借此了解过去发生过的环境事件。

迄今，科学家用于研究地球气候环境变化的材料主要有三种——黄土沉积、深海沉积与极地冰芯。在黄土高原，1 万多年的沉积只有 1 米；在深海中，10 多万年才能产生 1 米沉积；而在南极冰盖，万年沉积即可达千米。因此，冰盖这个“档案库”不仅信息量丰富，还可分“篇”细读。

正因为如此，1993 年 10 月，南极研究科学委员会推出的“南极地区在全球变化中的作用”国际合作项目中，把正在实施中的“国际横穿南极科学考察计划”列入其中。中国承担了该计划的“冰穹 A”研究区域。这个研究剖面横跨南极大陆边缘的中山站至 1000 多公里外海拔 4030 米的“冰穹 A”地区，需钻取各种深度的冰芯，从中获取近万年的气候环境记录。作为独立完成该任务的第一步即为我参加的第 13 次南极考察。科学家要在此次科学考察中，深入 300 公里远的冰盖腹地钻取 50 米深冰芯，从中获取近 200 年工业革命以来的气候环境变化信息。这也是“国际横穿南极科学考察计划”的重点课题之一。

冰盖考察队启程前往冰盖那天，原本每天工作时间不少于 12 个小时的考察站，破例放假一天，站上队员可自行前往冰盖边上送行。3 辆从德国进口的雪地车，每辆车后都拖着一辆大雪橇，上面堆满考察物资。一面鲜艳的五星红旗，在领头车上随风抖擞。出征仪式颇为壮烈——



奏国歌，领队讲话，冰盖队员代表发言，授队旗，喝出征酒，拍离别纪念照……热闹过后，8名冰盖队员与送行队员一一握别，然后驾车昂头向上，一头扎入冰盖深处。

经 5000 万年日积月累而成的南极冰盖，形如一个巨大的冰盔。冰盖考察队一路爬坡，每登高 100 米海拔，气温即下降 1 摄氏度。待抵达海拔 2300 多米的终点时，最低气温降到零下 34 摄氏度。一路上，冰裂隙、白化天气、沉降狂风，令“武装到牙齿”的队员们，还是吃尽了苦头。待他们在选中的钻探位置扎好一顶大帐篷，来自兰州冰川冻土研究所的高新生把钻杆直直地放在雪地上，启动钻机，让钻头向冰盖深处伸去之时，这位有着“中国第一钻”雅号的考察队员，由于连日的折腾，牙床肿了起来，本来瘦削的一张脸，变成了一个大圆脸。他把着钻机，牙痛实在受不了，就把火辣辣的脸，不时挨在冰凉的钻杆上，靠此土法镇痛。咬牙连续奋战 2 个昼夜，终于把两根冰芯一节节全部取出。

从 1993 年的首次冰盖考察开始，到 2005 年 2 月，中国第五次冰盖考察终于抵达了“冰穹 A”这个令人谈虎色变的“人类不可到达之极”。那里距中山站 1228 公里，海拔 4092 米。2009 年 1 月 27 日，又在“冰穹 A”修建了中国南极

昆仑站。它是我国继长城站、中山站之后建立的第三个南极科学考察站，是世界上第六个南极内陆站，也是南极大陆最高点唯一的考察站。昆仑站的建成，标志着中国已经具备了进入南极内陆纵深的的能力，是中国南极考察又一个里程碑。一个国家的南极科学考察站，往往代表了这个国家的经济实力和科技发展水平。中国在南极的实际存在与不断壮大的科考事业，正是国力不断强大的最好展现。

解读“天书”

我们乘坐的“雪龙”船，前往南极的最后一个停靠码头是澳大利亚西部港口弗里曼特尔港。根据地质学家们的考察，弗里曼特尔所在的西澳州，2 亿年前与中山站所在的东南极连为一体，都是冈瓦纳古陆的一部分。究竟是一种什么样的神奇力量，能使 1400 万平方公里的巨大板块，与冈瓦纳古陆分离，最终远赴遥远的地球底巅？根据“一脉相承”的原理，在南极大陆，又有哪些与澳洲相同的地质结构以及矿藏？这类神秘的问题，都需要地质学家们在南极寻找到充分的证据加以说明。

记得当我们走下“雪龙”船，登上中山站，中国地质科学院地质力学研究所的地质学家赵越立刻打点行装。他在一个背囊里面放进地质锤、笔记本和一架照相机，还找来一条救生用



摄影 / 冈瑟·里尔



李植生在工作中



的绳子和一根探路用的铁棍。接着，又在脸上手上涂上厚厚一层防晒霜，穿上长筒雨靴，戴上口罩、墨镜、毛线帽和手套，如此全副武装后，准备出发。

我也照着他的样子装备一番，和他一起出了门。按照南极考察队的明文规定，野外考察必须两人以上同行。因此，赵越须有我等相伴方可外出。

我们准备去的是一个海岛，从站区能依稀看见它的轮廓，步行过去必须走过一个小海湾。此时正值南极夏季，由于连日艳阳高照，裸岩与海冰相接处，到处可见阴森森的大裂缝。行至裂缝边，探头看下去，里面黑黢黢的，深不可测。我们小心翼翼地踏上海冰，不少地方表面的积雪已在融化，海冰呈现黑色。有的地方用铁棍一捅，冰即穿透了，下面的海水，咕嘟咕嘟地冒了出来。好几次，冷不防一脚踏空，一脚陷进冰洞，得赶紧卧倒抽出腿，长筒雨鞋里已是灌满了冰凉的海水，只好光脚穿湿鞋继续赶路。看着身边同样蹒跚前行的赵越，我下意识地摸了摸背囊中的那根绳子，心里琢磨着这个大个子一旦掉进冰窟窿，我该如何履行救援的职责！

我好不容易气喘吁吁地登上海岛，走在前面的赵越已经不见踪影。待我寻到他时，一块石头标本已经握在他的手中。石头色彩斑斓，煞是好看。赵越向我讲解说，石头上紫红的部分是石榴石，灰白的为石英，乌亮的称黑云母，这种五彩石，是中山站一带的特产。

一块南极石头，普通人只能欣赏它的形与色，而在地质学家的眼中，它无异于地球“天书”，可以从中读出远古的信息。

赵越此前已经来过南极，他采集石头样品并作分析，发现 5.5 亿～5 亿年前发生的一次构造热事件，导致东南极地盾形成现在这个样子。简言之，东南极是 5 亿多年前形成的。而过去

地质学界的一个传统看法是，东南极地盾的形成，源于 12 亿 ~ 10 亿年前的事件。中国地质学家的研究成果，修改了上述看法，并且得到了国际地质学界的高度重视及公认，从而成为新的东南极地盾研究的热点。

寻索新的冈瓦纳古陆的证据，以此证明大陆漂移学说，是赵越和他的同事们来南极苦苦寻索的主要目的。大陆漂移学说是德国科学家魏格纳 1912 年提出来的，该学说认为，现在的南美洲、非洲、澳洲、马达加斯加、印度半岛和南极洲，很久以前是连在一起的一块古老大陆，称为冈瓦纳古陆。后来，这块大陆随着大陆漂移而分崩离析，变成了现在这种海陆分布的格局。据赵越介绍，在寻找相关证据的过程中，中国地质学家们除了在南极找到了舌羊齿植物化石，还通过测量古地磁的办法，证实了大陆漂移学说的正确。当然，做到这些还远远不够，因为地球“天书”还有不少别的“章节”，仍需要下功夫一一“读”通。

南极精神

中国极地科学家董兆乾接受采访时说过的一句话，深深地印在了我的脑海中：“准备从事南极事业的人，必须具备一种精神，这就是把脑袋别在裤腰带上的精神。没有这种精神准备，就成不了真正的南极人！”

体验过西风带的狂风骇浪，遭遇过南极冰盖处处潜伏的生命杀手，我对董先生的话更是加深了认识。参加中国南极考察，还有一种刻骨铭心的感受，那就是累，不可承受之累。南极夏季转瞬即逝，大量站务工作必须抓紧完成。无论你是从事哪样专职工作，搬运、建筑、抢修、清理等等重体力劳作，人人有份！往往忙完 12 个小时公务，剩下的时间才能干自己的“私活”。那种深夜赶稿累得实在熬不住躺下合合眼，接着又硬挺着握笔的痛苦回忆，至今仍是刻骨铭心。记得在卸货最紧张的日子，一连苦干几个日夜，连饭都吃不上，因为厨师都上了阵。“真

是累死人！”在别处这句话有夸张的成分，而在南极却是实实在在的感受。

南极科考工作更是充满着艰险。记得 1997 年大年初一，国内正是春节放假阖家团圆的日子。中山站的几位科考队员一大早便起床收拾行装，准备乘直升机前往斯托尼斯半岛考察，因为这一天正好租用的澳大利亚直升机有空。窗外风力不小，飞机没有按约定时间从澳戴维斯站过来。起飞时间，就这么延迟到中午 11 点多。

斯托尼斯半岛距中山站 30 公里，其间冰裂缝密布，无法步行过去。我随中国科学院水生生物研究所李植生、上海极地研究中心陈波等科考队员，乘直升机在一个小湖边降落，我们落地后迅速支起了两顶帐篷。刚安顿好，李植生便在周围寻觅起来。原来，5 年前，他和另外 8 名考察队员曾经光顾过这里，结束一周考察前夕，队员们在沙滩上堆起一座小小的石山，里面放着一张用中英文写就的纸条，纪念那次考察活动。可眼下，搜来寻去，不见“文物”的蛛丝马迹。估计是极地狂风，把它们吹得无影无踪。

由于澳大利亚飞机只有这两天可以过来帮忙，五天的考察任务，必须压缩至两天完成。次日一大早，队员们匆匆吃了点干粮，便奔赴野外。晚间 10 时，周围景物已无法看清，我们地质考察组一行拖着疲惫的身子，回到宿营地。

从湖里打来清水，煮好开水和方便面，仍然不见李植生和陈波那组队员回来。用对讲机与他们联系，耳边只是响着嘎吱嘎吱的噪音。在这种荒僻的寒地，什么样的不测事件都有可能发生，我们决定出去找人。

登上一个山头，忽听对讲机里传来营地的信息：李植生一行正在正南方向，距营地还有两个山头。乘着月光，沿着一道两边都是悬崖的冰脊，我们攀上一座更高的山峰。走着走着，

我不知不觉一脚踩住另一只鞋的鞋带，一个趔趄，身子猛向悬崖边坠去。幸亏右脚及时蹬住了一块石头，令身体在悬崖边稳住了，好险！

在山顶，借着雪地反射光，终于看到了迟归者的模糊身影。飞奔过去，只见李植生一跛一瘸的，几乎挪不动脚步。原来，经过长途奔波，他已体力不支。下午，他脚后跟原有一个小黑斑磨破了，脚一落地，伤口就痛得钻心，行进更加困难。我急忙接过他背着样品袋，搀扶着他一点一点向宿营地挪动。好不容易钻进帐篷，他一脸憔悴，一言不发，看着煮好的方便面毫无胃口……

从此以后，李植生脚上的伤口再也没有愈合过。我们随度夏队乘船回国后，他与另外15名越冬队员留站越冬考察。从站上拍的录像看，他走路时，一直都是一瘸一拐的。拖着伤痛的腿，他坚持每月至少进行三次野外考察，完成预定的湖泊生态系统研究。此前，李植生曾对中山站一带的水样作过检测分析，结果发现了多氯联苯、DDT、666等污染物的踪迹。这一次，他主持的国家自然科学基金项目，要对南极洲受到污染的情况做出进一步的研究分析。冬天湖上冰层很厚，每次取样要先钻出2米深的冰洞，钻头一次打进去几十厘米，就必须拿回帐篷加热。每取一次水样，都是历尽辛苦。

当年年底，北京协和医院派驻中山站的队医把李植生的奇怪病况传了回去，经协和医院专家会诊，初步确诊他患的是黑色素瘤——一种凶险的皮肤癌！中国极地考察办公室的领导立刻安排他提前乘澳大利亚考察船回国。抵达北京刚下飞机，李植生便向前来接机的有关部门领导建议：我国应在南极中山站和长城站建立环境生态监测站，以此为条件，掌握全球环境变化。

回到武汉的第三天，李植生被送到武汉协和医院。经诊断，他脚上的癌细胞，已经扩散



到了淋巴，甚至转移到了肝脏！本来，若能及时治疗，这病是可以控制甚至治愈的。是南极的漫长岁月耽误了他的治疗。在他生命走到尽头的前夕，我来到协和医院他的病房。他说：“我在化疗，吃不下饭。我要早点治好病，等船把样品带回，我还有很多事情要做。”

至今，可以告慰李植生等一批中国南极事业先驱者的是，中国南极事业，在政府关怀和世人关注中，已经得到长足发展。“为人类和平利用南极做出贡献”的初衷，也部分得以实现。通过开展南极考察，中国不仅在那个极寒的天涯海角，显示出一个大国的实际存在，而且向世界展示了以天下大事为己任并且为此不屈不挠的民族精神。从这个意义上说，南极科考，正是中华民族的一方历史丰碑！

到南极去！当越来越多的中国人心存此梦时，我和不少南极人都无不幸庆，自己早已梦想成真！

本文作者系人民日报海外版高级记者
中国第13次南极考察随队记者



亲历中国第 33 次南极科学考察

文、图 / 荣启涵

2016 年 11 月 2 日，搭载中国第 33 次南极科学考察队的“雪龙”号科考船从上海港拔锚启航，开始“一船四站”的环南极航行。作为新华社随队记者，我知道未来的 161 天将是一场通向地球尽头的特殊旅程。

出发近一个月后，某个清晨，海面上开始出现密集的浮冰，气温变得异常寒冷。当第一座冰山出现在船舷的左前方时，船上的人开始意识到，南极快要到了。

随着一路上遇到的冰山不断增多，一众摄影爱好者也开始争相来到甲板，用镜头留住这些形态各异的“天然冰雕”。这些在海中漂浮的冰山，是附近的冰架和冰川前缘崩解断裂后形成的。它们以各种各样的形态从大陆冰川上分离出来，漂浮在海上。与北极多棱的冰山不同，南极附近的大冰山多为桌形的平顶冰山，它们大多来自冰架前缘直接断裂入海。

仔细观察这些冰山会发现，冰体内部或底部



2017年1月31日，中国农历正月初四，当人们还沉浸在新春佳节的喜庆中时，“雪龙”号一路向南挺进，摸索通过无水文资料的海区，刷新了全球科考船在南半球航行的最南纪录，抵达罗斯海之鲸湾附近南纬 $78^{\circ}41'$ 的水域。

Bay of Whales（鲸湾）原意本就饱含“英雄主义色彩”。1911年1月4日，挪威籍探险家罗阿尔·阿蒙森选择在鲸湾登陆，将这附近作为出发基地，准备冲击南极点。10个月后，阿蒙森和5名探险队员借助52条爱斯基摩犬牵拉着踏滑雪板和13个雪橇，遍尝风雪肆虐后，终于在当年12月14日抵达南极点，成为人类首个登上南极点的勇者。

这里发育着南极最大的陆源冰架“罗斯冰架”，从地图上看，罗斯冰架几乎覆盖了罗斯海的一大半。

此时，站在“雪龙”号前部和左右两舷能清晰看到罗斯冰架东部前缘，绵长的断面在阳光照射下棱角分明。随着全球气候变暖加剧，罗斯冰架前缘不断崩解、后退，让原先封尘在冰架下面的海水一点点显露出来。

所以，“雪龙”号此刻停泊的位置曾经被

呈现出浅浅的天蓝色。这并不是海水造成的，而是构成这些冰山的冰川冰里隐藏着一片“蓝天”。

冰川冰并不是由液态水冻结而成的，在极地高海拔高寒地带没有降雨只有降雪。降雪的融化程度很小，层层落雪在压力作用下进一步被压实，变质为冰，松散的雪粒之间封存了一部分空气，它们变成了冰体中细小的气泡。当被阳光笼罩时，波长较长的红橙色光不易被散射，而波长较短的蓝紫色光被气泡阻挡发生散射，让古老的冰川冰在固定了古气候成分的同时，还留住了一片“古老的蓝天”。



“雪龙”船航行到南纬 $78^{\circ}41'$ 科考队员及船员在甲板合影留念

冰层覆盖了数十万年甚至更长时间。当这片“崭新”的海水重新暴露在人们面前时，海洋研究学者显得格外兴奋。

科考队在这里开展了系统的多学科科学考察。通过对海洋现代过程和海底沉积物调查分析，能够更进一步了解罗斯海海底层流与沉积搬运机制，验证海盆演化史；通过海洋地球物理断面调查海底洋壳重力和地磁异常，研究海洋地质构造、重新认识海底扩张史；通过水文、化学和微生物分析，了解冰架水和底层水形成与变化，籍此认识罗斯海深部生物地球化学变化过程。

罗斯海是南大洋深入南极洲的一个边缘海，被认为是地球上最后一个海洋原始生态系统，或是最有可能揭示南极生命史的地方。

第 33 次南极科学考察队领队孙波说，这里集当今地球系统中能量交换、物质交换和圈层相互作用三大中心为一体，是一个聚焦多学科的天然理想实验室。在罗斯海一带开展的科学研究，将衔接当今南极科学发展的多个前沿，包括南极冰盖稳定性对全球海平面的影响、南极大气环流与海洋环流对全球气候的影响、南极地质演化与南极生命史以及南极生物多样性，等等。

为了更好地在罗斯海一带开展持续的科学研究，我国于第 29 次南极科考期间，将罗斯海维多利亚地的难言岛作为新建常年科考站的主要备选站址。随后在第 30 次至第 32 次南极科考期间



作者在南极

进行了综合考察和新站规划工作。今年再次抵达这里，对五个预选区域进行了站址优化比选。

面朝大海，背依雪山，登上难言岛的那一刻，我不禁为这里的美而惊叹驻足。随后，目光便被脚下遍地大小不一的石头所吸引。

冰川学家分析，这里曾经是冰川运动的通道。地质学家走遍这里的高地和山脚，认为数万年前的冰川运动将大量冰碛物带到这片临海的平缓地带。现在，岛上每隔一段就有巨石耸立，这些突兀的“大块头”也只有冰川运动的力量才能把它们搬运过来。

冰川运动是如何形成的？科学家解释说：因为冰川具有非线性黏塑性体的特性，在重力作用下受地形影响，会产生运动形变。南极冰盖内陆区域积累的物质通过运动输送到冰盖边缘并向海洋崩解。冰川运动过程中，对底部和两侧地表会产生强大的侵蚀作用，从而改变流经侵蚀谷的地形地貌。同时，运动过程中会产生强大的搬运能力，冰体裹挟着冰川侵蚀的岩块和岩屑一起搬运到冰川末端平缓地带和临岸边缘。难言岛上遍布的石头便是若干年前冰碛物的积累。

在难言岛两山之间，冰川形成了一道平缓向上的坡度。理论上，沿着冰面一直向南行走，就会走上南极冰盖。

如果从太空俯瞰，南极洲如同披上了白色的面纱，这大片的白色就是南极冰盖。目前，地球上仅存的两个冰盖是分别位于南极的南极冰盖和北极的格陵兰冰盖。南极冰盖的面积约有 1372 万平方公里，南极冰体的总体积达到 2700 万立方公里，这里的冰存储量占到地球冰川的 90%，占全球淡水资源的 70%。

从第 13 次中国南极科学考察开始，中国科学家开始向南极内陆冰盖进军。2009 年，我国在南极内陆冰盖最高点、海拔 4093 米的冰穹 A



中国南极深冰芯钻探突破 800 米难关



考察队员回收海洋调查仪器



考察队员在长城站附近采样

地区建成昆仑站，这也是南极海拔最高的一座科学考察站。

每年 12 月，内陆队的科考队员要从距离中山站东南近 10 公里处的内陆基地出发，行进 20 余天、行程 1300 多公里抵达昆仑站，并在那里开展各项科学调查。

有人这样描述在南极内陆冰盖开展科学研究的意义：“南极一望无际的亘古冰盖，如同一座按照时间序列蕴藏气候环境信息的图书馆。而在冰盖最高点，还是世界上开展天文研究最好的地方，也是国际公认最理想的深冰芯钻取地点”。

深冰芯具有高保真性，像树木年轮一样记录了气候环境演化规律的重要参考指标，对于了解过去的气候变化、认知当前地球所处的气候阶段及预测未来变化趋势等都具有重要意义。截至本次考察，我国已在昆仑站总钻进深度突破 800 米，这些深冰芯将被接续起来，用于研究 100 万年时间尺度全球气候变化。未来在冰穹 A 持续钻探研究，将帮助科学家了解数万年时间尺度的全球气候变化，以期揭开地球古气候之谜、重建中新世以来的气候档案。

南极是世界上最寒冷、暴风雪最频繁、风力最强、最干燥的大陆，年平均气温超过零下 25 摄氏度。海拔 4000 多米的冰穹 A 被称为“生命禁区”，这里空气稀薄，气压仅为海平面的一半左右，科考队员要在零下 40 摄氏度的冰芯房里开展钻探工

作。在如此寒冷的温度下，待上几个小时人就会被冻僵。严酷的作业环境，使得这项工作成为世界上技术难度最大的冰芯钻探科学工程。

除了读取冰层中隐藏的气候变化密码，人们也对冰盖的厚度产生了兴趣。孙波说，测量冰盖厚度主要使用的是冰雷达探测技术。根据 19 世纪物理学麦克斯韦方程组的电磁波理论，某个波段或者频段的雷达波在冰体中是可以自由通过的。

装载在雪地车、雪地摩托和飞机上的雷达装置向冰盖发射雷达波，在已知雷达波在冰盖内部传播速度的情况下，通过测量它从冰盖表面到底部岩床反射回来的时间，就能计算出冰盖的厚度了。通过网格状覆盖式的扫描，科学家逐渐掌握了更大范围内的冰盖厚度：平均厚度超过 2200 米，许多地方超过 4000 米，而在南极内陆的兰伯特大裂谷，冰体厚度超过 4800 米。

测量出冰盖的厚度之后，人们更加好奇，如果把硕大的南极冰盖揭开来，底下的大陆都有什么？

如今，经过人类对南极近一个世纪的探索研究，通过对冰盖下地形海拔高度的集合，已获得了南极冰下的地形图，发现这里隐含着巨大的甘布尔采夫山脉、壮观的兰伯特大裂谷和幽深的东方湖。而这或许只是惊人发现的一小部分，未来还会有更多深藏冰底的秘密被科学家揭开。

本文作者系新华社记者，中国第 13 次南极考察随队记者



马里奥·希尔南大洋水下摄影



海洋天使（海若螺属）是软体动物家庭的一份子，尤其喜爱寒冷的南极深海水域。



海星



在南极冷水海域迁移的栉水母类动物，这一只在可以变化彩虹色彩的触角的帮助下移动，在它透明的消化系统内可以看到磷虾。



海葵



在南极冰层下拍摄到这只威严的海豹，也是我最喜欢的照片。



以磷虾为食的蟹海豹喜欢吃完一个再吃一个。人们一直以为，这些海豹是食螃蟹的，它们的名字也由此而来。



M&B
CN



马里奥·希尔 (Mario Cyr) 是世界动物纪录片领域当之无愧的标杆人物，与迪士尼影业等合作打造了逾 150 部优秀海底电影作品。他也是海洋影片拍摄者中极少几位潜入寒冷水域的勇士之一。他的大部分拍摄工作都在严寒地区进行，南北极也不例外。正是这些难能可贵的经历，让他对深受气候变化影响的极地海洋生态拥有极为深刻的理解。



探索南大洋的食物网

文、图 / 周朦

今天，南极和南大洋的原始美与其巨大的自然资源储藏已经是人们经常谈论的话题，可是很少有人知道南大洋每年为人类“埋葬”大量的二氧化碳，以及近两百年来人类对其生态系统造成的破坏和影响。人类对南极和南大洋的开发已经有 200 多年历史：从 18 世纪起至 20 世纪中期，人类为获取南极海豹的毛皮和脂肪捕杀了 95% 以上的海豹；20 世纪初至 20 世纪 60 年代，为了满足对南极鲸类脂肪和骨的需要，人类对南大洋的鲸类进行了灭绝性的捕杀。从 20 世纪 70 年代开始，人类又开始试捕南极磷虾。科学家估计，南极磷虾资源量为 3 亿~10 亿吨，是单个物种群体生物量的世界之最，成为世界最为关注的未来生物资源之一。南大洋的大部分区域属高营养盐低生产力的类型，从 1990 年起，科学家在南大洋进行了十多次人工施（铁）肥试验，探讨增

加生产力和碳通量的地球工程方法。目前，如何有效保护南极和南大洋的环境生态与可持续性的利用南大洋的资源已经成为政府、企业、科学家和环境保护组织之间的争议热点。大家更多关注的是磷虾生物量的估计值是否准确，支持磷虾生长的生态系统能力有多强大，生态系统有多稳定，人工施肥是否会破坏生态系统的生产力等。然而这些争论的支持数据多来自于理论模型，现场观测数据非常之少。

我第一次参加南大洋科学考察是在 1992 年 7 月，此前一个月我刚从纽约石溪大学海洋研究中心获得博士学位，去到加州大学圣迭戈分校斯克里普斯海洋研究所做博士后。上船前我还梦游在数学与模型的时空里。当我登上纳撒尼尔·布朗·帕尔默破冰科考船，直奔南大洋后，



将不再是纸上谈兵和理想模型。在那里，我将面对风雪和海浪、不可预测的困难和危险，以及千丝万缕解不开的生物网和不可思议的生物习性。

“仪器发展才能产出更好的科学”，这句

话是英国化学和电化学家汉弗莱·戴维爵士的感言，也是我第一个海上航次的深刻体会。海上航行需要两个月，考察船在与大风大浪搏击中驶向目的地，船上的人除了要解决晕船问题之外可能无所事事，甚至无聊到令人发疯。我决定让工作占据旅途中的所有时间，加入到物理团



队，与科考队员一起投放温盐计和采水器；再加入生物团队，与考察队员一起拖网捕捉磷虾。我第一次看到磷虾造成的声学回声时觉得很好奇，并发现捕捉磷虾的网具是那么高科技和难以使用，磷虾是那么难以捕捉，而声学仪器的能力是那么强大！为了科学评估磷虾的资源状况，我决定将工作重心放在主攻船载走航式声学多普勒流速剖面仪方面，利用其测量的回声强度估计磷虾分布和生物量。当我画出第一张根据走航声学数据的磷虾平面分布图时，同行的考察队员面部表情都非常吃惊。传统上，人们都认为磷虾在海流和湍流混合的作用下，在大空间上是相对均匀分布的。但声学观测显示，磷虾可以克服海流和湍流在百米或千米尺度上聚集，形成高度的集群。南大洋并非到处是磷虾，而是在少数区域有大量磷虾集群。我第一次感受到真实的海洋与书本和模型之间的宏大距离，第一次认识到观测仪器在科学发展中的重要性，从此我与海洋观测建立了不解之缘。过去 25 年中，我集成了多个物理、化学和生物传感器系统，参加了 12 次南大洋航次、8 次北极航次以及 4 次太平洋航次，从而对海洋的认识一步步加深。

磷虾在南大洋的生态系统中有何重要，这是我在考察过程中非常关注的问题。南大洋的食

物网相对简单，磷虾是其中生物量之最大者。磷虾捕食藻类和中小型浮游动物，同时也是南极犬齿鱼、鲸、海豹、企鹅和大部分海鸟的主要食物。因此，它们在南极食物网中起着承上启下的作用，是将能量从低等生物传递至高等生物的关键物种。但是磷虾的食性及生存是个不解之谜。长期以来，科学家认为磷虾的主要食物是微藻，但在南大洋漫长的冬天，微藻几乎为零，那么磷虾是如何生存的？科学家给出了磷虾冬眠、消耗自己的能量、挖食冰藻和沉积物、捕食中小型浮游动物，甚至自相残杀等假说。经过 40 年左右的研究，科学家又给出了一个宏观的描述：春秋天水华时，磷虾是素食动物，摄食藻类生物量的 10% ~ 20%。藻类生物量的 80% ~ 90% 被微小动物（例如菌类、植鞭毛藻、纤毛虫、甲壳类幼虫和线虫）摄食，生物能量储存在微小型生物、碎屑和溶解有机物中。在漫长的冬天，微生物通过摄食和分解，将逐渐转化为储存在微小型生物、碎屑和溶解有机物中的生物能量，维持冬季生态系统。磷虾在冬季又变成杂食和肉食动物，摄食所有的中小型生物、沉积物和碎屑，并消耗自身的生物量或减少新陈代谢。在食物网中，磷虾不仅仅连接藻类和高等动物，同时也连接中小型浮游动物、碎屑和沉积物。如此看来，磷虾占据食物网的绝对中心地位。



南大洋的生产力、磷虾量与海水里的铁元素相关是近十几年来的重大科学研究成果。初级生产力决定生态系统对磷虾产出的支持能力。南大洋大部分区域有丰富的营养盐但是缺乏溶解铁，只有很低的初级生产力。溶解铁是海水中生物生长的必要元素。溶解铁在水体中与颗粒表面有很强烈的反应，吸附于悬浮在海水中的黏土矿物、氧化物和腐殖质等颗粒，随它们沉降于深海和海底，所以有很高的去除率。铁的主要来源是通过大气的气溶胶、沉积物孔隙水、冰川融水和河流。但是大洋远离这些铁的源头，因而造成极低的铁浓度，大洋缺铁成为限制初级生产力的主要原因之一。南大洋的大部分地区都缺铁，只有在南印度洋的凯尔盖朗群岛、罗斯海及南极半岛顶部的陆架上才会有高溶解铁的沉积物孔隙水混合至陆架水，通过海流的输运对下游上千公里的海区释放自然铁，造成大型水华。溶解铁除了来源于沉积物孔隙水、气溶胶（南极有冰盖，气溶胶量非常少）和冰川融水，还有生物来源，如磷虾取食沉积物后在水体里排遗，鲸、海豹、企鹅和鱼类捕食磷虾后排出的粪便，以及在溶胶和铁配体中被细菌释放出的溶解铁。溶解铁的来源和输运成为当今南极生态研究中不可缺少的部分。

2002年5月，南半球的冬天。在南极半岛，10~12级不间断的狂风和3~5米的巨浪把船打得左右摇晃。一个大浪上来，后甲板的海水瞬间达到齐腰深。每次作业时，零摄氏度的海水灌进雨鞋、雨裤、甚至一直到大腿都是常有的事。为了认识磷虾幼体是如何穿越陆坡上陆架的物理过程，我们在坏天气中整整五天时间，每天连续24小时工作。我在那里收到了斯克里普斯海洋研究所布瑞恩·格雷戈·米切尔的电子邮件，请我和他一起组织在德雷克海峡中的自然铁施肥项目。格雷戈·米切尔给了我一张卫星遥感水色图，显示了低生产力的环南极水流在通过德雷克海峡时突然出现了1000公里长、500公里宽的水华区。他问我是什么物理过程可以造成上升流并导致水华，我们是否可以一起研究这个问题？德雷克海峡是著名的风浪区，

我给他一个简短回答：问题很好，区域很糟，不想晕死在那里。格雷戈·米切尔回复说，南大洋对碳通量贡献是全球碳通量的25%~50%，如果我们认识南大洋的水华过程，我们也许能解决气候问题，挽救地球和人类。格雷戈·米切尔的父亲乔治·米切尔是页岩气开发技术之父，他在1986年以360亿美元的价格出售了页岩气技术，被称赞为美国和平建设争取了100年时间。从富家子弟的口中说出“挽救地球和人类”完全出乎我的意外。我立即答应了他的请求。2004年和2006年两个航次，我们一起在德雷克海峡中与大风大浪奋斗研究溶解铁来源和输运的问题。

南大洋对人类的另一个重要贡献是南大洋的碳通量占全球碳通量的25%~50%（100年尺度），在“埋葬”人类释放的二氧化碳过程中起着至关重要的作用。为什么南大洋的碳通量如此之高？这个问题是科学界目前尚未解答的重大国际前沿问题。科学家给出了不同的假设：南大洋的上升流和大深度的垂直混合给海洋上层提供了大量的营养盐，导致高、初级生产力和高垂直碳通量。但是南大洋并不缺营养盐，此假设逐渐被淘汰。新近研究证实，南大洋表层水中营养盐（氮、磷、硅）浓度很高，对海藻生产力限制很少；而溶解铁浓度极低，而铁是海藻进行光合作用时必须的微量元素，所以铁的来源和输运被认为是提高初级生产力的主要驱动因素。虽然南大洋的总生产力并不很高，碳通量却很高。进一步的假设是，高纬度垂直混合层在冬季很深，加速了颗粒碳和溶解碳的垂直输运；或水华藻类与嗜食藻类的浮游动物分布不匹配，造成大量未被嗜食的藻类沉降于深海。因为观测这些过程极其困难，这些假设成为国际前沿热点课题。

捕食者与被捕食者之间的时空关系是南极生态系统的科学核心问题。水华随水流和涡旋转瞬即逝，涡和流的尺度仅几公里或十几公里。浮游植物对溶解铁增量的响应是在5~10天，中小型浮游动物对浮游植物增量的反应则需要

30 ~ 40 天，反映滞后常常造成植物和动物分布的不匹配。磷虾具有游泳的特长，南极磷虾成体可达 5 ~ 7 厘米，游泳速度可达每秒 10 ~ 21 厘米，逃跑时速度可达每秒 40 ~ 60 厘米，游泳能力大大超越其他浮游动物，有能力追踪随流而走的水华。同时，它们具有聚集习性，部分找到食物的磷虾个体能把信息转告给其他个体，导致磷虾群一拥而上抢食。游泳能力和聚集习性使磷虾具有生存竞争力，是成为主导生物种群的两个重要因素。磷虾聚集的同时也是鲸、海豹和企鹅围捕的机遇，这是磷虾成为它们主要捕食饵料的原因之一。观测捕食者与被捕食者之间的时空关系需要多种传感器的集成，但过去几十年来，这个问题一直是学科进展的技术障碍。

人们常常赞美南极和南大洋的原始美，但那里也并非是一片处女地。从 1700 年开始至 1970 年为止，产业性猎捕与加工海豹和鲸在南大洋给上述物种带来灭绝性灾难。因为鲸和海豹的主要食物是磷虾，失去了捕食者，磷虾种群生物量大量增加。在此期间，企鹅不仅缺少了争抢食物的竞争对手，又有更多的磷虾可以捕食，因而数量迅速增加。自 20 世纪 60 年代停止捕杀鲸和海豹以来，鲸和海豹数量在快速回升，同时企鹅和磷虾量在减少。过去鲸和海豹数量的减少及磷虾生物量和企鹅数量的增加，与当前鲸和海豹数量的增加及磷虾生物量和企鹅数量的减少，在学术界构成了南极磷虾剩余理论假设。近十年来，磷虾

生物量和企鹅数量明显减少是否能用磷虾剩余理论解释，与目前南极区域的气候变化和海冰减少是否相关？研究磷虾，必须研究高等动物，这些营养层及生物种群之间的相互作用及气候变化的影响已成为目前国际热点科学问题。

2005 年，一个名叫亚里士多德·弗瑞兰德的博士驱车 1000 多公里来找我，希望与我一起申请有关南极物理、磷虾和鲸类研究的项目。2002 年，我曾经和他一同去南大洋，那时他是博士一年级的学生。在他的推动和努力下，我们申请到了“鲸在南极生态中的作用”项目。2009 年冬天，我们在海湾里发现了上百平方公里的超大聚集群的磷虾，密度可以达到每立方米成千上万条。经过磷虾的捕食，海水清如蒸馏水，但我知道，磷虾群即将面临饥饿和死亡。我们目睹了 400 多条鲸围捕这样的超大磷虾群。鲸的捕食对于数量如此之大的磷虾来说是微不足道的。那么，究竟是什么原因造成磷虾会集成如此大群，饥饿死亡率有多高，有何生存竞争的长处和短处？这些都是目前未知的南大洋生态动力学的关键科学问题。

南大洋的磷虾资源的确是人类的重大财富之一。几十年来海洋研究结果表明，南大洋的磷虾生物量虽然高，但磷虾的生长周期较长。其原因是生物生长的速度与海水温度成正比，南大洋表层海水的温度是各大洋最低的区域，生物总体生





长比较慢，支持磷虾生长的生态动力学能力相对较低。磷虾的生长速度在低温下也比较慢，需要2~3年才长到4~5厘米。所以生态系统一旦破坏，其恢复的能力也相对低。目前南大洋生态系统对磷虾的可支持能力及其稳定性认识尚浅，保护资源是开发资源及可持续性利用的必要条件，而保护资源必须首先认知生态动力学过程。

南大洋的碳通量是全球气候变化的重要过程之一，是人类治理气候变化的关键区域。有科学家提出，南大洋绝大部分区域缺乏溶解铁，生产力极低，在缺铁海区人工释放溶解铁，制造大型水华，不仅可以提高碳通量以解决人类释放二氧化碳的问题，又可提高磷虾和渔业的生产量，是解决气候变化和人类对粮食需求实施大型地球工程的良好区域。但大部分科学家指出，有机物在海水中被微生物分解是需要消耗溶解氧的，制造大型水华、形成大量生物量沉积的可能负面后果之一是有机物分解造成的低氧或缺氧区，这将大规模破坏生态系统；同时，碳通量的大小不仅取决于初级生产力和微生物圈驱动的营养盐循环，磷虾和中层鱼通过嗜食、垂直迁移和排遗在垂直碳通量和营养盐循环过程中占有非常重要的比重，低氧或缺氧区将严重影响磷虾和中层鱼的习性和生存。磷虾是整个生物网中生物量最大的、承上启下的关键物种，牵一发而动全身。我们必

须认知海洋生化、生物和生态过程对人工释放溶解铁和磷虾捕捞的响应，分析人工水华和磷虾捕捞对生态结构和经济社会发展可能造成的正、负面影响，以保护南极生物资源的可持续性利用。

在人类近50年的保护下，南极和南大洋的环境和生态正在恢复，基本保持着原始的美丽和丰盈的资源。在那里没有人类垃圾和噪音，企鹅和鲸与人类可以和平相处，壮丽的雪山和冰川美得令人窒息。南大洋默默地驱动全球温盐环流，帮助我们埋葬掉人类制造的热量和释放的二氧化碳。虽然南大洋的磷虾是人类未来可利用的巨大生物资源，但人类50多年来开展的南极研究已经逐渐认识到：南大洋的生态系统在温度的影响下生产力相对较低，生物网相对简单，磷虾在其中是核心种群。因此，人类对其资源的大规模利用要慎之又慎。

南极和南大洋的美丽自然环境和生态是全人类的瑰宝。研究、认识和保护她们，留给子孙一个美丽的南极和南大洋环境，一个健康的生态系统和可持续性利用的海洋资源，是我们的责任和使命。

本文作者系上海交通大学海洋研究院院长
国家“千人计划”教授



罗斯海的浮游植物

文、图 / Walker O. Smith, Jr.



将仪器布放在海里，用来估算浮游植物的丰度

远离熟悉的家园，几个月一直待在零摄氏度以下的环境里，周围风力每小时达 100 公里，居所又很逼仄，这是什么感觉？很多人会觉得压抑。而对于像我这样的人来说，却把这一切视为挑战和机会，从中获得一番稀缺的经历和体验。这就是我的选择——以海洋科学家的身份在南极的罗斯海工作。毫无疑问，在南大洋工作可谓五味杂陈，各种挑战如影随形——心情压抑、恐惧、孤独。但四周景色优美迷人，辛劳得到丰厚回报，总之就是一言难尽。不过有一点很确定，那就是在地球上这样一处孤悬而原生态的地区拥有这样一段人生之旅，总会让人欣喜若狂；即便存在诸多困难和挑战，我也会毫无保留地期待着再来一段在那里的工作旅程。现在来谈谈我的研究工作。

作为一类微小的光合营养生命体，浮游植物是整个海洋食物网的基石，相关研究具有多方面的重要性。浮游植物对环境变化反应敏感（例如那些因人类活动而导致的变化），在海洋对大气二氧化碳的吸收方面，它们的作用最为关键。从这一点上，可以看出浮游植物是气候变化以及海洋缓冲这些变化的核心。在罗斯海，针对浮游植物的研究能提供有价值的信息，帮助我们认识这一片水域食物网的能量如何转移、改变，最终支撑当地高密度的鲸类、企鹅等极地鸟类以及海豹的生存。不过，对于那里浮游植物的生长和分布，相关调控因素还存在很多未知，我们需要更多信息以理解其中的复杂关系。

人类研究罗斯海的历史已经超过一百年，毕竟这里是南极许多探险活动以及向南极点挺进的地点，其中以英国的探险家罗伯特·斯科特最为知名（他在返回途中不幸遇难）。这些针对南极大陆的早期探险以轮船为工具抵达罗斯海，所建立的南部前哨阵地为相关的大陆探险提供了保障。在探险家们向内陆挺进的过程中，有人采集了相关的海洋科学样品，以更好地了解在地球上这一最靠南的海洋里，浮游生物究竟是如何分布的。之后针对罗斯海的探险也提供了一些有关浮游生物的信息。然而，更翔实的调查起始于

1957 的“国际地球物理年”，当时，美国的麦克默多站和新西兰的斯科特基地对外开放。美国海军以及海岸警卫队的巡航准许相关人员在罗斯群岛附近采样，这些活动提供了早期罗斯海南部海况以及浮游生物的信息。

20 世纪 70 年代，美国海岸警卫队针对麦克默多站发起了早期探访，以便为该站点提供再次的补给。在其过境期间，相关的科学研究也经常得以开展。20 世纪 80 年代及其之后，专门的科学巡航日益变得司空见惯，这让我们有机会了解罗斯海及其浮游生物状况。此外，罗斯海也是 19 世纪大规模的捕鲸地区。在罗斯冰架上有一处凹槽，名为“鲸湾”。在捕鲸船的记录上，描述有当地数量众多的鲸类，以及 19 世纪的捕鲸“收成”。可以说，“鲸湾”见证了捕鲸活动对南大洋及罗斯海生态环境产生的影响，自 1983 年以来，我去过那里多次，但前后仅仅看到一头鲸。

有人认为罗斯海是世界上所有海区中最为原生态的，不过这里已经明显受到区域外的人类活动的影响而发生改变，捕鲸活动就是其中之一。随着环境中二氧化碳浓度的升高，罗斯海正经历着快速的改变，这反过来增加了海水的酸度。诚然，罗斯海还没有受到外来污染物的直接侵入而保持着相对原生态的状况，不过，从大气中输入的物质以及对鲸类等高营养级生物的捕杀，让这里难以独善其身。人类的这种担心还延伸到南极犬牙鱼的商业捕捞方面，这是近些年来从北部地区发展出来的一项新兴产业。这种生长缓慢的鱼类被捕捞之后，将对整个大陆架的食物网产生潜在的影响。

1983 年，我们研究了罗斯海浮游植物在冰雪消融情形下生长与分布的关系。结论是，冰缘对于浮游植物至关重要，因为冰雪融水的输入造就了分层的水柱。这是一项开创性的研究，它量化了冰缘区的重要性，而之后相关的许多研究都把冰缘视为具有生产力的、对食物网能产生极端影响的区域。该研究也在小范围空间尺度上进行

了采样，在此之前，大多数的研究都是以站点为基础开展采样，之间相距约 1 个经度（合 100 公里左右）。我们的站点之间相隔 30 公里左右，可见我们采取的是一种非常不同但又很重要的采样思路，它已经被许多到访该地区的人所采用。我们研究发现，在受冰雪融水影响的海水里，居于主导地位的是一种硅藻，后来命名为短菱形藻。实际上，其种群密度巨大，在当时海洋有关发现中居于第一名。由此可见，将罗斯海的海洋学特征及其浮游植物进行介绍是很精彩的。

第一次航行之后，我们后来又开展了几次，发现了相关情况的年度差异的重要性。比如，在有一年的浮游生物中，某一类群的硅藻居于统治地位，而另一年则是另一类群。让我们越发清楚的是，浮游植物如同海洋环境一样，在不同季节之间呈现出显著的变化。就这样，理解这种变化随后成为我研究的重要组成部分，相关知识也大大加深了我们对罗斯海生态及生物地球化学的认识。例如，在有一年 11 月的航行中（正处于南半球春天），在浮游植物中处于压倒性地位的是南极棕囊藻。这种藻类的形态非常特殊，在一层有机质被膜内，分布有一些直径约 5 微米的小小的单个细胞，从而构成一个球状细胞群，如同把若干个细胞排列在一个球内，中间充满了海水。这样的细胞群直径达 2 毫米，在所有的海洋浮游植物中属于“大块头”。在广阔的海洋里，大多数浮游植物的直径小于 10 微米，因此上述球状细胞群的大小超过它们 200 倍。这些“大块头”还有非同寻常的特性，例如能产生浓烈的气味，这是因为它们能产生和释放大量的挥发性硫化物，其中的奥秘还不得而知，但这可能是它们演化出的一种保护性代谢机制。在罗斯海，针对这种藻类的研究已经得出了很多结论，主要体现在它们对整个海洋的重要性方面。然而，有关它们的分布、生长和生态的知识还知之甚少。

由于罗斯海甚至整个南极地区都让人难以造访并采样，因此新技术的重要性就显现出来了，使得我们可以不必非得依赖船只采样，或者在有

船只的情形下，能更有效地利用时间。我最近参与的一项研究就利用一条缆线将仪器垂到海底。由于浮游植物生活在有阳光透过的海洋上层（即透光带），我饶有兴趣地将荧光计布设在水面下 50 米处，以记录叶绿素对光的反应，从而估算浮游植物的丰度。结果发现，浮游植物的蕴藏量呈现极端的季节变化。同时，我们还将其与上述用缆线垂下仪器所取得的发现相联系。我们还发现，风暴极大地改变着浮游植物的季节性变化。如果依靠船舶，那么这些生态学发现是难以充分获得的。除了荧光计，我们还使用了能连续记录数据的电导率—温度—深度记录仪，其中电导率是海水盐度的直接表征。从上述数据里产生了一系列令人惊奇的发现，其一就是海水上层从 1 月上旬到中旬之间开始降温，这比我们基于陆地站点数据的预测发生得早很多。

最后，我们还使用了基于缆线的沉积物采集器，它们可以采集从海面下沉的颗粒物质。美中不足的是，在样品的采集以及数据的阐释方面，这种仪器还存在诸多缺陷。不过，在我们采集和分析沉积的个体颗粒物质方面，它们是为数不多的技术手段之一。研究颗粒物质沉降的意义是如此之大，因为它们能阻止碳物质进入再循环，从而在长期的意义上能降低二氧化碳的浓度。我们从沉积物采集器获得的数据，有助于揭示罗斯海表层水体之间的关系（当地的海流含有有机物质），以及揭示浮游动物对海流中的物质进行摄食的潜在意义。这些数据使得我们可以估算棕囊藻对年度生产力的总体贡献，结果是平均 60% 左右，可见它们对罗斯海的重要性。

相关的估算在生态学方面具有重要意义。有人认为棕囊藻处于一条生态“死胡同”，因为他们不相信这种藻类会被大多数浮游动物有效利用。如果情况属实，那么罗斯海域大规模集群的海鸟、企鹅、海豹、鲸类和鱼类必然依赖一个受到高度削弱的生产力系统；基于对食物网及其内部组分相互关系的了解，我们还不清楚这么一些蕴藏量巨大的高营养级物种是靠什么活下来的。



红色部分是罗斯海和麦克默多站

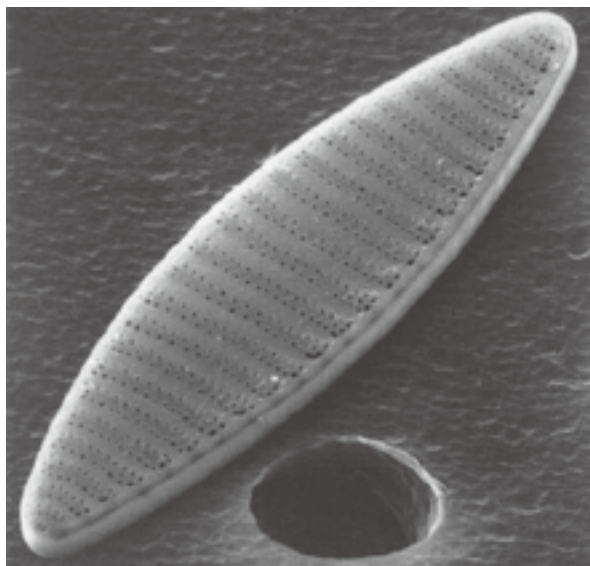
如此富饶的生态系统是怎样受到浮游植物的生长和产量的支持？这是罗斯海的神秘面纱之一，对该生态系统的了解将是未来研究中存在的挑战。

另一种用于浮游植物研究的新设备是自主水下航行器，也就是水下机器人，它们在行进过程中会在水柱中摇摆，在此期间连续不断地收集海洋科学数据。其中一种类型是水下滑翔机，它们在罗斯海的无冰区域已经得到成功运用，其优势在于能持续开展长达几个月的采样，而且作业范围比轮船小得多。因此，我们信息采集的精度能达到 1 公里，而轮船则是 30 公里。这也就意味着我们可以进一步认识海洋中的某些特征，它们对海洋的运动过程非常重要。此外，水下滑翔机能采集到水下 1000 米处的样品。美中不足的是，这种设备行动缓慢，每天才走 20 公里左右，无法开展大范围采样。还有，它们搭载的传感器数量太少，原因在于这些传感器都需要电能驱动，而这些电能都必须储存在电池里。某些传感器和设备是水下滑翔机里的核心，例如电导率—温度—深度记录仪以及能实现编程和数据传递至基地的卫星通讯设备。水下滑翔机的工作效率也会因为自身的水力学特征以及传感器的重量而打折

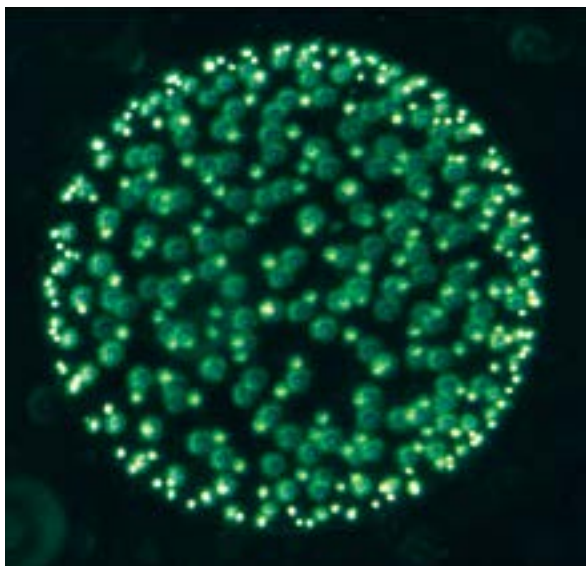
扣，导致传感器难以充分发挥其固有威力。

即便存在这些制约因素，水下滑翔机依然在小范围的生态学以及生物地球化学循环研究方面证实了自身的价值。例如，最近有论文指出，风暴天气对水柱中有机物质的重新分配以及促进有机物质流进入海底都有帮助；另外，风暴与有机物质流的关系并非时时相同，而是与海水表层浮游植物的浓度有关。这意味着，理解浮游植物分布及其丰度的一般型式，将大大有助于我们预测有机物质流进入海底的情况。

水下滑翔机还用于评估浮游植物和企鹅的关系方面。相关的关系并不直接，毕竟企鹅对于清澈或浑浊的海水（意味着浮游植物众多）并不表现出明显的偏好。然而，企鹅的食物——磷虾及小型鱼类会聚集在它们的食物——浮游植物和小型浮游动物活动区。在水下滑翔机上，有人安装了声学传感器，以此探测水柱中的磷虾及小型鱼类。而企鹅身上也安装有传感器，以此确定其潜水深度和位置。将以上数据同时纳入分析后，研究发现随着时间的推移，磷虾在水柱中的分布会从 40 米左右降至 70 米左右，而小型鱼类则一直



南极硅藻的电子显微照片 © T. Johnson



南极棕囊藻的显微照片 © Pete Countway

停留在 55 米左右。可见，企鹅食物的分布是随季节而变化的，这与直接研究企鹅食谱所获得的结果一致。磷虾在水柱中的分布特征可能是因企鹅的摄食所导致。此外，企鹅的行为与浮游植物的季节性分布并不呈现出对应关系。因此，食物网内的变化与高营养级生物的活动之间的关系最为紧密，即便企鹅的食物需依赖于浮游植物的生长来供应。如果我们还是借助船舶，那么采样将是不连续的，也就无法获得上述认识。

近些年，其他研究技术开始发展出来，并在我们的科考船上日益得到应用。其中之一是浮游生物视频记录仪，它们被拖曳在行驶的船尾，能拍摄浮游生物高清的影像。和水下滑翔机类似，这种仪器也会在水柱中摇摆，但只能下降到 130 米深处。该深度依然处于透光带，因此视频记录仪的威力就显得强大起来，让我们能量化大约 1 公里左右的小范围内的浮游生物组成。而且，这种设备的工作范围宽广，毕竟船舶每小时能行驶 20 公里左右。在罗斯海，我们以此为手段获得了一系列惊人的发现。首先，棕囊藻有一种新的生命形式，它有可能在水面种群的调节方面具有重要作用。其次，这种藻类在冰缘附近生活，在接近 100 米的极端深度条件下也能生长，其分布强烈地受到涡流的影响（这是一些直径约 20 公里的回旋水体）。发现于冰架附近的浮游植物聚群是如此之大，如果与世界上其他海区的同类相比，

它们都是名列前茅的，对整个罗斯海能产生显著的影响。如果无法在特定的时空界面上采样，那么我们就不能理解某些特征以及事件对罗斯海生态和生物地球化学的重要性。

中国正准备成为罗斯海研究的主要国家之一，在不久的将来会建成一处科研基地，同时有计划地针对这一地区开展科考。这些努力将使得中国的科学家能参与到业已存在的国际行动中，以了解罗斯海及其对全球气候变化的反应，了解商业捕捞对食物网的影响。有关罗斯海各种复杂的相互作用的知识，以及对浮游植物在食物网和生物地球化学循环中重要角色的进一步了解，将有助于我们预测未来岁月中必然会发生的变化。

在努力研究罗斯海浮游植物的过程中，我有很多机会结识新朋友，扩充自己的眼界，也有机会追求那些对整个社会有益的知识。在罗斯海开展研究是极少有人能获得的特权，它会给人带来一生难以磨灭的记忆。我期待能有更多机会追求这一梦想，同时会鼓励和培养未来的科学家，促使他们前往罗斯海这一精彩而富有挑战的地区，进一步研究那里的浮游植物。

本文作者系美国弗吉尼亚海洋科学研究所专家
上海交通大学“千人计划”入选者
本文由先义杰编译



南大洋与二氧化碳的“源”和“汇”

摄影 / 周朦

文 / 李铁刚 王家凯

CN

随着蒸汽机的发明，第一次工业革命得到蓬勃发展。时至今日，化石燃料的大量使用及工业废气排放产生的二氧化碳所带来的温室效应，使人类赖以生存的气候环境受到严重影响，且这种变化在短期内很可能是不可逆的。据记载，自19世纪起，地球气候系统似乎逐渐向着变暖发展，大气中二氧化碳浓度升高、海洋表面持续升温、冻土消融、世界上大部分山地冰川消融、格陵兰岛及南极冰盖和冰架消融使得全球海平面上升了15~20厘米。气候系统的不稳定迹象越来越明显：生态失衡、物种灭绝速度加快、厄尔尼诺和拉尼娜现象交替出现。仅就我国2015~2016年经历这两种现象所带来的极度干旱与洪涝灾害来看，其中仅2016年的洪灾所造成直接经济损失就达1469亿元人民币！由此可见，全球气候变化与人类栖息的生态环境和社会经济环境息息相关。关注二氧化碳浓度的

变化，对人类探索全球气候变化的未知性有着至关重要的意义。本文将从二氧化碳对全球气候变化的影响入手，辅以最最新的气候变化假说，来说明南大洋水体流通性变化对大气二氧化碳浓度的影响。

人类在“挑逗发怒的野兽”

不可否认，气候变化已成为21世纪人类关注的焦点问题，而目前最具争议的问题当属大气中二氧化碳浓度的升高对全球气候变暖的影响。2004年，美国科学家华利·布勒克提出：二氧化碳在大气中含量的增加是导致气候巨变的一个“导火索”。人类向大气中释放过多的二氧化碳无疑是在“挑逗发怒的野兽”，大自然会不定期地对人类进行报复。在这个问题上，学术界的主流观点认为：人类活动造成了大气中二氧化碳浓度的升高，特别是加速了8000年以来大气中二

南大洋占全球海洋面积约 25%，但其碳汇却占全球海洋的 40% 左右，其依靠的武器是低温以及强劲风力对海水的搅动。自 2002 年以来的 10 年里，南大洋的碳汇呈减少趋势，但随后出现逆转，目前每年正稳步地吸收更多的二氧化碳。然而，这也使得对酸化表现脆弱的南大洋变得更加酸化，进而影响藻类和贝类等有壳生物的生存。

编译自美国“南极计划”官方网站

氧化碳浓度的升高速率。人类活动，如森林砍伐、水稻种植和家畜饲养等造成的温室气体浓度的增加，在一定程度延缓了冰期的到来。但也有科学家认为全新世以来大气中二氧化碳浓度的升高主要来自海洋的碳释放。不过双方都不否定的事实是：二氧化碳作为温室气体，其浓度升高会直接推动全球变暖。

1984 年，瑞典科学家汉斯·奥什格尔报道了过去格陵兰南部冰芯中二氧化碳浓度的变化与大气温度变化相一致，即格陵兰冰芯显示的每一次温度的上升都伴随着二氧化碳浓度上升约 50 ppm。这一报告令科学家们开始重视千年尺度的气候变化事件，让他们更加相信二氧化碳与气候变化的联系。值得一提的是，在奥什格尔发布报告的几年后，他在联合国政府间气候变化专门委员会第一次评估报告中担任第一章的主笔之一，将这个结果写进了报告。但是事后证明，奥什格尔的发现只是格陵兰冰在贮存过程中的一个假象，是由冰内捕获物间的化学反应所造成的。随后，学术界为了证明该结论是个错误总共用了 9 年时间（1984 ~ 1993 年）！目前地球系统学科所公认的预测气候变化的重点在于气候模拟，而气候模拟的发展离不开古气候学的验证。由此，地球科学家为了预测未来的气候变化趋势，将主要研究兴趣转向了全球气候系统在过去的演变特征和发生机制。

自然规律——冰与火之歌

目前国际上公认过去的气候变化中存在冰期—间冰期旋回。在古气候变化研究中，南斯拉夫学者米兰科维奇提出的“冰期旋回”——北半球高纬度夏季太阳辐射变化是驱动第四纪冰期旋回的主因的理论不断被人们所验证，并在很长的

一段时间内被奉为圭臬。现在，科学家在研究过去的气候变化中，通过高分辨率记录的比较研究发现，南极冰盖中二氧化碳浓度的变化早于北极，中低纬度的气候变化也早于北半球高纬度区域，这些都直接向米兰科维奇理论提出的北半球高纬度控制全球气候变化的传统认识提出了挑战。种种迹象表明，在米兰科维奇的“天文驱动”与实际气候变化之间，有着被遗漏的环节，而这就是热带驱动和碳循环。

说起热带驱动和碳循环就不得不提两者的重要载体——海洋。海洋占地球表面积 70.8%，是地球系统的巨大储库之一。通过热量交换、水气传输、洋流活动和生物地球化学循环等过程，海洋在气候系统中扮演着极其重要的角色，是地球生命赖以生存的基础。海洋沉积物的连续沉积和丰富的生物化石，为我们提供了反演过去环境变化信息的研究材料，打开了研究地球系统历史演变的大门。科学家最新研究发现了热带驱动和碳循环的驱动因素之一——低纬度西太平洋席状硅藻的勃发和迅速埋藏，这类纹层沉积物在第四纪重大气候突变发生时，在世界各个大洋都有分布，并与同期的碳同位素正偏移事件对应良好，这让我们进一步了解了冰期旋回中的热带驱动机制和碳循环过程。

不断接近的真相——碳从哪里来？

目前，全球范围内关于气候变化相关的研究正在如火如荼地进行着，这些研究似乎就要揭开气候变化机制的神秘面纱。不过，正如前面所提到的，海洋在气候系统调节中具有重要作用。海洋作为地球最大的碳库，储存量是大气圈的 50 倍，陆地圈的 20 倍。现在全球各大洋每年从大气吸收约 20 亿吨二氧化碳，占每年全球二氧化碳排

放量的三分之一左右，是现代大气二氧化碳巨大的汇。值得一提的是，海洋内部的流通性变化深刻影响着海洋碳库在“源”和“汇”之间的转变，其内部流通可以分为三个部分：温跃层所在的上层海洋；温盐层所在的深海；将二者分开的是主要来自南半球并渗透到三大洋（太平洋、印度洋和大西洋）的中层水；而为这一中层水提供一半水源的就是南大洋。

“南大洋”这个词汇大约出现在本世纪初的2000年，它是世界上第五个被确定的大洋，是唯一完全环绕地球却未被大陆分割的大洋，也是围绕南极洲的海洋，有着重要的不同于太平洋、印度洋和大西洋的洋流——南极绕极流。南极绕极流是南大洋最重要的洋流系统，也是唯一环绕地球一周的海洋环流。它从西向东流动，贯穿大西洋、印度洋和太平洋的南部扇区，为各个大洋之间的水交换、热量交换和盐量交换做出了重要贡献。因此，南极绕极流的输运变化会在一定的时间尺度上影响地球的气候系统。科学家根据近十年的研究发现，由于南大洋的洋流系统，使得其底层水流通性对大气二氧化碳浓度变化有着密切的关联。因此，越来越多的科学家选择南大洋作为研究区域。

如今，古海洋学家和古气候学家们相信，冰期时南大洋深层水是一个巨大的储库，其中储存的二氧化碳会在其流通性增强的时候，通过遍布全球且来源于南大洋的上升洋流向大气释放。随着冰消期时南大洋冰盖消融，冰融水的注入与西风带的增强使南大洋底层水的垂直流通性增加，使冰期时储存在绕极深层水中的大量二氧化碳通过增强的上升流释放出来，这一过程促进了深海和大气中二氧化碳的交换，使大气中二氧化碳浓度升高，全球温室效应增强。

作为该理论的证据之一，科学家在受南极中层水补充的赤道东太平洋表层水中发现了碳十四贫化的溶解无机碳。对这一现象很好的解释是，由于冰期南大洋流通性变弱使得表层水体与底层

水体的交换变弱，导致底层水体中的碳十四很难得到表层水体碳十四的补充，因而冰期时底层水的碳十四不断衰变，从而积累了大量碳十四贫化的溶解无机碳。而在冰消期时，随着南大洋垂向流通性的增强，通过南极中层水到达赤道太平洋，所以冰消期开始时赤道东太平洋表层水中的大量二氧化碳来自于南大洋，是由于南大洋水体流通性增强所致。

现代数值模拟和观测结果也都验证了末次冰消期以来南大洋深层水流通性增强和二氧化碳变化之间的关系。利用现代Argo观测数据和细尺度参数化方法所计算出的南大洋底层水体流通性表明，现代南大洋底层水流通性很快，多个湍流混合使得南大洋上升流增强，在南大洋的中性密度面上垂向混合率比开阔大洋还要高一个量级。在这样一个强水体垂向上混合速率情况下，储存二氧化碳的能力极低。这一推算结果也佐证了末次冰消期以来，导致全球气候变暖增加的二氧化碳来源于冰期南大洋底层水碳库的假说。

结束语

如前所说，海洋在不同的地质历史时期不断地在二氧化碳的“源”和“汇”中转变角色，且不同地区的海洋均会在这一过程中扮演重要角色，各种关于海—气相互作用的假说百家争鸣。而南大洋深层水流通性对大气二氧化碳浓度的影响这一假说在近几年开始崭露头角，基于这一假说而进行的科学研究正如同春天的田野一样勃勃生机。限于篇幅，本文只介绍了学术界关于冰消期南大洋流通性变化与大气二氧化碳浓度变化的假说中认可程度比较高的一个，即冰盖后退→西风带风力变强→增强的上升流→大气中二氧化碳浓度升高→全球气温升高→冰盖继续后退。关于该正反馈停止的温度最大阈值和大气中二氧化碳浓度最大阈值方面的研究至今还没有定论。希望通过本文，可以在提升大家对全球变化关注度的同时，也能让大家了解全球气候变化驱动力的多样性。

本文作者系国家海洋局第一海洋研究所研究员



“给我半油轮的铁，还你一个冰河世纪” ——研究南极“生物泵”

文、图 / 潘建明

我们的数次南极科学考察，都是搭乘“雪龙”号科学考察船进行的。“雪龙”号从上海出发，一路向南，半路经停外港进行补给，澳大利亚西部城市珀斯的弗里曼特尔港是“雪龙”号停靠最多的地方。再向南走，我们就要做好应对各种困难的心理准备，在经过南纬 40 ~ 60 度的南大洋时，晕船的人要过第一道难关，因为这里存在着浪高风急，常年有气旋的西风带。同时，南大洋

也是我们进行海洋调查研究的地点。联合国教科文组织下属的政府间海洋学委员会将南大洋定义为：“从南极大陆到南纬 40 度为止的海域，或从南极大陆到亚热带辐合线明显时的连续海域”。因此，被称为世界第五大洋的南大洋实际上为大西洋、太平洋和印度洋的延伸，将南极洲围绕起来，面积约 3800 万平方公里。这里多风暴且易结冰，冬季由于极低的温度使得海水结冰，冰盖、



冰架、海冰与海洋之间的相互作用，形成了一个复杂的系统，这也是南极地区影响全球气候变化的关键所在。

航行过了西风带，我们逐渐接近南极大陆，考察队员们开始竞猜最早看到冰山的地方。南极夏季冰雪开始融化，冰山受风和洋流的作用向北移动，最远可以漂到南纬 50 多度。尽管夏季这片区域的冰雪开始融化，我们开展工作的大洋作业区还是布满浮冰，这对考察队员来说是十分危险的。因此，科考船通常先挺进冰区，接近中国南极科学考察站（中山站或长城站），将部分科考队员送上站，同时对考察站进行物资补给，这

是整个考察队工作中一项重要而艰巨的任务。“雪龙”号最初的设计并不是专门用于极地作业，因此其破冰能力一般。在冰层较厚的海区，一天破冰也就几百米，只能通过直升机或者雪地车完成卸货任务。

卸完物资，浮冰也少了很多，我们的海洋调查工作才会全面展开。海洋调查主要侧重于海洋物理、地质、生物和化学四大学科。我所从事的海洋化学工作，主要目标是了解南大洋生源要素的生物地球化学过程，这涉及南大洋的微量元素行为、南极海冰与生态系统、碳与生物泵等国际上的研究热点。2015 ~ 2016 年中国第 32 次南极科学考察的工作区域是南极半岛和普里兹湾海域，科学家要在这片区域同时开展大气、海水、雪、沉积物和生物样品等采集工作，还要布放多套锚系观测设备和沉积物捕获器。由于船载能力和船时的限制，我们人数有限，整个航程的科研工作十分紧张，一旦工作就是夜以继日，24 小时连轴转，十分辛苦。

由于极地艰苦的条件以及恶劣的工作环境，极地海洋工作相较于其他区域异常艰辛，几十年来正是极地海洋“碳循环”这一关键问题吸引着我们坚持进行着大量的工作。近年来，在国家极地专项的资助下，我们联合了海洋一所、海洋三所和厦门大学等国内一些很早就从事极地研究的单位，从大气、海水、海水颗粒物、浮游生物和沉积物等各介质中分析各形态碳的含量与分布，并研究其迁移转化过程及规律。其中，南极水体中悬浮颗粒物和沉降颗粒物的生源要素（碳、氮、



硅等)是我们的工作重点,研究生物固定大气中的二氧化碳,并向深海沉降埋藏这一系列过程是我们的研究主线。

在海洋上层,由于光照和营养盐的供给,浮游植物可以进行光合作用,吸收固定大气中的二氧化碳,合成有机质并向深海输送,同时消耗营养盐,这个过程被称为“生物泵”。我们的研究数据显示,相对于南大洋较低的叶绿素 a 含量,南极上层海水中仍拥有充足的营养物质,这表明南大洋在吸收大气二氧化碳方面具有相当大的潜力。为什么会存在高营养盐低叶绿素的现象?著名海洋科学家约翰·马丁(John Martin)的“铁限制”假说认为:铁是限制南大洋浮游植物初级生产的关键因子。“给我半油轮的铁,我会还你一个冰河世纪”,约翰开玩笑说。

目前,南大洋大部分海域缺铁的假说已经得到普遍的认可。与南大洋其他海域不同的是,南极几个较大的边缘海——罗斯海、威德尔海和普里兹湾——似乎并不受缺铁的影响,在南半球的夏季,它们的初级生产力很高。作为食物链底端、南极生态系统基础环节的硅藻,是初级生产力的主要贡献者,对于整个南大洋的生态系统意义非凡。由于浮游植物的旺发区集中在这些边缘海,因此,磷虾、企鹅和鲸类等高营养级生物的分布及活动也具有很强的地域性。边缘海海冰的季节性消长和年际性变化对海洋生态系统有重要的影响。自 20 世纪 70 年代对海冰进行遥感观测以来,科学家发现南极的海冰变化具有非常强的区域特



现场科考人员布放沉积物捕获器

征。我国长城站所处的南极半岛附近海域,是整个南半球增温和海冰锐减最为显著的地方。人们认为海冰的减少会显著影响铁的输入,并且会进一步影响初级生产力以及浮游植物的群落结构。由于增温和海冰减少,浮游植物群落优势种由大型的硅藻转变为微型和微微型的藻类,以硅藻为食的磷虾产量随之减少。科学家长期观察发现,自 20 世纪 70 年代开始,企鹅数量锐减,这与磷虾数量的减少是密不可分的。尤其是南极最常见的阿德利企鹅,其活动范围会随着海冰边缘线而改变,而海冰范围的缩小会直接影响其捕食的范围,进一步压缩这些企鹅的生存空间。

简单而脆弱的生态系统很容易遭受破损,而与之息息相关的“生物泵”也将随之变化。例如,磷虾数量的减少,与其竞争的海樽(一种滤食性浮游动物)数量会增加;海樽的粪球通常在下沉过程中不易降解,从而具有非常高的“生物泵”效率;但是,这种特性会导致上层海洋物质循环的过程减弱,从而可能会对整个生态系统造成不可逆的负面影响。再如,南极鲸类会在海洋中层进行捕食,回到海洋上层排便,它们的粪便富含大量生物可利用的铁,刺激海洋上层的初级生产,从而提高“生物泵”效率;同时,这种下层生物觅食上层生物排泄物的行为又会将下层的碳重新带回到海洋上层来,对“生物泵”产生负反馈。

上述现象给了我们一个很重要的启示,即“物质基础”决定“上层建筑”,营养物质的供给会直接影响整个生态系统的变动。另外,国际上对南极的研究很大程度上也是围绕全球气候变化与南极的关系开展的,而“碳”一直是研究全球变化的关键所在。“生物泵”将碳从大气中有效清除的时间尺度可达千年,因此,“生物泵”在一定程度上有效地调节了大气中的二氧化碳浓度。如果南大洋能够从大气中吸收并贮存足够多的二氧化碳,将有助于缓解全球大气二氧化碳浓度的快速升高。因此,从气候变化和物质循环,特别是碳的角度来研究海洋的变化,是开展南极长期观测和研究的重点。

南极普里兹湾是我国最早的科考区域之一,



南极中山站

也是由中国科学家牵头的大型南极考察与研究计划——PANDA 计划——的重点研究海区。这个海域在南极夏季是浮游植物的旺发区，尤其是在湾内东侧的冰间湖区域。因此，我们选择在这个地方进行长期观测，通过布放沉积物捕获器收集一整年的样品，在下一年将其回收，并带回国内实验室进行分析。通过这种年复一年的连续采样，就可以原位获取长时间序列的碳沉降通量，结合“雪龙”号搭载的 CTD 采水系统进行的大断面海洋调查观测，将帮助我们发现南极普里兹湾碳通量与海冰、浮游生物等的相互关联，探索南极的碳吸收能力在全球变化的背景下有着怎样的响应与反馈。

这样的观测与研究依赖于大量海洋仪器设备的投入与使用。尤其是在南极这种极端气候条件下，一到冬天，海面结冰，无法进行现场调查，因而布设沉积物捕获器可以获取十分宝贵的长时间序列样品和数据，是研究南极海域“生物泵”变化过程的主要方式。中国、美国、澳大利亚和韩国等国在南大洋很多海域均布放此设备以观测南大洋的“生物泵”过程。南大洋冰山众多，对现场的仪器设备安全造成了无法预估的潜在危险。一座水面上高度为 50 米的大冰山，其水下部分可能深达 450 米甚至更多（冰山的水上水下比例往往是 1:9）。从事南极罗斯海研究的美国科学家沃克·史密斯（Walker Smith）在跟我们交流时曾提到，2002 年他的研究团队在罗斯海丢失了一套价值 100 万美元的观测系统。我们团队也曾丢失过一套价值不菲的观测系统，让我们心

痛不已。这也从侧面表明在南极进行科考，风险是巨大的，数据资料是来之不易且极其宝贵的。

通过分析沉积物捕获器样品中的各种要素，我们认识到浮游植物群落结构、浮游动物捕食和微生物降解等多种因素会影响南极“生物泵”的过程和效率。研究发现，南极海冰在消融时会向水体中释放大量的冰藻（生长在海冰底部的硅藻），这会导致两种结果：一方面，冰藻会向海水中播种，为夏季浮游植物生长提供藻种；另一方面，这种大型冰藻会快速地聚集并包裹大量的冰筏碎屑，增加其密度以便快速沉降至海洋深处。同时，海冰在消融后也会通过冰筏碎屑向海水中释放出一些生物可利用的铁，这也会为夏季浮游植物的生长提供物质条件。冰藻下沉对南极“生物泵”的贡献是最直接的，但由于目前对南极“生物泵”的估算主要是通过遥感手段进行，受目前技术所限，生长在海冰底部的冰藻通常无法被观测到。海冰冻结时，水体中浮游植物又会受到光照等因素影响，向海冰底部聚集并形成新的冰藻，而这时候南极“生物泵”的效率会由于初级生产的减弱而开始下降，从而固碳效应也随之减弱。

我们虽然已经做了大量工作，但目前仍有一些问题没搞清楚，如海冰融化会在何种程度上影响整个生态系统的变迁，食物链底端的初级生产者、浮游动物、大型游泳动物将受到怎样的影响，等等。这些问题有待于我们在今后的研究中逐一解决。

本文作者系国家海洋局第二海洋研究所研究员

南大洋里的“湖”

文、图 / 史久新

海里怎么会有湖？之所以出现看起来如此怪异的题目，根源在于科学术语的译名。这个“湖”指的是冰间湖，它被海冰环绕的无冰水域。想象一下，呈现在茫茫白色海冰中的一片波光粼粼的水面，与我们在冬季一场大雪之后所看到的尚未封冻的湖面，是不是很有几分相似呢？如此看来，中文的译名还是非常形象的。英文的冰间湖是 polynya，源自俄语 полынья，最初是指自然形成的冰洞，后来被 19 世纪的极地探险家用来

指代冰封海洋中可以通航的区域。类似的专业术语还有 lead，用于极地海洋时指的不是一种金属，而是冰间水道。这一名词也来自于航行在北极的探险者，那些由于海冰裂开而形成的狭窄水道指引着他们深入未知的北冰洋腹地。

“冰间湖”这个名词对于从事极地海洋研究的人员来说已是耳熟能详了。我第一次感觉这个译名有点问题，起因于极地考察办公室科研处王



勇处长的一次提问，他想知道冰间湖的底在哪里。他把我问住了，因为之前还真没有想到这样的问题。冰间湖并没有普通湖那样从湖边缘到湖中心逐渐加深的湖底，它只是从海面上看到的现象。不只冰间湖里有水，湖岸（海冰）下也是海水，而且这些水是完全连通的。其实，无冰的冰间湖与海冰覆盖下的海洋有一个共同的底——海底。在南极还有一种特殊的湖——冰下湖，是压在厚达千米的冰川下的水体。冰川下出现一个湖，似乎比海里出现一个湖更令人难以置信。但是，冰下湖确实确实存在。虽然我们看不到冰下湖的波光粼粼，但它确实与陆地上其他的湖一样，有一个属于自己的坚实湖底。

不是所有的冰间水面都叫作冰间湖。只有在达到使海水冻结的天气条件下，仍然保持无冰或仅被薄冰覆盖的宽阔水域，才叫冰间湖。这是一个相对严格的定义，但是很有必要。不然，在春暖冰化的时候，满眼都是冰间湖了。从这个定义看来，冰间湖还真是一个怪异的现象。本来应该结冰的，为什么偏偏不结冰呢？原因有两个：水太暖了或者冰都跑了。

纵然天寒地冻，深深的海洋下面仍可能有充足的暖水供应。如果有大量的下层暖水涌上海面，即使气温降低到零下一二十摄氏度，表层海水的温度仍然能够维持在冰点以上，因而海面并不冻





作者在埃默里冰架前缘海域，从直升机上空投 XCTD



作者在海豹洞口向下投放 CTD 开展观测 摄影 / 葛人峰

结。由于海洋下层热量向上传输而形成的冰间湖，被称为感热型冰间湖。

南大洋的深层水源自北大西洋，它们万里迢迢来到南极，经过复杂的变化成为绕极深层水。在咆哮西风带形成的强大埃克曼泵吸作用下，绕极深层水在南极周边海域从两三千米的深层向上涌升至距水面一二百米。这些远道而来的大西洋水温度不过一二摄氏度，但已经比海冰的冰点高了三四摄氏度，在某些适合的位置和时机可以升到海面，利于冰间湖的形成。不过，这样的机会并不多。最著名的感热型冰间湖是威德尔冰间湖。迄今为止，人类只在 1974 ~ 1976 年连续三个冬季观测到了威德尔冰间湖。那时还没有常规的海冰卫星监测，业务化发布的卫星遥感海面密集度数据是从 1978 年才开始的。也是机缘巧合，刚有了试验性地从太空遥感海面的机会，就捕捉到了这样一个最大的感热冰间湖。奇怪的是，在此之后，虽然有超过 30 年的连续卫星遥感海冰监测，威德尔冰间湖却再也没有出现过。目前，科学家仍在探索其中的缘由。

另外一种类型的冰间湖多出现在南极沿岸海域。从南极大陆顺坡而下的强烈下降风将海冰吹离海岸，形成了无冰水域。这里并不是没有海冰形成，而是海冰形成后不能留在原地。这类冰间湖常被称为“ice factory（制冰厂）”。如果翻译为“冰工厂”，虽然不准确，但是更有趣一些。

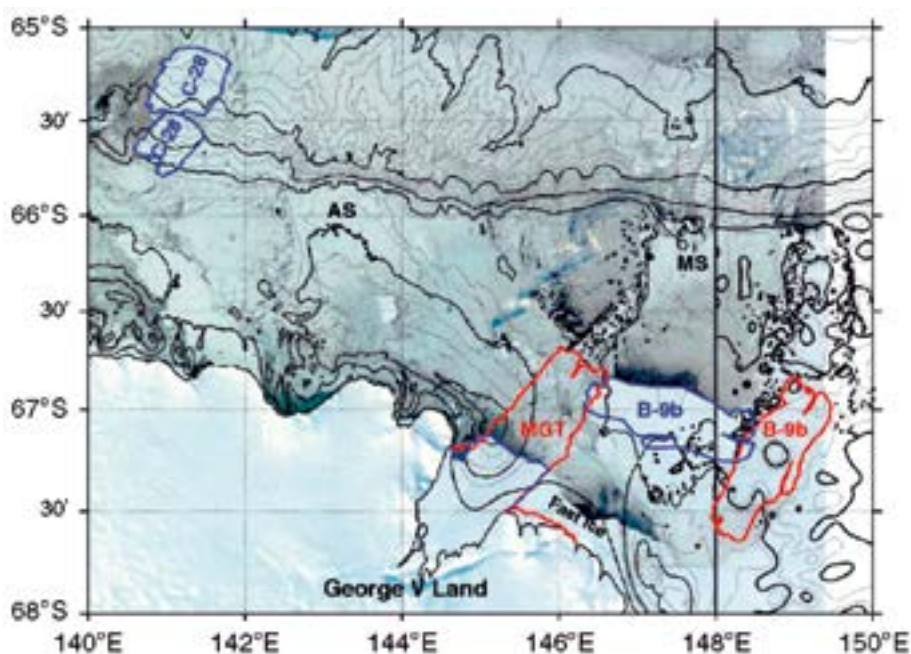
学界以往将这类冰间湖称为潜热型冰间湖，认为是结冰释放的潜热维持了无冰水域的存在。实际上，结冰的潜热是被动吸取，而不是主动释放的。潜热型冰间湖无冰的根本原因在于海冰的外输多是由风力驱动造成的，因而现在多称为风生冰间湖。个别由于海流造成海冰外输而形成的冰间湖，称为流生冰间湖。总之，这类冰间湖是由动力驱动的，而前面所说的感热型冰间湖是由热力驱动的。风生冰间湖多出现在沿岸海域，因为除了风力驱动之外，还需要有一个阻挡周围区域海冰补充进来的障碍物。在南极，这个固定不动的障碍物除了通常的海岸，还有深入海洋的冰架和搁浅的冰山。它们都源自陆地冰川，进入海洋后成为海上的庞然大物。从海岸开始冻结形成

的海冰，最终成为固定不动的沿岸固定冰。从海岸向外海伸出的冰舌也可以成为阻挡浮冰的障碍物，在其下风处形成冰间湖。这类冰间湖的“岸”全是海冰了。从南极沿岸冰间湖的分布图上看，冰间湖多出现在突出的海岸或冰舌（冰架或固定冰）的西侧。这是由于南极沿岸盛行偏东风，这些障碍物的西侧就是东风的下风处。在南半球的隆冬季节（9月），南大洋会形成几乎与南极洲一样大的海冰覆盖区，海冰的外缘线推进到南纬50度，最大冰厚接近2米。而在这片冰区最南端的南极沿岸却有大大小小的冰间湖暴露着，也是有点不可思议吧！

海冰的含盐量很低，新冰约为百分之一，而海水的盐度相当于百分之三，多余的盐分就被留在冰下的海水中。因此，风生冰间湖中大规模的结冰过程也是海洋大规模增盐的过程。增加的盐分使海水的密度增大，这些海水本来就已经因为降温具有较大的密度。在降温与增盐的共同作用之下，南极沿岸冰间湖中产生了陆架上密度最大的海水，被称为高盐陆架水。高盐陆架水在陆架上累积，最终从陆架坡折溢出沿着陆坡下滑，遇到上涌的更高盐度的绕极深层水。相对低温低盐

的陆架水与相对高温高盐的绕极深层水发生混合增密，形成密集度最大的海水之一——南极底层水——并继续向北流动，几乎遍布世界大洋的底层。前面提到绕极深层水在南大洋的涌升是由于西风的上拉，属于风生环流过程；而作为全球大洋输送带另一引擎的南极底层水下沉主要是由南极沿岸冰间湖中的结冰析盐过程驱动的，属于热盐环流过程。从这一点上来看，远在南极的冰间湖对全球气候变化也有着重要的影响。

目前已确认的5个南极底层水源地均有大型的冰间湖。其中，默茨冰川舌西侧的冰间湖最近几年还经历了一番变故，因而格外受到关注。2010年之前的默茨冰川舌宽30多公里，从海岸突出长达100多公里。冬季，在其外面还会发展出一段更长的固定冰。冰川舌与固定冰一起构成的“冰堤坝”阻挡了来自东侧的浮冰流，在其西侧形成一个面积广阔冰间湖，使这里成为当时产量排名第二的南极底层水源地。2010年2月，在冰川舌东侧已经搁浅了近20年的冰山（编号为B-9b）突然启动，撞断冰川舌而出，形成一座浮在海上的新冰山（编号为C-28），很快就漂走了。这一事件使这里不再具备形成大型冰间湖的阻碍



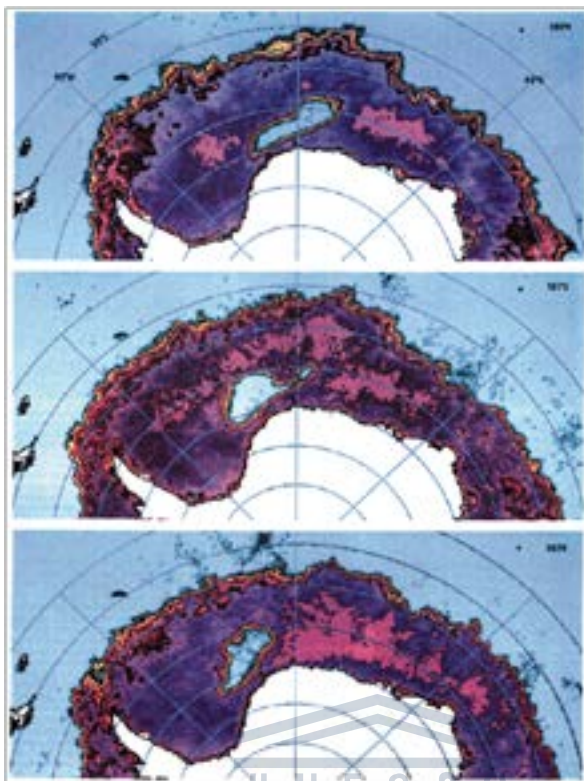
默茨冰川舌断裂后的卫星遥感 MODIS 图（2010 年 4 月 22 日）。蓝色线标出了编号为 B-9B 和 C-28 的冰山。红色线为默茨冰川舌（MGT）和冰山（B-9b）之前的形状和位置（引自：Kusahara 等，2011）。绿色五边形为“雪龙”号被困位置。

存在过冷却现象,说明冰间湖中有大规模的结冰过程。

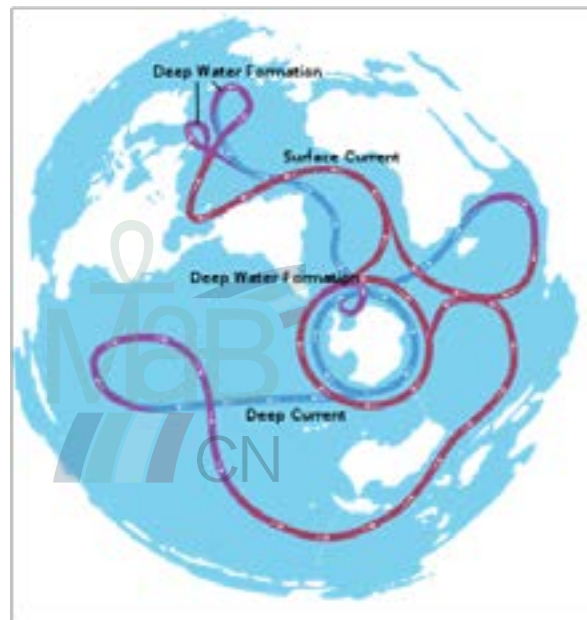
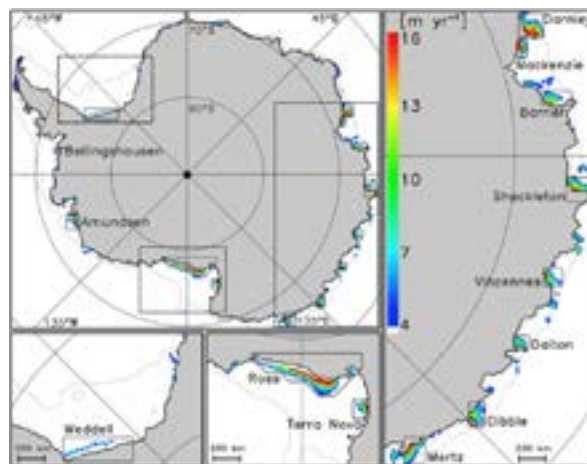
A map of the Ross Sea region in Antarctica. The map shows the coastline of Antarctica at the bottom and the Ross Sea to the north. Key features include:

- Ice Shelves:** The Filchner-Ronne Ice Shelf (labeled 'FIR') is shown in the center, and the Ross Ice Shelf is to the north.
- Icebergs:** Numerous icebergs are marked with letters (A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z) and numbers (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100).
- Geographical Features:** 'Tongue' (a narrow ice extension), 'Buttress' (a large ice shelf extension), 'Finger' (a narrow ice extension), 'Pinnonomy' (a narrow ice extension), and 'Wedge' (a narrow ice extension) are labeled.
- Other Labels:** 'Katabatic Winds' (wind patterns), 'Ninnis Glacier' (a glacier), 'GB' (Greenland Bay), 'CB' (Cape Barrow), 'WB' (Weddell Bay), 'FI' (Filchner Ice), 'B93' (a specific ice feature), 'MOT' (a specific ice feature), 'T' (a specific ice feature), 'S' (a specific ice feature), 'A' (a specific ice feature), 'B' (a specific ice feature), 'C' (a specific ice feature), 'D' (a specific ice feature), 'E' (a specific ice feature), 'F' (a specific ice feature), 'G' (a specific ice feature), 'H' (a specific ice feature), 'I' (a specific ice feature), 'J' (a specific ice feature), 'K' (a specific ice feature), 'L' (a specific ice feature), 'M' (a specific ice feature), 'N' (a specific ice feature), 'O' (a specific ice feature), 'P' (a specific ice feature), 'Q' (a specific ice feature), 'R' (a specific ice feature), 'S' (a specific ice feature), 'T' (a specific ice feature), 'U' (a specific ice feature), 'V' (a specific ice feature), 'W' (a specific ice feature), 'X' (a specific ice feature), 'Y' (a specific ice feature), 'Z' (a specific ice feature).
- Coordinates:** The map includes latitude and longitude lines, with labels such as 140°E, 144°E, 148°E, 66°S, 67°S, and 68°S.

由于冰间湖主要出现在冬季，目前的观测以卫星遥感为主。由于南极的冬季是极夜，不能用可见光遥感，只能用微波遥感，因而现有的冰间湖研究多局限于形态学的描述，冰间湖中的实测数据还是非常难得的。我们曾经尝试用直升机空投抛弃式温盐深仪的方式，对冰间湖中的海水温度和盐度进行观测。2007年12月，我们在埃默里冰架前缘水域进行了试验。2008年12月，我们又从停泊在中山站附近的“雪龙”号出发，飞往埃默里冰架前缘西侧海域。这里还残存着被海冰包围的冰间湖。我们向冰间湖中投放了3枚温盐深仪，获得了冰间湖中的实测数据。对数据的分析发现，此时冰间湖的表面温度略低于冰点，



卫星遥感的威德尔冰间湖（被紫色包围的蓝色部分）（左图）
估算的每年南极冰间湖产冰率，即累积海冰厚度（右上图）
以南极为中心绘制的全球大洋输送带示意图（右下图）



冬季冰间湖中的海量观测数据，为冰间湖研究提供了第一手资料。

从海豹佩戴的温盐深仪提供的数据来看，海豹经常下潜到数百米深的水下，有时甚至超过1000米，其深潜能力真是超乎人们的想象。不过，作为哺乳动物，它们还是需要回到水面换气。对于这一点，在南极的一段经历让我有了形象且深刻的认识。2007年12月，我随中国第24次南极考察队到达中山站附近海域。“雪龙”号停在沿岸固定冰上执行卸货补给任务，我们大洋队的几个队员非常想借此机会进行海洋观测，但是固定冰一望无际，没有可以下放观测仪器的地方。后来听说冰上有一个天然的冰洞，我们就带着仪器去了。冰洞直径大概1米，很适合下放仪器。于是，我们就兴高采烈地行动起来，并决定每隔两小时观测一次。但是第二次放下设备之后，突然发现洞里有东西在翻动。走近一看，竟然是一头不大的海豹。我们这才意识到，这个洞其实是

海豹的换气孔。看着洞里憨态可掬的海豹，我们真的很担心这个顽皮的家伙会把我们悬挂仪器的缆绳咬断。后来我了解到，这个深达1米的冰洞是海豹用牙齿啃出来的。比较而言，生活在冰间湖的海豹真是幸福多了。

由于冰间湖与突出的海岸和冰舌等特殊岸线形状有关，大多数冰间湖每年会在特定地点出现，这些区域成为哺乳动物和鸟类的越冬地。研究表明，90%以上阿德利企鹅的栖息地靠近冰间湖。在极夜结束后的春季，无冰或薄冰的海面可以使更多的太阳辐射进入水下，冰间湖成为最早出现水华的区域，率先建立起海洋食物链的基础。寒冬过去后，冰间湖区域成为了南大洋生态系统中最最为兴盛的部分。

本文作者系中国海洋大学海洋与大气学院教授



文、图 / 史久新

潜标是一种常用的海洋观测装置：用缆绳将各种观测仪器连接起来，上端配上浮球，下端连接释放器和重物，投放到海里，就构成了一套潜标。潜标下端由重物固定在海底，缆绳在浮球的浮力作用下保持竖直状态，上面的仪器在海洋的不同深度进行观测或取样。潜标放置一年后，科学家可以从海面发送信号，将释放器打开，仪器在浮球的牵引下升到海面。科研人员回收仪器后可以读取数据或采集样品，得到一年的完整记录。可是，如此便捷的观测方式在南极却遇到了挑战，主要原因在于漂移的冰山可能会撞到潜标，将潜标拖走或拽断。中国南极考察队从 2010 年开始在中山站所在的普里兹湾进行潜标观测。为了防

备冰山带来的损坏，我们将潜标最上端的浮球设计在 200 米深度。第一年布放的一套潜标得以成功回收，但第二年布放的四套潜标中却有两套再也没有找到，很可能是被冰山撞坏或拖走了。

当然，我们可以将潜标藏得更深一些，但是这样一来就无法对上层海洋进行监测了。为了解决这个问题，我们设计了一种破断器，拉力超过 300 公斤时就会被拉断。潜标最上面的浮球在 100 米深度，破断器在 300 米深度，两者之间的缆绳上放置了观测仪器。当这部分被冰山拉住时，破断器将断开缆绳，使下面的潜标部分得以保全。2014 年 2 月，我们将这套潜标布放到了普里兹

湾的东部。一年之后，我们只回收到这套潜标的下半部分。读取数据后，我们发现温盐深仪(CTD)的压强数据在2014年4月10日和15日分别有一段时间的高频不规则抖动，沉积物捕获器倾角记录显示这两天的倾角分别为 7.1° 和 7.9° ，而在其他时间的倾角不超过 1° 。由此我们推测潜标在这两天受到了冰山的拖挂。4月10日，潜标在不到一天的时间内脱离了冰山；而在4月15日，经过接近1天的较强牵引，破断器被拉断，潜标的上半部分被冰山拖走，而下半部分得以保留。如果真是这样的话，说明破断装置发挥了预先设计的功能，起到了保护潜标主体的作用。

从南极回国后，我们从美国杨百翰大学的网站上下载了冰山轨迹数据。发现在2014年4月，确实有一座大冰山从我们的潜标位置经过。这座编号为C28B的冰山曾经于2013年10月向南转入普里兹湾，在湾口的一处名为“四女士”的浅滩上几经搁浅。我们在2014年2月布放潜标时，它已经越过浅滩，然后，曲曲折折地漂向我们的潜标。

C28B这个冰山编号，对于我们而言，有种似曾相识的感觉。果然，逆着冰山的漂移轨迹，我们一路向东找，最终找到了它的老家——远在3000多公里之外的默茨冰川舌。原来，C28B冰山就是默茨冰川舌于2010年2月被撞断后形成的两块大冰山中的一块。

这个发现让我们不禁感慨，默茨冰川舌与中国第30次南极科学考察真是有缘分！让我们按

照时间顺序把这个故事梳理一下：2013年岁末，执行中国第30次南极科学考察任务的“雪龙”号正航行在中山站至长城站航线的澳大利亚以南航段，途中为了营救俄罗斯客轮，改道驶向南极的迪维尔海，不料自己却被海冰所困。“雪龙”号被困的海域在2010年之前的夏季是没有海冰的，正是阻挡冰流的默茨冰川舌断裂才造成了这里海冰增多。“雪龙”号解困后，于2014年2月返回中山站所在的普里兹湾布放潜标。从默茨冰川舌断裂下来的C28B冰山基本上沿着陆坡向西漂移，在向普里兹湾的路途中走了一半的时候搁浅了，2013年初才重新启动，10月到达普里兹湾口，之后鬼使神差地转向南，走走停停地用半年时间跨过浅滩，进入湾内。我们布放潜标的时候，C28B冰山已经漂到潜标位置的东偏北方向约300公里的地方。布放潜标之后，C28B冰山迂回曲折地向西移动，不到两个月的时间就移到了潜标上方，将其“斩首”。看着冰山的漂移轨迹，我们真是觉得有点不可思议，这座冰山好像是专门漂洋过海来撞潜标的。虽然C28B冰山长度超过30公里，但是在茫茫大海上，能撞上潜标的概率也是很小的！

幸亏有了卫星遥感冰山轨迹数据，我们即使没有亲临现场，也能够追踪到伤害潜标的“凶手”。世界上最著名的冰山“凶手”，应该是撞沉泰坦尼克号的那座冰山。那场导致1514人丧生的惨剧发生后，对冰山的监测受到重视并逐步加强，从最初的船舶报告，到20世纪中期的飞机巡视，进一步发展到现在的卫星遥感和数值预报。从1978年起，美国国家冰中心开始发布南



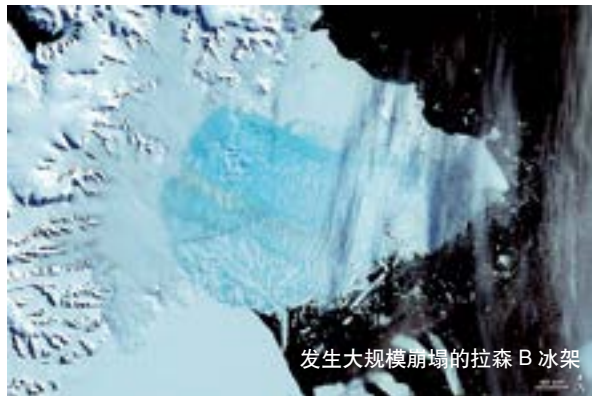
潜标的浮球 摄影 / 张建松



布放潜标工作场景 摄影 / 张建松

极冰山信息，对长度超过 10 海里的大冰山进行编号和追踪。每一座冰山有一个固定的编号，编号的第一个字母表示最初发现冰山的经度区间，A 为 $0^{\circ} \sim 90^{\circ} \text{W}$ ，B 为 $90^{\circ} \text{W} \sim 180^{\circ}$ ，以此类推；后面的两位数字表示在此区间中发现的冰山序号。如果该冰山后来发生进一步的分裂，就在编号的最后加上一个从 A 开始的字母。因此，C28B 就是在 $180^{\circ} \sim 90^{\circ} \text{E}$ 发现的第 28 座大冰山分裂出来的第二座大冰山。随着技术的进步，自 2016 年开始，美国国家冰中心所发布的冰山的最小尺度降到了 20 平方海里。这样，在 2016 年 1 月发布的信息中又增加了 17 座冰山。从已有的南极大冰山漂移轨迹来看，大多数冰山集中在近岸海域。除了威德尔海之外，冰山从南极大陆周边的冰架上脱落入海后，绝大多数沿着陆坡向西漂移。由于冰山的大部分沉在水下，冰山的漂移主要受海流的影响，这些大冰山是随着南极沿岸流或陆坡流向西移动的，有时会在较浅的陆架上搁浅很长时间。大冰山离开南极近海进入低纬度大洋仅限于罗斯海、普里兹湾和威德尔海的外海，在这三个凹进的海湾中形成了大型的亚极地流涡，经度线方向的流动成为大冰山向北移动的驱动力。威德尔海的大冰山北移最为显著，这也有南极半岛的阻挡作用。

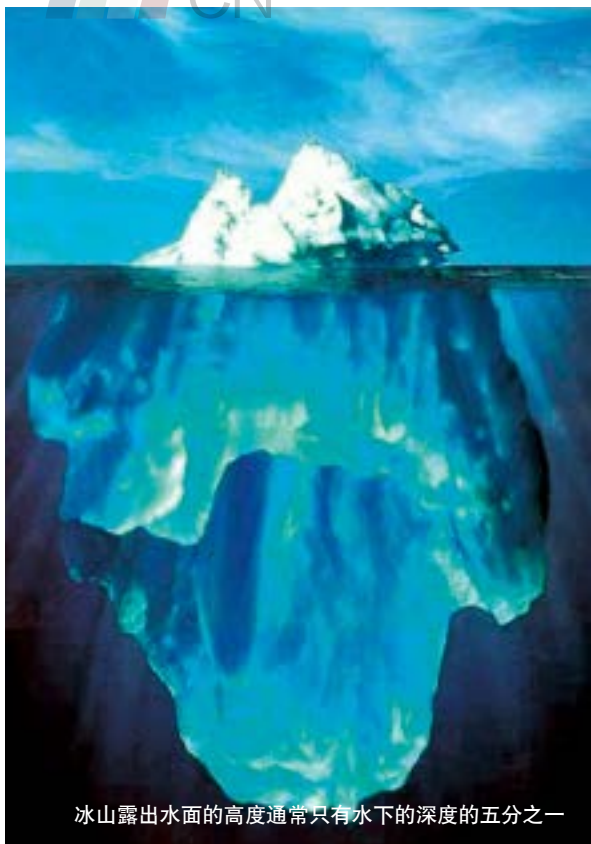
实际上，在南极海域经常见到的是数量难以统计的小冰山。但是这些小冰山同样对船舶构成极大威胁。撞沉泰坦尼克号的冰山不过 125 米长，高出水面十几米。由于冰山露出水面的高度通常只有水下深度的五分之一，所以估算下来这座小冰山的质量高达 200 万吨，真是一个庞然大物。冰山来自于陆地冰川，大多是从延伸入海的冰架或沿岸的冰墙上崩塌下来的。近几十年以来，随着气候变暖，冰架的稳定性减弱，崩塌加剧，冰山的数量有所增加。2002 年 1 月 30 日开始，在短短的 5 周内，南极拉森 B 冰架近四分之一的部分（约 3250 平方公里）发生破碎，彻底离开了曾经与之相连的陆地，在南极半岛东侧的威德尔海中形成了数千座冰山。对于这些小型冰山，虽然可以利用高度计数据进行统计，也可以在高分



发生大规模崩塌的拉森 B 冰架



客轮在南极海域遇险下沉



冰山露出水面的高度通常只有水下的深度的五分之一



分辨率的合成孔径雷达或可见光图像上加以识别，但是由于其数量巨大，还难以进行全面的追踪。现在即便有了更高分辨率的卫星监测，船舶也配备了更加先进的雷达测冰扫描设备，轮船撞上冰山的故事还是时有发生。2007年11月23日，“探索者”号邮轮在南极半岛以北的南设得兰群岛海域与冰山相撞，船体破裂进水，严重倾斜，最终完全沉没。所幸救援及时，船上100多名乘客和船员安全脱险。因此，冰山仍然是航行在南极海域的船只所要防范的最大威胁。“雪龙”号进入南大洋航行时，驾驶台都会安排专人负责监视冰山，通过雷达影像和目视识别冰山，提前调整航向，规避冰山。在夜间还会降低船速，开启船头的探照灯，对海面进行往复式的搜寻。

冰山撞航船又或航船撞冰山，说起来真是一个沉重的话题，但毕竟是小概率事件。冰山给航行在海上的人们更多带来的是震撼心灵的壮美。刚从冰架上崩裂下来的冰山，顶部是平的，看起

来方方正正，漂在海上犹如千万吨级的巨轮。上述能用卫星追踪的大冰山都属于这一类。而更多的冰山顶部有着不规则的形状，看起来更像是峰峦起伏的山峰。特别是有着单独尖顶的冰山，就更像是一座高耸的山峰了。这种单峰的冰山可能已经在海里翻转过，现在看到的山顶其实是以前的冰山底部。海水造成冰山水下部分快速融化，使冰山重心不稳，容易发生颠倒，也造就了各种形状的冰山。在中山站的熊猫码头附近搁浅了很多尖顶冰山，小艇往返“雪龙”号和中山站之间运输货物，需要穿过这一片冰山丛林。天气晴好的时候，雪白冰山在湛蓝天空的映衬下，真是琼楼玉宇，美不胜收。纯净的蓝白世界，倒映在镜子一般的海面上，如梦似幻。小艇激起层层涟漪，使水中美丽的画面荡然无存。这时我们应该意识到，冰山是这里的“主人”，我们才是漂洋过海而来的闯入者。📖

南大洋观测系统

文 / 南极研究科学理事会

南大洋对全球气候系统以及当地独特的生态系统的重要性不言而喻。那里路途遥远,后勤保障困难,因此是地球上数据采集最少的地区之一。设计和执行一套观测物理、生物化学以及生态过程的系统,是一项令人望而生畏的挑战。以2006年在澳大利亚霍巴特、2007年德国不来梅以及2008年俄罗斯圣彼得堡召开的会议为基础,南极研究科学理事会与海洋研究科学理事会共同发起了一项国际倡议,那就是建立南大洋观测系统(Southern Ocean Observing System, SOOS)。实际上,该倡议已有多多年,但直到2011年底才得以正式发起。从此以后,SOOS就建立了这样一个与各利益攸关者和捐赠者相关的网络,这些人齐心协力,以实现SOOS所制定的使命和目标,那就是对于南大洋系统动态变化的实质性观测结果,需要推动它们在国际各利益攸关者包括研究人员、政府部门和产业界之间的采集和分发。

愿景

对于有关南大洋系统物理、化学、地质和生物等方面的动态变化数据,我们需要能随时获取,而且这种获取具有可持续性。只有具备这一基础,才能促进国际科学界对南大洋的理解,促进相关管理机构能切中要害,阐述与南大洋有关的重大社会挑战。

2012年,SOOS发布了其愿景,其中列出长远工作目标和执行过程中必然会实现的目标,以及国际社会在共同推动的前提下能达成的目标。该愿景立足于自动和非自动信息化平台的建设和运行,但是随着时间的流逝,更多地依赖于自动化类。通过联合卫星遥感方式,数据被实时传输到地面站点,而其他针对系统内的各个参数采用近实时评估的方式,将有助于实时重置自动化平台,其好处在于实现了每一个参数时空覆盖度的最大化,而且不需要特别的人为干预。当前,

信息技术、建模技术以及观测技术等方面已经取得了巨大进步,我们需要借助它们以促使SOOS更进一步。此外,国际合作、基础设施建设和投资对SOOS的成功至关重要。

实践

从方法上讲,SOOS着力于设计、宣传和执行高性价比的观测和数据分发系统。在实际操作层面上讲,它有一套充满逻辑的路子,那就是系统设计、能力建设、观测、区域执行、数据分发以及行动支撑,表现为:促进针对南大洋的综合的、多学科的观测系统的设计与执行;宣传和引导新观测技术的发展;汇总并鼓励运用国际上业已存在的标准和方法,在有需要的情况下促进新标准的发展;联合与促进当前的观测投入,在学科之间、国家之间以及项目之间深入利用资源;促进那些可持续的、长期的观测结果之间的联合,以便于提供一套能强化数据发掘和分发的系统。此外,还将利用现有数据中心和有序的运作投入,在有必要的情况下,使之与肩负数据管理和存储的系统进行整合;提供一定资源,促进与SOOS有关的交流、协调和宣传等目标和行动。

管理

SOOS拥有一套相对简单的管理架构,与外部的科学和协调机构联系密切。SOOS由南极研究科学理事会以及海洋研究科学理事会共同监管。除了提供指导和建议,这两家机构也赞助SOOS的科学指导委员会年度会议,而SOOS向二者提供年度进展报告。SOOS是南极科学研究理事会“泛南极观察系统”的重要组成部分,受到该理事会以及海洋研究科学理事会、南极海洋生物普查、全球海洋观察伙伴计划和全球海洋观察系统的联合支持,其他组织机构尤其是美国海洋与大气管理局提供了大量的资助。

本文由先义杰编译自南极研究科学理事会等机构官方网站



中国南极天文科考

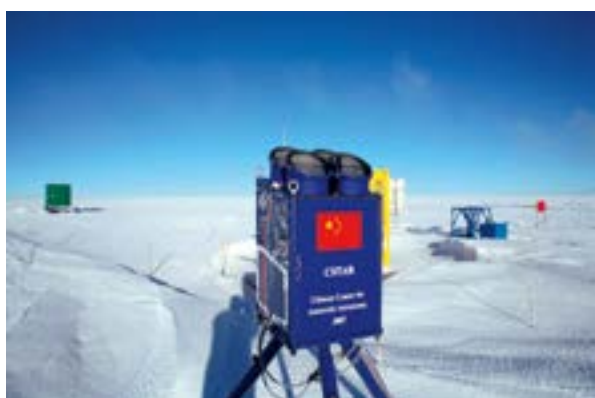
文、图 / 宫雪非

由于其特殊的自然条件和重要的战略地位，南极大陆一直是世界各国科学考察的重地。尤其是广袤的南极内陆，被一个巨大的平均厚度达2000多米的冰层所覆盖，高原冰盖上具有低温和干燥等独特的气候特征。在一些特定位置，如内陆冰穹A、冰穹C等地，具有极好的天文观测理想的环境。因此，科学家在南极的极昼或极夜期间可以对不同天体展开长时间的持续观测。目前，世界各国都已相继实施了多项南极天文观测计划，如美国在阿蒙森—斯科特南极点站安装了10米口径的亚毫米波望远镜，并建立起规模宏大的“冰立方”中微子天文台；欧洲空间局在冰穹C的协和科考站安装了0.5米口径的光学望远镜和多套台址监测仪器；意法等国联合研制的0.8米红外望远镜也已安装完毕并在调试之中；日本的东北大学在位于冰穹F的富士站也开展了实验性的天文观测活动。

中国南极内陆天文科考

经过多年努力，2005年，我国第21次南极科考队终于有一支由13名队员组成的内陆队到达了南极内陆冰盖的最高点冰穹A，这是一个曾被称为“人类不可接近之极”的地方，这支队伍打通了由中山站到冰穹A长达1200多公里的科考路线。2008年，在我国进行第25次南极科考时，笔者和另外一名天文工作者加入了内陆科考队。当中国科学家第二次到达冰穹A时，成功安装了名为“中国之星”的小口径光学望远镜和能源通讯支撑平台。这是中国人在南极内陆的第一台望远镜，这些设备的安装效果非常好，实现了200多天无人值守的遥控观测。由于这项工作的开创性，《自然》《科学》和《国家地理》等国际主流媒体对冰穹A的天文选址活动进行了全方位的报道。

我国第25次南极科考队于2008年10月出



经过一路艰辛，我们终于把物资安全运抵冰穹 A，并成功安装名为“中国之星”的小口径光学望远镜和能源通讯支撑平台。

发前往南极。参加这次科考的科学家承担了建设中国第一个南极内陆站——昆仑站的任务。迄今为止，这项工作依然被大家认为是南极考察中任务最重、过程最为艰苦的一次内陆科考。在经历了异常严峻的海冰冰情和一辆雪地车沉海的损失后，全部的建站物资都由两架直升机吊挂运输到内陆队的出发基地。我们内陆队的 28 名队员每天在出发基地接收物资，整理雪橇，吊装油桶，直到将 11 辆雪地车和 44 个雪橇共计 600 吨左右的物资捆扎整理好，才于 2008 年 12 月 18 日出发。此时距离预定的出发日期已推迟了两周之多，如果抵达冰穹 A 的时间太晚，就有可能完不成重中之重的建站任务，或是在撤离时遭遇急剧下降的低温，会给给车辆和人员带来危险。为了抢回时间，一路上整支队伍风餐露宿，中午从不休息，都是边吃干粮边赶路。南极的夏天虽无昼夜之分，但每天晚上扎营时基本已过午夜，以至于白天开车时常常会打盹。好在南极内陆天高地阔，只要大致跟随前车的车辙，避开冰裂隙区域即可。当时笔者和极地中心年轻的机械师魏福海共同驾驶一辆卡特车，拖载着 6 个雪橇约 60 吨的物资，最头痛的就是货物过载，常常起步时就会陷在雪地之中，这时我们必须下车将雪橇解锁，再分别将雪橇拖出。有时是卡特车自己陷在雪里，还要来找别的车将其拖出，再连上雪橇前进。由于货物沉重，路又非常难走，万般无奈之下，我们甚至发明了两个卡特车互助，将 12 个雪橇编为 3 组，交替拖载，来回穿梭运输的方式。历尽千辛万苦，我们不得已在一路抛下 3 辆出故障的雪地车之后，以 8 辆车将所有建站物资顺利拉到了冰穹 A。到达冰穹 A 后，主力人员立即开始了建设昆仑站的任务，笔者在多位队友的帮助之下，成功修复了几近损毁的发电舱，维护了多套天文台址监测仪器，当年成功实现天文设备的全年无人值守越冬运行。内陆队主力也于 2009 年 1 月 27 日完成了昆仑站一期的建设任务，从此我国有了自己的南极内陆科考站，成为世界上少数几个拥有内陆科考站的国家，标志着我国由极地大国向极地强国的迈进。

中国南极天文科考是由中国科学院天文台系

统、国家海洋局极地研究中心以及多所知名高校组成的科学共同体发起、支持及参加的科研活动，也有澳大利亚和美国等多个国际合作方的参与。从2007年起，我国天文学家参加了迄今为止的全部中国南极内陆昆仑站科考队，共计20余人次，已成为昆仑站内陆队中不可或缺的科研队伍。每一年，天文工作者都在低温低压、高寒缺氧的环境中艰苦工作，安装调试精密的天文仪器，同时还要客串机械师和通讯工程师，维护天文观测站的能源与通讯支撑平台。南极科考有一句口头禅：雪龙船是天堂，中山站是人间，内陆队是地狱。虽然是句玩笑话，却也道出了内陆科考工作和生活的艰难。挺进昆仑站的路途通常并不顺利，除了自然环境恶劣外，为了多拉物资赶时间，一路马不停蹄，还不时要修车或整理雪橇，人到昆仑站时已十分疲惫。然而这只是天文科考队员艰苦工作的刚刚开始，为了下一年天文仪器的正常运行，他们要负责发电系统的修复、通讯系统的维护以及光学和射电天文仪器的安装调试，既要检查电路焊板子，也要打孔攻丝修电机；既要懂电脑编译程序，也要会装太阳板和蓄电池，每个科研人员都是多面手，工作计划也排到以小时计，常常是生活舱里面起得最早、回来最晚的队员。当然，正是由于科考队员的艰辛付出，才有了今天中国南极天文研究的良好态势。

中国天文学界于2006年提出建造三台50厘米南极巡天望远镜的计划，为未来的大型望远镜做科学与技术上的探路。南极巡天望远镜以天文学重大科学问题为研究内容，开展了南极特殊环境下建设先进天文设备所需要的关键望远镜技术和望远镜的越冬运行、数据分析等方面的工作。第一台南极巡天望远镜于2012年2月由我国第28次南极科考队在昆仑站成功安装，到目前为止累积数据3TB，共获得南极天区近2.6万帧测光图像。第二台南极巡天望远镜于2015年初由第31次南极科考队运送至昆仑站并完成安装。除此之外，在台址监测设备方面，由两套声雷达完成了冰穹A地区大气边界层高度的测定，观测结果显示，南极冰穹A地区的平均边界层高度是13.9米，说明冰穹A的边界层高度比冰穹C有了显

著降低，只要把望远镜安装到十几米的高度，就可以避开边界层大气湍流的影响，获得类空间的观测条件。由全天相机和光谱仪完成的天光背景测量也表明，冰穹A比南极的其他天文观测站拥有更暗的天空背景。由傅里叶分光频谱仪获得的南极冰穹A天文台址太赫兹至远红外谱段的大气透过率长周期实测数据，揭示了地面其他台址难以观测的太赫兹及远红外新窗口。这些天文成果大都发表在《自然·天文学》《皇家天文学会月报》《天体物理杂志》等国际顶级天文学术期刊上。

南极天文未来发展

2014年，南极研究科学委员会召集了来自22个国家的科学家和政策制定者会议，通过投票与讨论遴选了未来20年南极科学研究优先的80个最迫切问题，形成了南极6个优先发展科学领域，对空间与宇宙的观测位列其一。目前，我国已经在昆仑站等开展了数年的天文台址系列测量和监测，并通过中小型天文望远镜进行无人值守的天文观测，积累了大量运控经验。2013年，我国颁布实施的《国家重大科技基础设施建设中长期规划（2012～2030年）》中，优先安排了16项国家重大科技基础设施建设，中国南极天文台位列其中。该天文台将主要面向21世纪最重要的重大科学问题——暗物质和暗能量、高红移宇宙、恒星与星系的形成和演化、系外行星和生命起源等，主要建设内容包含两台主干设备：2.5米光学红外望远镜和5米太赫兹望远镜，以及为之提供支撑的台址与现场基础设施、能源通信和交通系统、运行控制系统等。

笔者在本文的写作中参考了我国第25次南极科考队队友和历次天文科考队友的文献资料，在此表示感谢。在封笔之际，我国第33次南极科考队的内陆昆仑队已经抵达昆仑站。这次又有四位年轻的天文工作者加入其中，他们将承担昆仑站区全部天文仪器和能源通讯系统的维护和修复。与之同时，南极昆仑站天文台的建议和立项工作也在紧张地开展，在最遥远的大陆观测最神秘的宇宙，中国的天文学家一路前行。

本文作者系中国科学院南京紫金山天文台研究员



极区高层大气 地球联系外太空的窗口

文 / 张北辰 图 / 李航





中山站高频雷达天线阵 摄影 / 刘杨

依托于南北极科学考察，我国科学家利用南极中山站和北极黄河站位于极隙区纬度并构成地磁共轭的得天独厚的地理位置，可直接监测太阳风粒子进入极区高层大气引起的天气学现象。目前考察站已经建立了包括光学、无线电等探测手段在内的综合观测系统，自 1995 年以来对极区极光、电离层和地磁开展了持续监测。

研究发现，太阳不断向外太空喷射带电粒子，形成所谓的太阳风。太阳风到达地球，与地球磁场相互作用，形成磁层。地球犹如一艘巨大的船只，在磁层和稠密的大气保护下，迎“风”漂浮在茫茫宇宙空间，地球上的生灵因此免受太阳喷射的高速带电粒子的直击而得以生存。这些带电粒子的运动轨迹强烈地受到地球磁场的影响，进入的粒子大部分被束缚在离地球赤道表面几个地球半径的环绕地球的区域（科学家称之为“辐射带”）。在极区，由于地球磁场能延续到遥远的磁层区域或直接连接太阳风磁场，太阳风中的高速带电粒子才可能沿磁力线直接进入高层大气并与之相互作用，形成肉眼可见的极光。极光发生所在的高层大气，通常是指离地面 60 公里以上至上千公里高度的范围，是电离成分与中性大气成分混合的区域。极区高层大气中的这种发光现象，我们可将其形象地认为是日地对话的电影，整个天空就是投影的屏幕。在这里，科学家通过地面光学和无线电等手段观测其中发生的物理过程，可沿磁力线追溯到更远处的太阳风和磁层相互作用以及遥远的磁层中发生的物理过程。人们

在这里可以做到“坐井观天”，而发生在极区高层大气中的物理现象也日益影响人类的空间探索活动，乃至人们的日常生活。

人们对自然现象的重视程度与人类科技进步密不可分，人们对极光的认识也是如此。早期极光对人们的影响更多的是文化和心理层面，是出于对极光的未知及由此带来的恐惧，如在北极地区的挪威，人们认为极光是与逝去的先人联系的纽带，他们挥舞白巾，寄希望于极光能传递对先人的问候。人们看到极光时更多表现出的是对大自然的敬畏，甚至对自身行为加以约束。例如，当极光出现的时候，北极萨米族的女人不能光着脑袋出门；瑞典人认为不能在极光下理发；挪威有些地方的人看到极光，会恐慌地把身上的金属物品摘下。直到 16 世纪初，天文学家逐渐认识到极光只是一种自然现象，并将在北极天空中的这种发光现象命名为北极光。

无线电通讯的发展进一步加深了人们对极光的认识。19 世纪中叶，电报业务得到了广泛应用。其间，一次极端空间事件对电报业务的影响促成了人们对极光的深入了解，并首次提出太阳表面的扰动与极光之间的可能联系。那次事件被称作卡林顿事件。1859 年 9 月 1 日，英国天文学家卡林顿（Richard Carrington）在观测太阳表面中心大片黑子群时，发现其中两块区域有持续约 5 分钟很强的白色亮光。同时观测到这一现象的还有英国的另外一位天文学家霍奇森（Richard



极昼来临前的极光

Hodgson)。卡林顿注意到，地球磁场在第二天发生了剧烈的变化，由此推断这二者之间可能存在一种因果联系。与之相对应，在全球许多地方都有人观测到极光的出现。

卡林顿事件在当时影响最大的莫过于电报业务。在9月2日这一天，法国所有电报台全部出现故障。有意思的是，当时多地的电报台发报人员都看到发报机上冒出了火花，他们断开供电电池，但通过极光发生时产生的感应电流依然能使发报机正常发报。加拿大电报总署官员记录下当时的情况：“1859年8月28日至9月2日，整个电报线路完全受到极光穿透的影响，电报台站间根本无法通讯，被迫在晚间关闭。”与此次事件相关的情况在美国和欧洲都曾有广泛报道。

事实上，卡林顿事件是典型的太阳能量经过极区注入地球空间并引起地球空间环境效应的事件。卡林顿观测到的太阳黑子附近爆发的强烈白光现象被称为太阳耀斑。伴随着太阳耀斑的爆发，从太阳表面喷发出比背景太阳风速度快、携带磁场的高密度太阳电离气体，叫日冕物质抛射。日冕物质抛射在行星际空间运动的速度每秒可高达3000公里，所具有的动能达1032尔格。当日冕物质抛射产生于太阳中部以致其行进的轨迹正好经过地球，且携带的磁场与地球磁场方向相反时，可造成地球磁场短时间内的剧烈变化，即发生地磁暴。此时进入地球磁层的能量可达1024尔格，相当于1万颗有1千克铀的原子弹爆炸所释放的

能量。其中大部分的能量以焦耳热的形式在极区高层大气中释放和存在于辐射带中；少部分在磁层尾部以热能的形式释放并重新回到行星际空间。

太阳风能量传输进入地球空间最直接的效应是在地球两极高层大气中出现的极光。极光是由太阳风中的电子和质子在地磁场磁力线引导下沉降到高层大气并与其中的原子和分子相互碰撞而激发出来的光。极光的颜色中较常见的有红光、绿光、蓝光和紫光等。这是根据沉降的电子和质子能量大小，沉降到不同的高度，与不同的中性大气成分碰撞的结果。肉眼可见的红光其强度峰值发生在200公里以上的高度，而绿光发生在100公里左右的高度。从地面上看，极光发生率高的地方是围绕地球磁极并离磁极约23度的椭圆带状区，被称为极光椭圆。卫星观测也表明，地球南北磁极附近各有一个极光椭圆。当地磁活动减弱时，极光椭圆变小；而当地磁活动增强时，极光椭圆向赤道方向扩展。当地磁活动达到一定的剧烈程度，在40～60度的中纬地区也可观测到极光，通常是稳定的红色极光弧。

对卡林顿事件的分析表明，1859年8月28日到9月4日共发生了两次大的地磁暴。其中第一次磁暴出现的极光，在我国作为一种气象记录在《获鹿县志》中。其曰：“咸丰九年，七月夜，红光起于西北，亘于东北，经三夜始散。”获鹿县即现在的河北省中南部鹿泉地区。在两次磁暴发生期间，在世界其他地方，包括北美洲、南美洲、



欧洲以及澳大利亚，甚至在南边的夏威夷和加勒比地区及中美洲大部分地方均观测到极光。虽然极光发光所消耗的沉降粒子携带的总能量不到 1%，但极光的不同形态及其变化和出现的位置反映了太阳风—磁层相互作用和磁层内部不同的物理过程，如较低纬度出现的红色极光，即是太阳风能量注入期间，被束缚在环电流中的带电粒子由于某种机制获得能量，在闭合磁力线两端沉降到高层大气中的发光现象。

太阳风能量通过极区注入地球后，空间环境的响应及其对人类活动的影响是全球性的。例如，沉积在极区高层大气中的能量可引起中性大气的抬升，这使得卫星所在轨道上的中性大气密度增加，可能导致卫星行进时阻力增大而提前坠落。亚洲至北美洲经过极区的航线比不经过极区能缩短航程、节省燃油及中途经停站的起降费用。当飞机进入 82 度以上的高纬区域，卫星通信通常会受到影响，只能通过高频通讯与空中交通管制部门保持联络。但强烈太阳活动产生的能量粒子注入极区高层大气后，也能导致高频通信信号的中断。

普通物理的知识告诉我们，当穿过一个闭合的导电回路的磁通量发生变化时，会在回路上产生感生电流。输电网



南极中山站高空大气物理观测站 摄影 / 郑敏



第 29 次南极考察中山站卸货 摄影 / 李传洪

正是这样一个导体回路。磁暴发生时，全球地磁场发生剧烈变化，穿过电网回路的磁通量也发生剧烈变化，在电网回路上产生了强大的感应电流。当在电网上产生的感应电流是大强度的直流电时，就可能在短时间内造成输电网的失衡，造成某些输变电设备局部产生高热而烧毁。1989 年 3 月 13 日凌晨，加拿大魁北克省在一阵光弧之后，陷入了停电的黑暗中。600 万居民在无电的冬天度过了 9 个小时，直接经济损失达 5 亿美元。磁暴产生的感生电流不但会对高纬地区的输电网和通讯电缆产生危害，而且会影响地表油气管线的安全。科学家已经测量到，强磁暴时，每公里输油管线上产生 6 伏的感生电压；在 1000 公里长的输油管道上会有 6000 伏的感生电压，阿拉斯加输油管线上有 1000 安培的电流流过。如此强大的感生电流不但会影响流量计的正常计数，还将加速管线的腐蚀。

科学家通常用地磁变化强度的一个指数 (Dst) 来衡量太阳对地球空间环境影响的剧烈程度。他们注意到 1989 年魁北克事件 Dst 指数最大为 -548nT。与之相比，1859 年卡林顿事件 Dst 指数最大为 -850nT。而引发 1859 年卡林顿事件的日冕物质抛射的速度只是观测到的第二快速的事件。在科技水平高度发展的今天，空间天气事件被认为是低频率但高风险的自然灾害性事件。美国前总统奥巴马在 2016 年 10 月 13 日签署了“全国协力为应对空间天气事件做准备”的总统令。该文件认为，空间天气事件，指经常发生太阳耀斑、太阳能量粒子和地磁扰动，其中有些对关键设施和技术设备，如 GPS、卫星操作和

通讯、导航及电力网等造成显著影响。极端空间天气事件，即那些对关键设施造成显著损害的事件，能使大部分电力传输网失灵，进一步造成灾难性的损失，影响关键服务设施，包括水供应、卫生保健和交通运输。空间天气还可能对整个大陆人们的健康和安全造成影响。为空间天气事件做出准确预报和准备需要政府、应急处置部门、学术界、媒体、保险业、非营利和私人组织的共同参与。总统令文件中提到作为美国的一项国家政策，美国将为空间天气事件做好准备，将其造成的经济损失和人类困难降到最低。联邦政府必须具备预测和探测空间天气事件的能力，必须设立必要的计划和项目对即将到来的空间天气事件对公众和私人机构发布警报并采取转移措施，必须具有民众保护和转移的计划、机制和标准，以减少在确定的威胁到来之前对关键基础设施的风险，必须具备应对和恢复空间天气效应的能力。执行部门和机构必须通力合作为空间天气事件效应做准备。

目前，我国空间天气预报模式研究工作与美国等发达国家相比还有一定的差距，但在我们原有的基础上也取得了良好进展，开展了太阳风引起的空间环境变化导致地面感生电流的预测和太阳风、磁层、电离层物理建模预报研究工作。相信在不久的将来，我国的科研工作者将建立起完整的太阳风能量注入极区高层大气乃至影响全球空间环境的联系，深刻理解空间天气学效应，服务于我国的空间探索和活动。

本文作者系中国极地研究中心研究员



南极与全球气候变化

文、图 / 陆龙骅

南极是地球上的气候敏感地区，也是多个国际计划研究全球气候变化的关键地区。南极所处的特殊地理位置及特有的生态环境，突出了其在全球变化研究中的作用与地位。

南极大气科学考察的重要性

南极地区，通常指南纬 60 以南地区，包括南极大陆、亚南极岛屿和环绕南极大陆的南大洋。南极是一块被海洋包围的冰雪大陆，与北极是一片由陆地包围的冰雪海洋绝然不同。

全球气候系统由大气、海洋、陆地、冰雪和生物等圈层组成，南极与北极一样，包含了上述

五大圈层相互作用的全部过程。南极大气科学考察研究不仅具有深远的政治意义，对气象学、冰川学、海洋学、地质学、生物学、地理物理学及环境科学等研究领域有重要的科学意义，而且具有潜在的经济和社会效益。

南极与北极一样，是地球大气的主要冷源，在全球大气环流和天气气候形成，南北两半球热量、动量和水分的交换中起重要作用。全球冰雪大多储存在南极，南极洲 95% 以上地区被平均厚度 2000 米的冰盖、冰架和终年不化的积雪所覆盖，加上周围海域的海冰，形成了一个名副其实的冰大陆，拥有能使全球海平面升高 66 米

的水量；而北冰洋及其周围陆地，虽然被冰雪覆盖的时间也很长，但格陵兰等冰盖无法与南极大陆冰盖相提并论，只拥有能使全球海平面升高6米的水量。

海洋是驱动大气能量的主要供应者和调节器，极地大洋环流和海冰变化与极地大气环境有密切关系，在全球能量平衡中起重要作用。南北极地的冷水通过沉降从海底向较低纬度地区输送，由海水温度、盐度不同而形成的全球“温盐环流”，对全球各大洋的热量和气体交换起重要作用。温盐环流异常将会对全球的天气和气候发生重大影响。海冰覆盖状态的变化也严重地影响着海冰区的能量收支和海洋—大气之间的热交换。

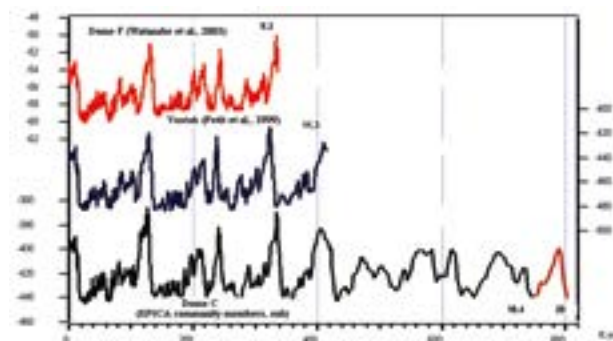
极地冰盖及海相和湖相沉积物中保留着地球大气地质时期和历史时期气候变化的详细记录，是获取极地气候代用资料的载体。每年沉降到终年不化冰盖表面的降雪都给冰盖增加了新的气候记录。在南极钻探的冰芯和陆上的露岩包含了长达数十亿年的全球变化记录。例如，根据对南极东方站和冰穹C冰芯同位素、气泡成分及微量物质的研究，科学家获得了近42万年和近74万年以来南极地区温度和二氧化碳等痕量气体浓度变化的资料；采用生物地球化学等方法，通过对南极企鹅粪和海豹毛等沉积物中元素的分析，能了解近几千年企鹅和海豹数量的变化，并揭示企鹅和海豹种群与南极环境和温度变化的关系。

南极和北极是影响全球气候变化的敏感地区之一，极地气候变化是全球气候变化的指示器。南极是地球的“冷极”和“风极”。南极东方站实测地面最低气温为 -89.2°C ，比在西伯利亚（奥伊米亚康）测得的北半球地面最低气温（ -71°C ）低 18.2°C ；南极迪·迪尔维尔站实测最大瞬时风速达每秒96米，是全球地面风速最大的地区。南极和亚南极环境的各种参数对全球变化十分敏感，就气候变化而言，南极洲是地球上“惯性”最大的地区。大陆腹地降水少，有“白色沙漠”之称，冰原的代谢率极慢；与其他大陆相比，南

极大陆地表面反射率均匀且年变化很小，地表风系也较其他大陆上更具持续性；因此，南极大陆在南极区气候体系中具有控制性的、稳定的特点，对其变化应十分关心。南极冰盖物质平衡研究对研究温室效应的增温作用及全球海平面变化有重要意义。

极地，特别是南极，是目前受人类活动影响和环境污染最少的地区。极地大气化学特征、大气本底环境的分析和研究，对了解人类活动与全球环境变化的关系、人类活动对全球环境变化影响程度有重要的意义，也能为各国政府制定与全球环境变化有关的政策提供参考依据。

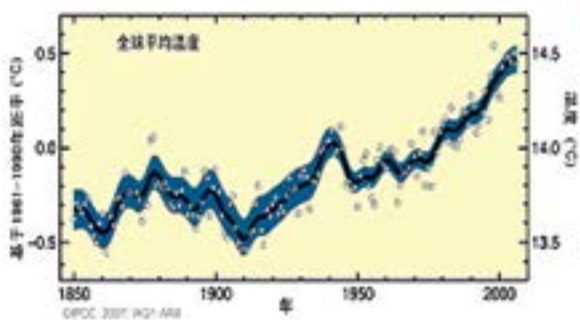
目前，因人类活动引起的大气中二氧化碳和氟利昂等气体浓度的增加已经引起了人们的忧虑，前者通过“温室效应”使全球气候增暖，而后者则通过平流层中的光化学反应破坏臭氧层，这种现象在极地的反映比较明显。鉴于目前地球上气温和二氧化碳等环境要素的变化强度已超出了自然界变动的界限，因此，在极地对气温、二氧化碳和大气臭氧等环境要素的监测更有意义。



南极冰芯记录



大洋环流



全球变暖

对极地温度和极冰范围的监测及对冰原稳定性的研究可以为判断“温室效应”的影响程度提供依据；开展大气臭氧变化规律和氟利昂等气体向两极输送过程的研究将为揭示“南极臭氧洞”产生机理，以及人类活动对臭氧层破坏的影响程度提供线索。

极地气候和大气环境变化对我国天气气候及国民经济可持续发展都会产生影响。我国位于北半球，人们对来自北极地区的冷空气活动的影响都有亲身体会，而事实上，来自南半球的冷空气活动对北半球的大气环流和天气气候也会发生影响。极地气候和大气环境变化对我国天气气候影响的研究，将为寻找影响我国短期气候的强预测信号提供参考依据。

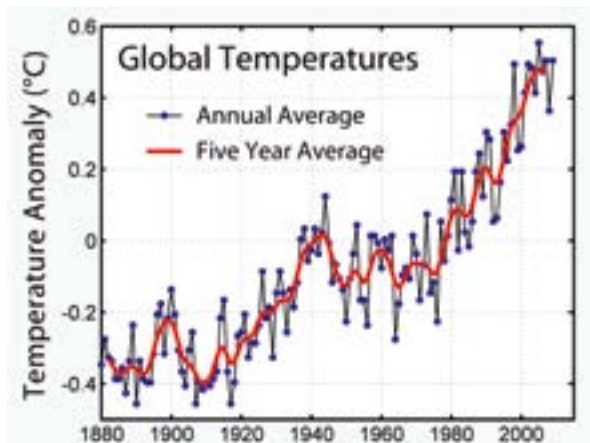
极地是地理和地磁极点所在地，是研究各种大气物理现象和日地关系的好场所。那里最适宜进行有关电离层、磁层、平流层—对流层特性及相互作用的探测研究，也可进行太阳活动及其长期变化对中层大气活动影响和极区天气气候变化对太阳活动变化的响应的观测研究。

鉴于上述原因，随着近百年来极地科学考察事业的发展，南极大气科学的考察与研究也取得了较大的进展。

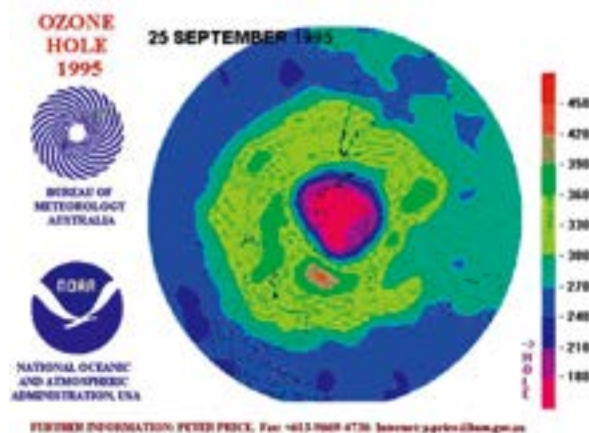
南极对全球气候变化的影响

我国对极地气象的认识至少可追溯到 20 世纪 30 年代，当时，一位年轻的中国留德博士——时任北京大学教授的李宪之先生（已故），利用当时极为稀少的气象资料做出了“侵袭东亚的强冷空气可以穿过赤道到达印尼和澳大利亚，并在那里形成特大暴雨”及“北半球西太平洋台风的生成与南半球强寒潮侵袭有关”的大胆论断，这一结论现已被近代气象观测资料和数值模拟结果所证实。

当前，与人类排放到大气中的污染物有关的全球变暖和臭氧层减薄这两个问题在极地都有十分敏感的反映。



全球温度变化



南极臭氧洞

在全球变暖的大背景下，西南极，也就是在南极大陆靠近南美洲的那一侧增温十分明显。在个别站点上，近百年温度增加了 2.5°C ，大大地超过了 20 世纪全球平均增温 0.6°C 的幅度。此外，近年来西南极还经常发生冰架融化和崩塌，如 2002 年 2 月 27 日到 3 月 5 日，位于南极半岛的拉森陆缘冰架发生了大面积塌陷，200 米厚的冰架塌陷后变成无数小的冰山和碎块，塌陷的陆缘冰面积约有 3250 平方公里。

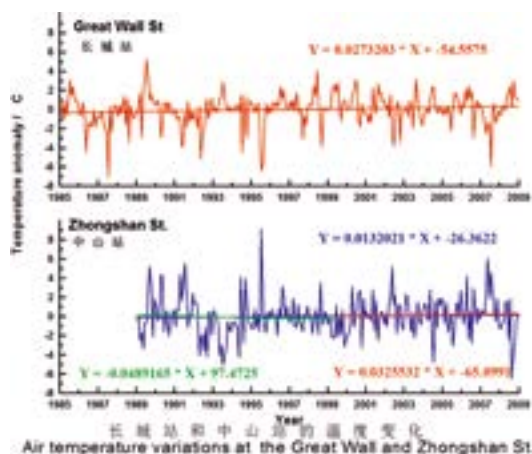
那么，南极大陆冰盖是否也在崩塌呢？答案是否定的。南极地区的气候变化从时间和空间上来说都是多样的。近几十年来，南极地区的显著增温主要发生在西南极的南极半岛地区，大大超过了近 100 年全球平均增温的幅度；而在东南极大陆增温并不明显，有些年个别站点还有较明显的降温趋势。

由美国 NOAA 卫星获得的 1981 ~ 2007 年南极地表温度变化趋势可以看出：从总体上来说，南极温度升高，其中西南极一些地区百年增温率接近 2°C ；而南极大陆主体，特别是东南极大陆冰盖不仅增温不显著，某些地区还有降温倾向。我国南极长城站和中山站分别位于西南极和东南极，两站的观测资料也证实了这一点。

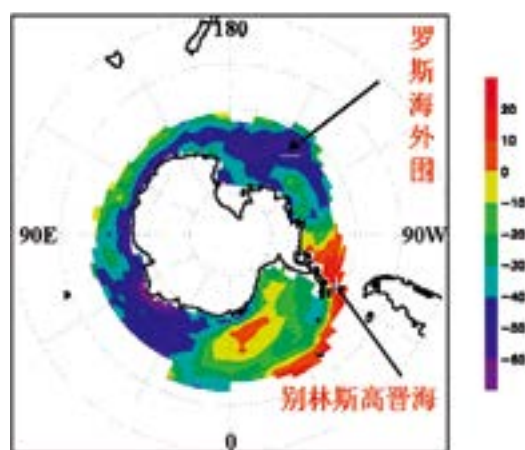
除南极半岛地区显著增温外，近年来西南极经常发生的大范围的冰架融化和崩塌，在东南极却没有发生。冰川学研究也表明，在西南极地区冰盖物质的补充小于消融，冰盖是不稳定的；而在东南极地区冰盖物质的补充大于消融，冰盖是稳定的。南极地区的气候变化时空多样性的提出，为进一步全面认识极地对全球变化的响应提供了重要线索。

春季南极臭氧洞的出现，是大自然对人类发出的又一警告。臭氧是大气中由三个氧原子组成的一种微量气体，主要分布在平流层中，通常最大浓度出现在离地面 22 ~ 27 公里的地方。虽然臭氧在大气中含量很少，在一个大气压的标准情况下，大气臭氧总量的全球平均累积厚度仅为 3 毫米。但由于它能大量吸收阳光中对人体和生物造成伤害的那部分紫外线，对地球生态系统和大气环境有重要影响。大气中的臭氧减少后，照射到地面的紫外线就会增加，将使人类遭受皮肤癌、白内障、免疫系统缺陷和发育停滞等疾病的袭击，还会使农作物减产以及浅海浮游生物等受损。如果臭氧层消失了，我们赖以生存的地球就会变成一座不设防的城市，杀伤生物的紫外线可以无遮无拦长驱直入，结果将是地球上生灵的灭绝。

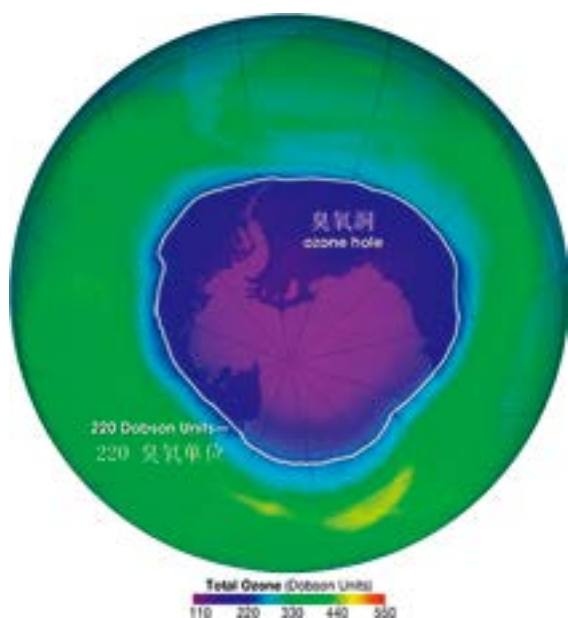
春季南极臭氧洞是在 20 世纪 80 年代中期发



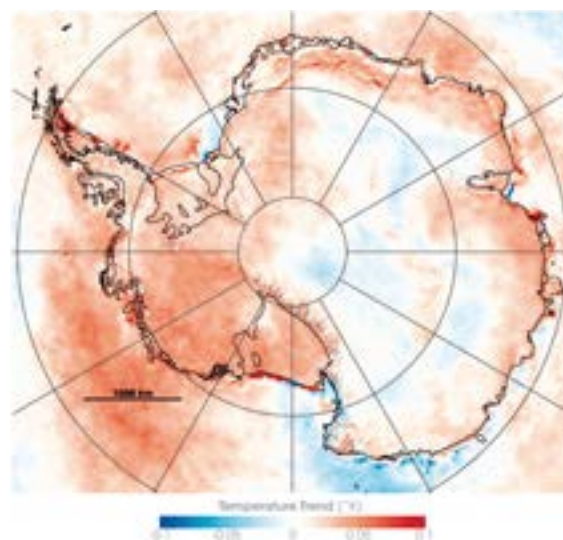
长城站 - 中山站温度 - 2008



南极海冰涛动



南极臭氧洞



南极温度变化

现的。在春季，南极地区臭氧总量急剧减少，会出现低于全球平均值 30% ~ 40% 的区域，与周围地区相比，南极洲上空出现一个明显的臭氧低值的“空洞”，这就是南极臭氧洞。

通常南极臭氧在 7 月下旬开始减少，8 月中旬后就出现较为明显的臭氧洞，9 月下旬到 10 月上旬臭氧洞的面积最大，10 月底后臭氧急剧增加，臭氧洞逐渐填塞，12 月中旬恢复正常，就不再有臭氧洞了。南极臭氧洞的强度和范围时大时小，各年是有变化的，“空洞”中的最低值也是波动的。近十年来，南极臭氧洞最大时面积已超过 2800 万平方公里，差不多有三个中国那么大，占据了整个南极洲，其中心地区的臭氧总量与正常值相比耗损了 70% 左右；而在南极臭氧洞最小的年份，面积不到 300 万平方公里，只有近 10 年来平均值的 1/7。

导致南极臭氧洞出现的最大罪魁祸首是人类自己。为制造冰箱和空调等电器，人类发明和使用了氟利昂和溴化烃等含氯和溴的化合物，这类污染物排放到大气中后，会在平流层冰晶云表面通过光化学反应大量消耗臭氧。大气中存在有人类活动排放的氟利昂和溴化烃等含氯和溴的化

合物，是春季南极臭氧洞形成的必要条件。而为光化学反应提供活动界面的平流层冰晶云只在温度低于摄氏零下 78℃ 时才出现，春季南极平流层极地涡旋中的低温是形成平流层冰晶云的又一必要条件。只有在平流层冰晶云表面吸附了大气污染物，才能通过光化学反应大量消耗臭氧，在南极春季形成臭氧洞。也正由于在北极春季平流层的温度高于南极，很难满足形成臭氧洞的第二个必要条件，因此到目前为止，北极没有出现过臭氧洞。

极地气候和大气环境变化对全球大气环流，特别是我国天气气候也会发生影响。冬季来自北极地区的冷空气对我国的影响早已为人们熟悉，对我国造成灾害的旱、涝、风、雹等天气和气候事件也大多与冷、暖空气及其活动异常有关。全球大气是一个统一的整体，发生在南、北两极地区的气候和大气环境变化也是气象工作者十分关心的事。例如，在南极和北极，中心地区和外围地区的气压有人们称之为“涛动”的、像“跷跷板”一样的相反的变化。在南半球有“南方涛动”“南极涛动”“南极海冰涛动”等；在北半球有“北大西洋涛动”“北太平洋涛动”“北极涛动”等。这些“涛动”及其异常对全球大气环流都会发生

影响,也必然会影响中国的天气气候。即使是南极或北极冷暖和海冰状况也可能对我国夏季灾害性天气发生影响,从中可以找出预报我国短期气候的强预测信号。

南北极地区的气候变化是十分复杂的。南北两极对于气候变化的响应也不尽相同。从温度变化来说,北极对全球变暖的响应更为直接和显著,近几十年来北极各地都是以增温为主的;而在南极地区,增温主要发生在西南极地区,在南极大陆主体的东南极地区增温并不明显。

近 30 年来,南北极海冰的变化趋势有所不同,北极海冰减少,而南极海冰却在增加。其中,北半球夏季(7月)和冬季(1月)的平均海冰覆盖面积分别以每 10 年 7.4% 和 3.3% 的速度退缩;而南极夏季(1月)和冬季(7月)的平均海冰则以每 10 年 5.2% 和 1.0% 的速度增加。2012 年 9 月南极海冰甚至达到近 30 年来的最大覆盖面积。

除变化趋势外,南北极海冰的年际变化也很大。如,2012 年夏,北极海冰面积最小,为 341 万平方公里;而 2013 年夏,北冰洋冰封面积 583 万平方公里,与 2012 年 8 月相比,扩大了 238 万平方公里,增幅达 60%。在南极相邻年同

月海冰面积的差异,也可达 20% 以上。

除温度和海冰变化外,南北极地区的大气臭氧也有不同的变化特征。虽从总体上来讲,近 40 年来南北极和全球一样,大气臭氧总量都有减少趋势,但从 20 世纪 70 年代末开始,每年春季在南极都出现了因臭氧耗损而形成的臭氧洞,而在北极春季大部分时间为臭氧高值区,1997 年和 2011 年偶尔出现的北极春季臭氧异常耗损也均未达到“臭氧洞”标准。

由此可见,包括极地在内的地球气候系统是十分复杂,对于这种变化究竟是人类影响还是气候系统内部变化的结果,在科学上有很大的不确定性,也还有不同的意见,需要进一步研究。气候变化在不同的地区会有不同的反应,正如我们不能笼统地将北极的变化说成是极地的变化,也不能将西南极地区的变化简单地误认为整个南极地区的气候变化。

结束语

南极大气科学考察与研究,从一开始都是在全球气候变化的框架内进行的。南极是地球上的气候敏感地区,南极所处的特殊地理位置及特有的生态环境决定了它对全球气候变化有着重要的作用与影响。在卫星遥感技术飞速发展的现代,南极地区的实地地面气象观测和考察仍是不可取代的。南极地区的气象观测站网和现场考察仍将为监测和研究南极的天气气候变化及其对全球变化的影响做出重要贡献。

在南北极地区,与全球变暖直接相关的温度和海冰变化很难用单一的人类活动影响来解释。目前还没有足够的证据能说近 500 年来南北极和邻近地区的温度和海冰变化是温室效应加强的结果,这种变化在很大程度上仍可能是气候系统内部变化的结果。

本文作者系中国气象科学研究院研究员





南极生物圈的基石——南极磷虾

文、图 / 孙松 杨光

提到南极的生物，人们首先想到的可能是企鹅、海豹和鲸类，其实还有另一类非常有代表性的生物，那就是这些大型动物的饵料——南极磷虾。无论从哪个角度来衡量，南极磷虾都是我们这颗地球上数量最大和繁衍最成功的动物。在南极食物网中，仅南极大磷虾一个种就足以维持以它为饵料的鲸类、海豹和企鹅的生存与繁衍，所以说，南极磷虾是整个南极生态系统的基石。

磷虾在全球海洋中均有分布，属于甲壳类浮游动物，是很多鱼类和大型海洋动物的饵料，磷虾的英文名“Krill”一词出自于挪威语，意为“鱼的幼苗”。全球海洋中共有 85 种磷虾，生活在南极海域的磷虾有 7 ~ 8 种，通常人们所讲南极磷虾一般是指南极大磷虾。磷虾在外形上与我们所熟悉的对虾等甲壳动物相似，但个体一般比较小，南极大磷虾的体长仅为 5.5 ~ 6 厘米。但



南极磷虾生物量巨大，被认为是地球上数量最大、也是最后一个动物蛋白库，目前每年的渔获量为20万～30万吨，主要被用来作为海水养殖动物的饵料、垂钓和制作保健品“磷虾油”的原料，在日本、俄罗斯和菲律宾等国，人们直接食用磷虾。

南极磷虾的生物量到底有多大，这是一个非常重要但却难以回答的问题，因为南大洋实在太

大且远离人类居住的大陆，对南大洋开展全面研究的费用是非常高的。1977～1986年，由十几个国家参加的庞大的十年计划“南极海洋系统与资源的生物学研究”，曾经在1980～1981年和1983～1984年的南极夏季进行了两次大规模的海上考察与实验。科学家使用声学设备对南大洋八分之一的海域进行过调查，得出的结论是南极磷虾的生物量为5.6亿～10亿吨。由于该

调查只对八分之一的海域进行了声学调查,考虑到南极磷虾生物量的年际变化很大、磷虾具有块状分布的特点,再加上调查区域的代表性以及声学探测设备目标强度的准确性等各方面的因素,这个数字未必准确。研究磷虾捕食者的科学家认为这一数字偏低,因为它不足以维持南大洋生态系统上层消费者的消耗。之前人们通过食物链进行过推算:一条鲸类动物一天需要消耗多少数量的磷虾、南大洋有多少鲸鱼,除了鲸鱼之外还有很多的其他生物,如企鹅、海豹和乌贼等,推算出来的结果是总数超过 100 亿吨,这个数字也许是偏大了。结合生态学和现场调查等各方面的综合研究,科学家认为南极磷虾的生物量应该在 10 亿~20 亿吨。2008 年,德国和美国的科学家根据 20 世纪在南大洋对南极磷虾进行拖网调查的数据和南极磷虾声学探测数据,再结合南极磷虾的生长模式等综合分析后认为,南极磷虾的生物量在 3.42 亿~5.36 亿吨。尽管仍然存在不确定性,但是这个数值已经是比较可靠的了,甚至可以说是一个比较高的估计值。南大洋生物资源保护组织专家的态度是:在没有完全弄清楚南极磷虾的资源数量的情况下,我们宁可将南极磷虾的评估量说得少一点,这有利于对南极磷虾资源的保护,因为一旦南极磷虾资源遭到破坏,整个南大洋生态系统将遭遇灭顶之灾。

人类对南极生物资源的破坏是有着惨痛的历史教训:20 世纪 30 年代开始的大规模南极捕鲸,仅仅几十年的时间就使很多鲸类灭绝了,尽管后来人们对南极鲸类进行了严格的保护,但是直到现在鲸类资源也没有得到恢复,因为海洋生态系统一旦遭到破坏,要将其恢复是非常困难的。鲸和海豹是处于海洋生态系统的顶层生物,其资源遭到破坏会对生态系统造成一定的影响,但是还不至于导致整个海洋生态系统的崩溃;而南极磷虾资源一旦遭到破坏,对南大洋生态系统的破坏将是毁灭性的。

南极磷虾的年捕捞量应该控制在多少才不会

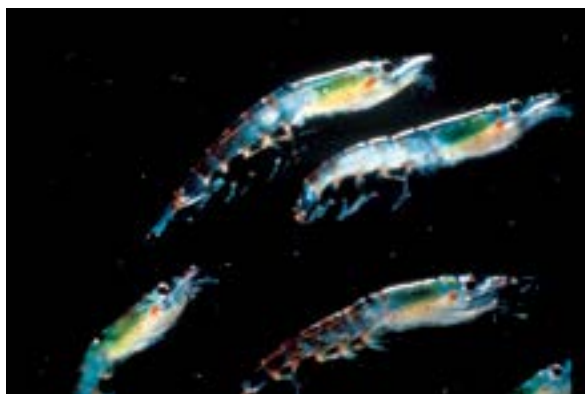
使其资源遭到破坏?这涉及南极磷虾的种群结构分析和种群补充量的计算,要进行这方面的研究首先要知道南极磷虾的年龄结构。但是与其他的甲壳动物相比,南极磷虾具有一个很重要的生物学特征:在环境不利的情况下,南极磷虾的身体会出现负生长,甚至在秋季已经成为成体磷虾的一些性别特征也会消失,经过漫长的冬季到春天的时候反而变成幼体了。其实这些看起来像是幼体的磷虾不是真正的幼体,仍然是成体。不过并不是所有区域的磷虾在冬季都会发生负生长,即使发生了负生长,不同区域和不同年份的负增长程度也不一样,这一切取决于当年的环境条件。如何鉴定南极磷虾是否出现了负生长、负生长的程度有多大、如何鉴定南极磷虾的年龄等方面的问题牵扯到南极磷虾资源补充的评估,而且很难找到其矫正系数。在对这些问题的研究上,我国科学家做出了在国际上很有显示度的工作,揭示了南极磷虾的秘密。其秘密就隐藏在南极磷虾的复眼中。南极磷虾的复眼由约 8000 个小眼组成,随着年龄的增长,小眼的数目也在发生变化,但是不会随着磷虾负生长而发生变化。进一步的研究发现,南极磷虾的复眼直径也不会随着负生长而发生改变。我们利用南极夏季获取的磷虾复眼中的小眼数目与体长之间的比率做出一个正态曲线,然后用不同季节和区域内的获取比率进行对比,就会推算出磷虾是否产生了负生长以及磷虾的原始大小,利用复眼直径与体长之间的比率也能获取相同的信息。通过对同一区域不同年份的数据对比,可以获取南大洋环境的年际变化信息;在同一年度对不同区域的数据进行分析,还能够获取地区环境变化信息。因此,我们利用这种方法成功地将南极磷虾作为南极环境变化的指示物种。

自南极磷虾之巨大生物量被人类认识之后,科学家就一直在探索如何将南极磷虾作为一个具有商业开发价值的捕捞对象。南极磷虾的捕捞业起始于 20 世纪 70 年代,在 80~90 年代鼎盛时期每年的捕获量曾经达到 50 万吨,其中 90% 被苏联捕获。由于当时苏联实行的不是市场经

济，而是作为一种政府行为，所以无法了解其经济效益。在过去的5年里，南极海洋生物资源保护委员会（Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources）中的8个成员国开展了南极磷虾的捕捞，其中捕捞最多的国家是挪威，占全球磷虾捕捞总量的58%，其次是韩国（19%）和中国（10%）。而磷虾的年捕捞量也从2010年的20万吨上升至近两年的30万吨。为了更科学和合理开发利用南极磷虾资源，需要基于磷虾种群变动模型设置捕获上限。最大捕获量是通过改变磷虾种群变动模型中一些基础信息参数，如多少磷虾进入种群、磷虾生长率为多少和多少磷虾保持存活，经过上千遍的重复计算得出结果。这个模型可以得出磷虾种群在将来一段时间的种群数量阈值，从而可以指导不同区域的捕捞限度以保证南极磷虾种群的可持续发展。目前，磷虾捕捞集中的大西洋扇区的捕捞上限是每年560万吨。

南极磷虾在网中很容易被压碎，同时其体内的消化酶在磷虾死亡后会短时间内将自身组织分解，因此捕捞结束后需要尽快对样品进行加工处理（1~3小时）。尽管磷虾产业强调为人类提供高质量蛋白的潜在巨大价值，但南极磷虾将来是否可以作为人类的直接食物取决于能否有效地移除磷虾体内的大量氟化物，目前磷虾渔业产物主要用于水产业（鱼饵）和人类的健康品（磷虾油）。过去人们担心的南极磷虾渔业会出现大发展的局面并没有出现，其中一个重要原因是南极磷虾的利用和捕捞成本上的问题。

从另一方面来说，磷虾的个体并不大，它的肉加工出来就像煮熟的米粒一样，口感也并不是特别好；考虑到捕捞和加工的成本，磷虾的价格不能太低；同时，考虑到近海渔业资源的成本和口感，如与对虾、龙虾和鹰爪虾等相比较，南极磷虾并不具备竞争力。南极磷虾的另一个重要用途是做成虾粉作为鱼类饵料，由于磷虾体内氟的含量比较高，即使作饵料也超标，但是饲养鲑鱼



的效果很好。不过，考虑到一般鱼粉的价格和近海磷虾资源的竞争力问题，从价格上其竞争力也不是很大。现在比较有利可图的是南极磷虾油，其市场价格比较高，有较好的经济价值，但是一旦数量增多之后，市场价格必然下滑，而磷虾的捕捞和加工的费用并不会减少，利润空间也就比较小了。

还有一个重要的因素是在南大洋渔业作业时间相对较短，只能在南极的夏季作业。因此在过去的几十年中，很多公司兴致勃勃地到南极开展捕捞磷虾的活动，最终都由于无利可图而放弃。对南极磷虾捕捞的另一个限制是渔区的划分，尽管南极磷虾的储藏量很大，人类的捕捞量只是其中一小部分，目前来看还不会对南极磷虾资源造成破坏，但并不是整个南大洋都适合捕捞作业。如果集中在几个磷虾密集区进行捕捞的话，南极磷虾资源照样会受到很大影响，所以南极生物资源保护组织对南极的渔业活动有严格限制规定的。

确定合理捕捞量关系到南极磷虾资源的保护。目前，人们最担心的事情是一些捕捞者不按照市场规律办事，用政府的补贴而开展大规模的南极磷虾捕捞活动，那样会迫使南极生物资源保护组织出台更严格的管理制度，甚至引起国际纠纷。因此对南极磷虾的综合开发利用进行系统探索，研究获得市场认可的开发模式，是保护南极生物圈的基石——南极磷虾的关键环节。

本文作者系中国科学院海洋研究所研究员



南极鱼类——冰海里演化出的奇迹

文、图 / 陈良标

2011年1月，南半球的夏天，我国南极中山站近海，海冰还未消融。在离岸几百米的地方，几位考察队员铲去地上的浮雪，用铁钻钻透1~2米的厚冰，形成一个直径不足10厘米的冰洞，或者干脆找一个冰裂隙，垂下鱼钩和鱼线。等待不超过10秒钟，鱼竿上就会传来明确的拖拉和抖动的感觉，收起鱼线，鱼钩上总会挂着一条重约100克、体色稍黄、世界上除了南极海域外都不可能有的特殊鱼种——伯氏肩孔南极鱼（南极100多种鱼类中的一种）。如果线上有两个钩，多数情况下会有两条鱼等待着我们将其从鱼钩上解脱下来。那小小的冰洞，赋予我们在海钓时如同探囊取物般的捷径。这是我在南极中山站第一次冰钓的感觉：鱼多且傻。事实上，千万年以来

在这个冰冻的海洋里，演绎着一段段鱼类适应性进化的传奇……

南极海洋的地理变迁

2亿多年前，南极大陆与非洲、南美洲、澳大利亚、印度和阿拉伯半岛还没有分离，都属于超级大陆——冈瓦纳大陆的一部分。大概在9000万年前的中生代晚期，剧烈的板块活动使冈瓦纳大陆逐渐解体，东南极大陆和澳大利亚大陆开始分离。大约3800万年前，西南极大陆与南美大陆最后分离，南极大陆从此定位于目前基本环绕地球南极点的地理位置。在此过程中，南极大陆的气候逐渐变冷并开始被厚厚的冰雪覆盖。大约2500万年前，伴随着德雷克海峡的打开，环绕南

极的洋流逐渐形成。作为世界上最强的、直达海底的海洋环流——南极绕极环流，在一定程度上阻碍了南极海域与其他海域的热量交流，使环流内部海域的水温逐渐降低。从南极大陆边缘到南极环流带之间的广袤海洋，大约有 3500 万平方公里（10% 的世界海洋面积），大部分海洋季节性地被冰层覆盖；而在接近南极大陆的海域，即使在夏季海冰也不会融化。

随着海水温度的降低并最终冰冻，原本生活于南极大陆周边的古老的海洋动物类群，包括大多数中生代时期的鱼类走向了灭绝，只有极少数能够适应极端环境的独特生命形态存留下来。南极鱼类在这个冰冻海洋里是生态链中非常重要的一环，许多大型生物，如海豹和企鹅，以此为生。

南大洋鱼类组成和演化

南大洋虽然在面积上占全球海洋的 10%，但其中的鱼类种数仅占全球鱼类总种数的 1.3%。与其他冷水性海域（如北大西洋）相比，南大洋的鱼类显得稀少，特别是近表层鱼类更为缺乏。现代南大洋的独特鱼类区系是在寒冷和隔绝的地理环境下生物演化的结果。根据南极科学研究委



伯氏肩孔南极鱼

员会生物多样性信息网络最新的统计资料，截至 2013 年，南大洋共发现鱼类 357 种。生活在中层的主要为灯笼鱼科种类，因其身体上有形似灯笼、能发出晶莹光亮的发光器而得名。南大洋的灯笼鱼有 33 种，数量最为丰富的是南极电灯笼鱼。随着水深的增加，鱼种类增多，甚至在水深 2000 米处都有鱼类生存。底栖物种主要包括南极鱼亚

目、鳕形目鳕科、鲱目鲱科、鲉形目狮子鱼科和绵鳚亚目绵鳚科鱼类，其中种类最多的是南极鱼亚目、绵鳚科以及狮子鱼科，占南极鱼类种数的 87.8%。南极鱼亚目由一个营底栖生活的温带祖先在南极变冷的过程中演化而来，为南极海域的原始种；而狮子鱼科起源于北太平洋，推测可能是在中新世由南美洲西海岸扩散至南极地区；绵鳚科也起源于北太平洋，是在中新世进入南半球，之后扩散至南极地区。

南极鱼亚目鱼类与石斑鱼和海鲈鱼等同属鲈形目。南极鱼亚目的祖先在南极逐渐变冷的过程中快速演化，并且由于生存的小环境缺乏明显的竞争压力，其种群得以壮大，是现代南极鱼类区系中占绝对优势的鱼类种群。它们占有南大洋鱼类总数的 46%，而在高纬度更加寒冷的南极海域，这种优势更加显著——种类数不仅为其他南大洋鱼类种数的 3 倍左右，其丰度和生物量也占到南大洋鱼类丰度和总生物量的 90% 以上。

据统计，南极鱼亚目鱼类共有 8 科 129 种，其中龙躄科、阿氏龙躄科和裸南极鱼科、大多数鳕冰鱼科的种类、半数的南极鱼科等共 100 多个种，分布在极端低温的南大洋。牛鱼科、拟牛鱼科和油南极鱼科的 20 多个种生活在温度为 5 ~ 15℃ 的南美洲和新西兰等非南极海域。通过检验线粒体 DNA 的序列，人们可以了解各种生物之间的亲缘关系。科学家通过 16S rRNA 序列构建了南极鱼亚目各个科之间的亲缘关系：裸南极鱼科、阿氏龙躄科、龙躄科和鳕冰鱼科的成员聚为一支后再与南极鱼科的成员聚在一起，这 5 个科共同构成了南极鱼亚目鱼类在南大洋的主要演化分支。而其他 3 个科属于原始南极鱼亚目鱼类，基本处于南极环流之外，生活于温暖的海域。

受环境因素和食物的季节变化影响，南极鱼类的体型普遍较小，多数种类生长缓慢，但是也有个别鱼种的成年个体可达 90 公斤左右，如南极犬牙鱼，因此也成为南极海域被偷猎的重要目标。

南极各科鱼类体型和生理特征变化较大，因此南极鱼亚目鱼类被认为是海洋鱼类中少有的发

生适应性辐射演化的类群。如，裸南极鱼科为肉食性的浅海底栖种类；阿氏龙躄科的种类常年营固着生活；龙躄科的种类生活的水深跨度巨大，有的能在浅水区域生活，也有如断线渊龙躄生活的最深水层可达 2950 米；鳄冰鱼科的特点是鱼体呈梭形，头部较大具有类似鳄鱼一样的嘴巴。由于其下颌骨缺失，使得作为取食器官的口不能有效地开合，靠吮吸甚至仅靠水的自然流动将食物送进嘴里，因此几乎无营底栖生活的种类，大多数个体生活在水深 800 米以上。南极鱼科有较大的水层分化：约有一半为底栖种，还包括半浮游种和浮游种类等，不同活动范围的鱼类所受浮力不同。该科种类缺乏鱼鳔，必须通过降低骨骼的矿化和脂质沉淀来调节鱼体密度。例如，南极犬牙鱼因为骨骼钙化程度的降低和特殊皮下脂肪的存储，使其身体的比重下降到与海水相似，中性浮性（浮力分为正、负和中性浮力）的演化让它们能够不靠游泳而悬停在海水的任何深度，从而降低能量的消耗。这一点被认为是底栖物种向中层和表层生存空间演化的一个重要适应。

白色血液的鳄冰鱼科

南极鱼亚目中受到特别关注的是鳄冰鱼，这是南极环境孕育出的非常独特的种类，它们在南极海域的出现和繁衍以鲜活的实例见证了达尔文适者生存的生物演化理论。

南极鳄冰鱼的独特之处在于其在演化过程中丢掉了所有脊椎动物都赖以运送氧气的血红蛋白，在此基础上，其他动物血液中含有丰富的血红细胞在鳄冰鱼中也极少，因此相对于其他鱼类暗红黏稠的血液，冰鱼的血液呈白色稀释状态。其运输氧气的能力只有其他鱼类的 20% 左右。丢失这种生命中的关键蛋白质，对其他动物则意味着死亡，但是在南极温度极低但稳定的海洋里，水中氧气的含量丰富，冰鱼科的 16 种鱼类通过一系列的生理变化存活了下来，而且成为南极海域存量相当丰富的物种，其中的裘氏鳄头冰鱼还是南极海域的重要渔业物种。

伴随血红蛋白和血细胞的丢失，鳄冰鱼在心

血管系统上和骨骼发育上发生了显著的变化。它们的心脏比其他有血红蛋白的南极鱼类大 2 ~ 3 倍以上，毛细血管更加发达，因此心脏血液的搏出量是其他鱼类的 2 倍以上，血管通透性增加。这些变化使其氧气输送的低效率得到部分的缓解，从而保证了其生理需要。这些独特的鱼类为人类研究心血管疾病提供了非常独特的自然产生的模型。另外，这些鱼类的骨骼与很多其他南极鱼类一样，钙化程度较低，这一点或许也能为人类的骨质疏松疾病研究提供动物模型。

显而易见，这些鳄冰鱼科的鱼类也许不能像有血红蛋白的鱼类一样可以忍受海水氧气的变化，当海水的氧含量因海水温度升高而降低时，鳄冰鱼的命运很可能受到挑战，成为全球升温的牺牲品，这是值得研究南极生物的科学家的一个问题。

南极鱼类抵抗冰冻的分子武器

一个多世纪以来，世界上许多科学家登上南极，对南极鱼类为什么能在终年冰冻的环境下生存和繁衍进行不懈的探索，其中有一个问题是：科学界当时知道的所有鱼类血液的冰点是 -1°C 左右，而靠近南极大陆海洋的海水温度常年在 -1.9°C ，为什么它们不会被冻死，反而能把冰冷的海域当作家园？20 世纪 60 年代，当时还是博士研究生的阿瑟（Arthur L. DeVries）首先在南极鱼亚目的鱼类血液中分离到了一种其他鱼类所没有的蛋白，这种蛋白可以降低鱼类血液的冰点，使南极鱼类血液的冰点再向下延伸了 1°C ，从而使这些鱼的体液保持在液体状态，这种蛋白经过化学成分的分析后发现是一种带有糖基结构的蛋白质，所以命名为抗冻糖蛋白。这种蛋白能够吸附到冰晶上面，阻止水分子进一步与冰晶的结合，抑制冰晶的生长，从而降低冰点。自从抗冻糖蛋白被发现后，科学家又在极地鱼类中发现了其他种类的抗冻蛋白，例如在北极的鲱鱼中发现了 I 型抗冻蛋白，在杜父鱼中发现 II 型抗冻蛋白，在南、北极的绵鲷科鱼中发现 III 型抗冻蛋白等。这些抗冻蛋白都是在成体中发挥作用，而鱼类都是体外受精体外发育的动物，受精后的鱼卵完全

暴露在环境中。那么,南极鱼卵在不合成抗冻糖蛋白的情况下,为什么能抗冻?笔者不久前在实验室研究发现,其原因是包围这些鱼卵的卵壳蛋白在结构上发生了改变,获得了一种能促进冰晶融化的功能,从而使这些鱼卵更抗冻,保证它们的后代能在海冰环境下正常孵化。这是生命演化的神奇所在。

鉴于这些蛋白的抗冻功能,它们的编码基因已经被克隆出来,有的已经转移到动物和植物个体中进行试验,用以检验它们是否能提高受体生物的抗冻功能,在一些作物,如马铃薯和西红柿上,已经有良好的表现。III型抗冻蛋白基因的启动因子被用来驱动鱼类的生长激素基因转移到原来没有这种基因的三文鱼中,使冬天不能生长的三文鱼能够克服低温照样生长,从而提高三文鱼的产量,其品种已经在美国批准上市。除了利用其改进不抗冻品种的抗冻能力,抗冻蛋白在医学器官、精子和卵子的保存、食品加工和食品的低温保存等领域都有良好的应用前景。

认识地球生命演化的独特窗口

地球环境在不断的变化之中,大陆可以漂移,高山可以隆起,生命的演化过程就是适应这些变化的过程。南极鱼类生活在冰冻和隔离的环境中,为我们追踪大陆漂移和气候变冷对生命过程的影响提供了一个天然的生态系统。

在环境的选择压力下,生命可以创造出原本没有的蛋白质,如抗冻糖蛋白。研究表明,南极鱼类的抗冻糖蛋白基因,是从一个原来就存在的蛋白降解酶基因的一小段没有编码蛋白质功能的DNA,通过扩增和剪切而得以产生的,这是一个在原有基因框架下新基因起源的例子,而最近发现的南极鱼卵抗冻能力增加的演化不涉及新基因的起源,而是对原有基因进行改造,获得新功能的分子演化过程。

要想生活在南极,除了需要抑制冰晶在体内和卵内生长外,还需要生理过程可以在低于0℃的环境下正常运行。因此,南极鱼体内的诸

多蛋白质发生了适应性演化,一些参与新陈代谢和调节铁离子代谢的酶类通过增加分子柔性以降低活化能,从而可以在低温下与其他分子结合。微管蛋白在维持细胞形状和功能上具有不可替代的功能,但是温带鱼类和其他动物的微管蛋白在4℃时就会解聚并丧失正常功能,而南极鱼类的微管蛋白可以在0℃下继续发挥功能。诸如此类的功能性适应的例子还有很多,只是这些现象背后的机制还有待我们去探索。

除了“获得”一些新功能,长期生活在稳定低温和氧气充足的环境下的动物也因此可以丢掉一些基因和过程。如生活在高纬度南极海域的物种已经失去了其他动物的热应激反应,即提高温度不能引起常规的热应激反应;而像鳄冰鱼科的鱼类完全丢掉了运输氧气的血红蛋白。这些基因的缺失在南极特殊的生态环境中显然没有坏处,在某种情况下可能还有好处,如血红蛋白和血红细胞的消失显然可以减低血液的黏稠度,从而减低血管堵塞的风险,同时减少血细胞生成和运输所需的能量。在南极这个食物季节性匮乏的生态体系中,无疑对个体的生存是大有裨益的。

结束语

南极鱼类是自然界馈赠予人类的了解生命演化和生命与环境关系的一个窗口,其独特的演化历史以及这个历史过程映射出来的生物对环境适应的各种机制,可以为人类利用自然和保护自然提供机会。人类目前的技术手段已经能够在短时间内破解负责运行这些生命过程的基因组成和结构,从中追溯演化的历程,揭示大自然留在这些鱼中的印记,并找到对人类有益的基因和机制。但是在全球变暖的时候,这些存续了千万年的环境因子可能消失,而南极鱼类的生存将受到威胁。因此,在这些灾害还未发生之前,人类的任务除了探究隐藏在南极鱼类中的秘密之外,还要保护好大自然的这份厚礼。伴随“雪龙”号每年起航的笛鸣声,我国科学家正在为保护与和平利用这份自然遗产奋力前行。

本文作者系上海海洋大学教授



南极四季话鸟兽

文、图 / 吴福星^① 张正旺^②

南极地区生活着地球上最奇特和最耐寒的动物，如呆萌的企鹅、笨笨的海豹和神秘的鲸类。作为南极科考队员，我们虽然经历了暴风雪的非凡艰险，但也享受过一些独一无二的人生体验。在长城站考察期间，我们在有幸见识到常人无缘得见的瑰丽风景的同时，也深深地被南极动物的生存之道所震撼。南极的冰天雪地孕育了生命的

奇迹，苍穹之下，人与动物共享蓝天。

长城站所在的菲尔德斯半岛是乔治王岛最大的无冰区，也是南极地区科学考察站分布最为密集的区域。除了中国长城站外，还有智利站、俄罗斯别林斯高晋站和乌拉圭阿蒂加斯站。隔海相望，还有韩国考察站。



一年的考察，使我们有机会对长城站地区不同季节的鸟兽动态有了一个全面的认识。下面就带大家一起来领略这些奇妙的、四季中的南极动物。

极地之春

经历数月的黑暗之后，南极终于在春天迎来了久违的阳光。温暖让生命重新回到这片神奇的冰雪世界。透过宿舍的窗户放眼望去，9月的南极，海面依旧被大面积的冰雪覆盖，白茫茫一片。借助望远镜仔细在冰面上寻找，会发现远处时不时地有些小黑点在蠕动。没错，那就是我们要寻找的企鹅。现在，该到它们准备繁殖的季节了。

- 企鹅是一个特殊的、不会飞翔的海鸟类群，
- 它们起源于 6500 万年前。全世界现存有 6 属 18
- 种，全部分布在南半球。我们在长城站附近共记
- 录了 6 种企鹅，分别是白眉企鹅、阿德雷企鹅、
- 帽带企鹅、帝企鹅、王企鹅和长冠企鹅。前三种
- 企鹅在长城站附近有繁殖地，所以经常能见到；
- 帝企鹅和王企鹅属于长城站地区的过客，偶尔出
- 现时会给我们带来惊喜；数量最少的是长冠企鹅，
- 几年才露一次面。

春季，我们还能看到威德尔海豹用其锋利的牙齿，在冰面上啃出一个个冰洞，然后伸出小而圆的脑袋，尽情地呼吸。作为南极特有的海豹之一，这种海豹通常每年的 9 ~ 11 月在冰面上繁殖，繁殖时间与其栖息的纬度有关，纬度越低，繁殖

菲尔德斯半岛是南极洲的低纬地区，具有海洋性气候特点，温度相对南极其他地方来说较高。这里年平均气温为零下 2.8 摄氏度，夏季的温度经常在零摄氏度以上，因而为各类生物的生存和生长提供了良好条件。在这里，苔藓、地衣随处可见，禾本科的南极发草也是星罗棋布，更为壮观的是大批鸟兽在这里繁殖栖息。以往我国科学家对南极鸟兽的研究主要是在夏季进行的，对其他季节下动物的状况了解不多。在国家海洋局极地考察办公室的安排下，我们在这里开展了为期



威德尔海豹母子



帽带企鹅



白眉企鹅与雏鸟

时间越早。小海豹刚出生时，腹部会保留有一大截脐带，需要 1 ~ 2 周的时间才会完全脱落。海豹的胎盘和脐带往往成为其他鸟类的“盘中餐”。在小海豹出生现场，通常跟随着几只白鞘嘴鸥和黑背鸥，小海豹也经常会受到它们的骚扰和啄食。当然，一向温顺的母亲这时会张开大嘴，发出“突突突”的声音以示警告。在母亲的悉心照顾下，小海豹的体重增长迅速，每周增重 10 ~ 15 公斤。在断奶时，其体重竟然能长到 110 ~ 140 公斤。

在威德尔海豹繁殖的同时，大批的海鸟正在陆陆续续地重新返回菲尔德斯半岛。为了吸引配偶，雄企鹅早早地来到繁殖地筑巢；花斑鹱正在集成大群，尽情享受冰面融化后大海馈赠的盛宴；贼鸥的归来为原本和平的世界带来一丝丝敌意；南极燕鸥那嘹亮的声音重新在南极的上空回荡。断奶后的小海豹显得肥肥胖胖，接下来它将独立生活，与鸟儿们一起迎接南极最佳的生存时间——夏季的到来。

极地之夏

随着夏季的来临，菲尔德斯周围进入了另外一个童话般的世界：在蓝天、白云和阳光的共同装扮下，远处静默的冰盖闪闪发亮；海面上漂浮着各种奇形怪状的浮冰，在清澈如眸的碧水映衬下，有的晶莹剔透得像宝石，有的闪耀着灵异深邃的蓝光。海湾的积雪正在融化，形成了一条条临时的小溪，出露的苔藓给这里增添了一丝丝绿

意。融化的冰面、延长的白昼和温暖的气温，诱使大批鸟类来到这里栖息，同时也为它们接下来即将上演的终生大戏作好充分的准备。它们要抓紧利用这短暂的夏季完成整个繁殖过程：寻偶、交配、筑巢、产卵、孵化、育雏，直至完成换羽。

逐渐好转的天气，为南极的科考迎来了黄金季节。在接下来的日子，我们将踏遍整个南极菲尔德斯半岛，对这里的鸟类和兽类开展种类、分布、繁殖状况以及它们对栖息地的选择等方面的研究。

在长城站所处的菲尔德斯半岛，时不时地能碰到一些非繁殖鸟类，如蓝眼鸬鹚和北极燕鸥等，更多的则是繁殖鸟类。我们共记录到十多种，包括阿德雷企鹅、帽带企鹅、白眉企鹅、黑背鸥、南巨海燕、花斑鹱、南极燕鸥、棕贼鸥、灰贼鸥、黑腹风暴海燕和威尔逊风暴海燕等。

为了保证后代的存活率，这些鸟各自使出了浑身解数。风暴海燕为了避免被贼鸥等其他鸟类捕食，通常选择在黄昏后才返回繁殖地，并用鸣叫来呼唤同伴；企鹅往往集体营巢来应对贼鸥等天敌的捕食。当然，贼鸥为了方便攫取食物，索性将巢建在企鹅繁殖地旁边的苔原上。南极燕鸥营地面巢，其卵往往与环境背景色相似，不易被天敌发现，起到很好的保护作用。



成年白眉企鹅在喂食小企鹅



练习游泳的威德尔小海豹

长城站东面的阿德雷岛，很多人称其为“企鹅岛”，每年有上万只企鹅在这里繁殖。其中数量最多的当属白眉企鹅。白眉企鹅又名金图企鹅，体长 60 ~ 80 厘米，重约 6 公斤，身体除了黑白两色之外，嘴角橘红色，脚橙黄色，在其眼睛上方有道明显的白斑。白眉企鹅常年以磷虾、乌贼和鱼类等为食。另外一种常见企鹅是帽带企鹅，因颌下有一条黑色条纹而得名。每到繁殖季节，在企鹅岛的东面和南面，“漫山遍野”都是企鹅，许多个体有时候为了寻找一个合适的筑巢地点，需要从海边步行超过 1 公里爬到山顶。对于一种脚大腿短的鸟类来说，这可是一次艰苦的旅程。

企鹅喜欢集群生活，大的繁殖地可以有数万甚至更多的企鹅一起毗邻而居，营巢产卵。它们的生活并不总是像画面中描述的那样和谐美好。由于企鹅的巢密度很大，它们常相互挤作一团，邻居间的争吵随时可能爆发，打架斗殴也很常见。但是一旦有贼鸥进入领地，所有的企鹅都会大声鸣叫，共同防御外敌的入侵。

大多数白眉企鹅对配偶终身忠诚，它们的求爱仪式是相互低头鞠躬，似乎在重申着它们的海誓山盟。白眉企鹅的巢主要由小碎石组成。筑巢时，它们有时会为了一块小小的石子而大打出手，甚至有些个体在光天化日之下偷抢邻居家筑巢的小石子。这些企鹅通常在 11 月产下 2 枚卵，父母亲必须轮流守护全天，在保持卵的温度的同时，

谨防贼鸥等掠食者的抢劫。2014 年夏季，我们在野外调查时经常发现贼鸥在企鹅繁殖地上空盘旋，然后突然从空中俯冲进入，叼起一枚企鹅蛋后迅速离开。即使成功出壳，雏鸟也必须克服众多艰难险阻，才能存活到成年。毛绒绒的小企鹅需要亲鸟不停地喂食和保护，通常要 2 个多月才能下水。来自贼鸥等天敌的捕食、食物的不足以及疾病等都可能夺走其幼小的生命，甚至下海练习游泳时都可能成为豹形海豹和虎鲸的猎物。在企鹅岛周边，常年有豹形海豹出没。我们在夏季曾经见过豹形海豹捕食企鹅的场景，场面十分惨烈和残暴。除此之外，石油污染、过度捕鱼、气候变化以及南极旅游等，也正在给它们的生存带来新的威胁。

极地之秋

对于极地的动物来说，秋天意味着激烈的战斗和大规模的迁徙。这时候，当年出生的个体往往跟成年个体聚在一起，抓紧最后的时间进食、休息，为接下来的旅途作好充分的准备。

在长城站附近的山地溪流边，我们曾拍摄到小群的北极燕鸥。这种在北极繁殖的鸟类跨越万水千山，来到遥远的南极沿海越冬。漫长的迁徙之旅，其强大的飞行能力一直为人们津津乐道。而有关这种鸟类为什么在一年之内往返奔波于两极之间，它们是如何导航和定向的，至今还是尚未有答案的科学奥秘。

在菲尔德斯半岛，经常能看到大群的南巨海燕和黑背鸥活动于长城湾和阿德雷湾附近。有时候大群中也会混杂着其他鸟类，例如比较少见的银灰管鼻鹱。随着大量鸟类的北迁，尤其是贼鸥的离开，长城站也迎来了新的客人——白鞘嘴鸥。白鞘嘴鸥体长 40 厘米左右，翼展约 80 厘米，翅膀上所有羽毛均为白色，是一种以食腐为主的鸟类。它们将伴随在南极越冬的科考队员们，在这里度过漫长的冬季。

菲尔德斯半岛的所有站区几乎都生活着数只白鞘嘴鸥，它们经常偷食站区的食品或垃圾。在野外，也观察到它们捕食一些小型的鱼类和磷虾，也会吃一些潮间带的藻类。由于它们经常活动于站区，因此被南极科考队员称为“站区宠物”。

在野外调查过程中，我们也记录到有些繁殖还未结束的鸟类个体。4 月中旬，我们曾在平顶岩半岛拍摄到一只成年南极燕鸥，仍在用磷虾喂养它的雏鸟。

进入 5 月以后，南极的气温变得越来越低，风力也越来越强，下雪的频率和雪量明显增加。

当年出生的动物早已跟随父辈加入北迁的长征当中。能见到的动物也变得越来越少，因为南极的冬季马上就要来临了。

极地之冬

6 月初，菲尔德斯半岛的气候还不算太糟糕。气温通常在零下 10 摄氏度左右，尽管海面开始结冰，但对南极这些坚强、隐忍的动物来说，还没到完全离开的时候。

活动在长城站附近的花斑鹱、巨海燕、蓝眼鸬鹚、黑背鸥和南极燕鸥等鸟类，尽管数量上减少了不少，但还是经常能见到。在野外科考过程中，最令人兴奋的是在这个季节见到了一大群南极雪燕，这在前几个月的调查过程中可是很少目击的。

南极雪燕是一种纯白色的小型海燕，有着显著的黑眼睛、黑色的喙和蓝灰色的脚。这种鸟几乎仅生活在寒冷的南极水域，往往成群地栖息在冰山周围。它们有着像蝙蝠一样看似无序的飞行轨迹，在距海面大约 10 米的高度迅速拍打翅膀，有时又停留在碎冰区觅食磷虾等。在没有贼鸥捕



聚群的花斑鹱

随着南极人类活动的增加，外来病原体给当地生物带来的风险不可忽视。然而在此方面针对企鹅的研究远远不够，这需要开展协调一致的行动，以获取相关基础数据，同时加强病原体的监测跟踪工作。

编译自 Wray W. Grimaldi 等 2015 年发表于《极地生物学》期刊上的论文

食的日子里，它们可以尽情地玩耍。南极雪燕小而优雅的身姿深深地吸引着我们，让我们迟迟不愿回站。

随着时间的推移，南极的气候变得越来越恶劣。连续的大雪纷飞、狂风大作是常有的事。海面逐渐被冰覆盖，配合阴沉的浓雾天气，仿佛有

远古时期大自然冰封的气息。

对于极地生物来说，没有什么时候比现在的考验更大了。在菲尔德斯半岛，温度有时直降至零下 30 摄氏度左右，风速有时能达到每秒 30 米。每天只有 2 ~ 3 个小时的白天，只有少数生物能在这里生存下来。



白鞘嘴鸥



南巨海燕雏鸟



蓝眼鸬鹚

隆冬之际，长城站所处的长城湾的海面早已被冰雪覆盖。此时的菲尔德斯半岛也并非死寂沉沉。在冰面的边缘经常能看到几只豹形海豹或食蟹海豹在那里活动。威德尔海豹经常从冰裂缝或者自己啃出的冰洞爬到冰面来休息。而在海湾的积雪上往往能找到几只正在休息的南象海豹以及南极毛皮海狮。它们无视南极的风雪，悠闲自得。

在野外调查过程中，偶尔也能碰到几只白眉企鹅，稀稀拉拉地趴在雪地上，任由飘落的雪花慢慢积累在身体上。南巨海燕和黑背鸥的留鸟偶尔也会从空中飞过。只有白鞘嘴鸥还比较活跃，跟随着我们的步伐，陪我们走上一程。

冬天来了，春天还会远吗？整个南极的冬季在冰天雪地中积蓄着能量，为开春的繁荣作好充分的准备，熬过冬天之后，南极又将恢复欣欣向荣的景象。那些当年出生的动物，在经历风雪之后，俨然已成为这片南极洲的新主人。

光阴似箭，日月如梭，一年时光很快就过去了。南极的动物又将进入一个新的生命周期。从陆地到海洋，它们来来往往，各显神通，与南极恶劣的自然条件进行着较量，世代代在这片神奇的世界里生存繁衍，周而复始地适应着南极生态系统的演变。

本文作者系北京师范大学①博士②教授



菲尔德斯半岛的海豹和海狮

文、图 / 祝茜

海豹、海狮和海象的前后肢颇像鱼类的鳍，因而被统称为鳍足类或鳍脚类动物。目前，全世界共有鳍足类动物 34 种，隶属于 3 科 18 属；南极地区分布有 6 种，分别为威德尔海豹、豹形海豹、罗斯海豹、食蟹海豹、南象海豹和南极毛皮海狮。其中，威德尔海豹、豹形海豹、罗斯海豹和食蟹海豹是南极地区的特有种。

由于鳍足类动物的皮毛美丽而富于光泽，御寒和防水性能极佳，十分珍贵，过去常被人类用来制作皮衣、皮帽和皮被褥等。自 200 多年前英国的詹姆士·库克（James Cook）船长报道了南极鳍足类动物的情况后，英国和德国等先后派遣了众多装备精良的海豹猎捕船，争先恐后地去到南极展开一场场血腥的大屠杀。



的顶端且数量巨大，它们为大、中、小各个尺度的生态学变化的时空研究提供了可能。在南极地区，鳍足类动物作为陆地和冰面上最大的哺乳动物，其分布和数量的变化直接影响着作为初级生产者的南极磷虾、头足类、鱼类甚至企鹅数量，是南极生物圈中举足轻重的一环。因此，对南极生态系统中鳍足类动物的生物学和生态学的研究将具有重要的科学意义和潜在的巨大经济价值。此外，南极的鳍足类动物对研究全球环境变化亦起着重要的作用。南极海豹群数量的波动、增长模式和生活史，均可作为考察大范围空间及大跨度时间内所发生的环境变化的信息源。南极海豹作为碳的处理者，在碳源的使用（代谢产物和食物），碳的转换率以及最终分解位置方面（如通过呼吸作用进入大气或者经微生物循环返回生态系统），有可能对生态系统的动态，特别是对气候或生态改变引起的光合作用固碳向食物链上层传输的碳通量变化十分敏感。所以，南极鳍足类动物可以作为南大洋环境和生态系统变化最敏感的指示物种。南极作为唯一归属未定和未开发的处女地，是研究鳍足类动物的天然理想场所。

1984年，我国在南极菲尔德斯半岛建立了第一个常年科考站——长城站，并对该地区开展了多学科的研究，取得了一系列丰硕的成果，但有关鳍足类动物的研究则几近空白。为此，受国家海洋局委托，笔者曾于2011～2012年参加了中国南极第28次科考。我们此行最主要的目的是建立一个南极海洋哺乳动物的监测站。随后，研究团队中的妙星和吴福星又分别参加了中国南极第29次和第30次越冬科考，对中国南极长城站所处的菲尔德斯半岛的鳍足类动物开展了相关研究。

为了有效地保护南极地区的鳍足类动物及其生态环境，1972年，南极条约协商国共同起草了《南极海豹保护公约》(CCAS)，于1978年正式生效。此外，南极鳍足类动物也受《南极生物资源保护公约》和《关于环境保护的南极条约议定书》等的保护。南极的鳍足类动物虽然只有六种，但生物量却十分巨大，仅南极浮冰区就生活着全球50%以上的海豹，而它们的生物量则约占全球总量的80%。因为海豹处在南大洋食物链

菲尔德斯半岛地处乔治王岛的西南部，面积约40平方公里，位于南纬 $62^{\circ}08'$ ～ $62^{\circ}14'$ 和东经 $59^{\circ}02'$ ～ $58^{\circ}51'$ ，是乔治王岛最大的一个无冰覆盖区，拥有长城湾、阿德雷湾和生物湾等20多个大小不一的海湾。这里的海岸线狭长，非常适合鳍足类动物上岸换毛、休息或繁殖。其中，南象海豹、豹形海豹、威德尔海豹、食蟹海豹和南极毛皮海狮在此地常年有分布。该半岛的西海岸以岩屑或砂质地为主，夏季栖息着众多的

南象海豹和南极毛皮海狮；冬季被冰雪覆盖，有南象海豹和威德尔海豹上岸繁殖。该半岛的东面，是食蟹海豹休憩和威德尔海豹上岸繁殖的场所。此外，该半岛气候相对温和，科考站密集，游客众多，是南极地区受人类干扰最严重的区域之一。

对于南极长城站周围经常出现的三种鳍足类动物，笔者作一简单介绍，以飨读者。

打孔巨匠——威德尔海豹

威德尔海豹的属名 *Leptonychotes* 来自希腊语，意为细小的爪，是指其后肢的爪小。种名 *weddellii* 是由英国南极探险家詹姆斯·威德尔（James Weddell）于 1822 ~ 1824 年首次南行到威德尔海所命名。威德尔海豹的身体呈浅灰色，体侧点缀着大小不一的白色斑点；头圆而颈短，没有外耳廓；眼大而圆，显得炯炯有神；口总是呈“微笑”状，十分惹人喜爱。其体长 3 米左右，

口臭，而放的屁更是臭气熏天！

在南极的无冰时节，动物浮到水面就可轻而易举地呼吸；然而，到了寒冷的冬天，冰面上不时有狂风暴雪，海面全部封冻，威德尔海豹只好选择相对比较温暖、黑暗的水下生活。由于哺乳动物必须在空气中获得氧气，因此威德尔海豹依靠锐利的牙齿，硬生生地在冰面上凿出一个圆圆的呼吸孔来确保呼吸。之后还需要不断刮擦、啃咬以保证呼吸孔畅通无阻，否则，呼吸孔被海冰冻结会导致海豹窒息死亡。呼吸孔不仅是海豹呼吸和进出海水的门户，而且也是科学家进行南极地区海洋环境监测和研究的绝佳场所。科学家利用这些呼吸孔来采集海水样品或将仪器设备放入孔中，进行深海监测。因此，威德尔海豹也被称为海洋学家的“义工”。

威德尔海豹喜欢独来独往，只有在繁殖季节



威德尔海豹



海豹幼体 摄影 / 陈建伟

体重 400 ~ 450 公斤，雌性比雄性体型略大。威德尔海豹分布在南极周围和南极洲沿岸附近的海域，通常在岸冰区繁殖，但每年的大部分时间都待在浮冰区。

由于威德尔海豹的性情相对而言比较温顺，所以成了虎鲸最喜欢的猎物之一。此外，鳍足类是典型的肉食性动物，因此它们或多或少都带有

雌性才会成群结队地聚集在一起。它们于水中交配，雌性负责在冰上哺育后代，哺乳期大约 45 天；而雄性会一直坚守在附近的海水中，守卫着领地。

神奇的大鼻子——南象海豹

成年的雄性南象海豹有一个能伸缩自如、呈鸡冠状的大鼻子，它们表达喜怒哀乐的方式就是鼻子会迅速膨胀，并伴有震耳欲聋的吼声，所以



南极毛皮海狮



针对南极海洋哺乳动物的直接保护,《南极条约》有相关的条款规定。而《南极海洋生物资源养护公约》独特的亮点在于接受如下观点:就南极生物资源的开发利用行为而言,它们对生态系统其他组分所产生的影响大大超过目标资源本身。因此,南极海洋哺乳动物享受着直接和间接的保护。

编译自 Ian L. Boyd《海洋哺乳动物百科全书》(第二版)

“象海豹”名副其实。由于其分布在南极周围,故又被称为“南象海豹”。以前南象海豹曾被认为是占据着亚南极地区的无冰海域,而最近的研究表明它们有些时间也会在浮冰区度过。南象海豹的属名 *Mirounga* 来自澳大利亚的一个地名,种名 *leonina* 来自拉丁语,意为狮状:一是因为其体型大,二是由于它的吼叫声像狮子。在鳍足类动物中,南象海豹的体型最大,雄性体长可达 6.5 米,体重约 4000 公斤;雌性要小得多,体长约 3.5 米,体重 1000 公斤左右。

南象海豹的长相实在不敢恭维,灰青色的体

色,圆又大的脑袋,宽宽的面孔,几根稀疏的胡须,一对向外突出的眼睛常常泪流满面;再加上不讲卫生,鼻孔常塞满了白色的分泌物;尤其是在每年一次的换毛季节,它们你推我搡地拥挤在岸边的泥坑里,看上去更加“肮脏”不堪。

由于前肢十分短小,不足以支撑笨重的躯体,因此南象海豹在陆地上的移动十分迟缓。如果小心翼翼地靠近它,南象海豹还会视而不见,甚至继续懒洋洋地呼呼大睡。南象海豹生性暴躁,却偏偏喜欢几十只或几百只群居在一起,彼此之间不时为了占据有利地形而发出阵阵的吼声来威吓

对方，甚至大打出手，搞得遍体鳞伤。笔者在此要提醒的是，进行观察时，尽量不要站在南象海豹通往大海的路上，否则它会认为被切断了退路而发起攻击。笔者曾有幸见过十分有趣的一幕：一头雌性南象海豹想从离地面较高的地方爬上长城站的码头，尝试几次后都以失败告终。但她很聪明，又来到离地面较低的地方，几经试探，费了九牛二虎之力后终于爬上码头，然后直奔码头的尽头。当时正值退潮，她停留的地方高出海面有7~8米，估计她觉得不安全，摔下去即使不粉身碎骨，也要终身残疾。于是只能原路折回，途中却又改变了主意，还是重新爬到码头的尽头，停顿好一段时间，感觉还是不对，又重新返回，然后一直爬到码头岸边的路上，再取道来到沙滩，爬一步，休息一会儿，爬爬停停，最终返回大海。由此看来，南象海豹是善于思考的动物，能知难而退。

冬末时节是南象海豹的繁殖期，雄性通过战斗来获得交配权，一头雄性往往可控制几十到几百头不等的雌性，过着一夫多妻的生活，所以雄性总是争先恐后地登陆来抢占有利地形。大约两个星期后，雌性才陆续抵达，上岸后不久，就相继生出了小海豹。刚出生的南象海豹身披黑色的胎毛，一个月后，开始换上一身银灰色的毛。

好战的南极毛皮海狮

亦称南极海狗，其种名 *Gazelle* 来自第一艘

捕获它的德国船只——瞪羚号 (*SMS Gazelle*)。库克船长曾于1775年来到南乔治亚岛，发现这里竟然栖息着大量的南极毛皮海狮。在岸上繁殖的南极毛皮海狮曾经在冰区被观测到，但它们大部分时间是在浮冰区以北的开阔水域生活。

南乔治亚岛的南极毛皮海狮以摄食磷虾为主，乌贼、鱼和企鹅等为辅。

南极毛皮海狮雄性体长1.7~2米，体重88.8~230公斤；雌性体长1.17~1.4米，体重19.8~50.8公斤。它们能转动鳍肢在冰上或陆地上奔跑。有趣的是，笔者在长城站考察期间曾与中央电视台的摄制人员和女记者黄小希外出拍摄，碰巧遇到一头南极毛皮海狮，它唯独追赶黄小希，吓得她拼命狂奔，惊出一身冷汗！等看到追不上了，它才悻悻地停下。

南极毛皮海狮也是一夫多妻的动物，强者可以拥有更多的雌性。每年春天的繁殖季节，它们成群结队地来到南乔治亚岛。首先到达的是成年雄兽，它们一到便会抢占有利地盘安置众多的雌兽。整个抢占地盘的过程十分惨烈，轻者遍体鳞伤、头破血流，严重到会付出生命。这就是自然法则：胜者为王，败者为寇！等雄兽划分好各自的领地后，雌兽才姗姗来迟。进入繁殖期后，雄性南极毛皮海狮还要时刻捍卫自己的领地，若遇到挑衅者，免不了还要恶战一场！因此，繁殖期间，它们常常无暇捕食，完全靠之前积累的能量来苦苦支撑。当然，回报也是丰厚的，次年的繁殖季节，雌兽就会产下小海狮。经过约4个月的哺乳期，小海狮就可以自谋生路了。

目前，随着我国南极科考事业的逐步深入，我国对南极鳍足类动物研究的序幕已经拉开，笔者衷心希望我国今后能持续、深入和全面地开展鳍足类动物乃至海洋哺乳动物的多方位研究，积累宝贵的经验和翔实的基础资料，为南极菲尔德斯半岛乃至南大洋海洋哺乳动物的保护和管理提供科学依据。

本文作者系山东大学威海分校教授



由于没有追上记者，南极毛皮海狮显得十分懊恼

文明的代价

海豹毛中的汞含量

文 / 孙立广

统计海豹粪土层中的毛发数量，可以判断历史时期海豹数量的变化。见证汞含量变化的海豹毛作为环境变化的天然存档者，还可以记录人类文明的进程及其对环境的影响。古罗马时代以来，人类在冶炼金银的活动中，作为溶剂的汞是从矿石中经过加热提炼的，从而向大气和水体这两个流体系统排放了数十万吨汞，生物从水体中吸收汞再通过食物链累积放大。这样，海豹毛中的汞含量就记录了人类冶金文明的进程。

早期人类进行的金银提炼和炼丹等活动的盛衰史实与南极海豹毛的汞含量变化是可以对比的。海豹毛中的汞含量在公元 18 ~ 300 年出现第一个峰值，此时正值罗马帝国开始火法冶炼辰砂制汞，中国汉朝黄金生产也处于鼎盛期，产量与罗马帝国相当，与此同时，东、西方开始流行炼丹术。这些活动排放的汞通过大气、水循环和洋流传输到南大洋，在南极动物的毛皮中富集。

海豹毛汞含量在公元 300 ~ 450 年降低了 200 纳克 / 克，这与中国汉代晚期金银产量下降以及古罗马衰败是一致的。公元 700 年前后，玛雅文明达到鼎盛，冶金活动频繁，同期，日本奈良和中国隋唐佛教盛行，寺庙建筑中镀金工艺造成大量汞蒸汽进入大气。阿拉伯人建立伊斯兰王国，再次开采阿尔马登汞矿，并进行了第一次汞的冶炼革新。这些情况导致汞排放量迅速升高，海豹毛中的汞在公元 750 ~ 1000 年出现高峰，并在公元 800 年达到工业革命前的最高值：1500 纳克 / 克。

1050 ~ 1200 年间，欧洲银矿开采殆尽，金银提炼活动接近中断，海豹毛也干净多了。此后，南美洲印加文明（1100 ~ 1500 年）用灰吹法生产了大量金银，加热金矿石的操作方法造成了矿石中的汞进入大气。基督王国时期（1200 年左右），欧洲新银矿被发现，掀起了开采热潮，如英国造币厂在 1220 ~ 1250 年的

短短 30 年里产量增长了 10 倍，金银生产的再度兴盛伴随着又一个汞排放高峰期，与此对应的是，1200 ~ 1500 年间海豹毛的汞含量形成高峰。欧洲中世纪末期黑死病的蔓延，生产力下降；明朝末年中国的汞消耗量也较低，海豹毛汞含量也在约 1450 年前后大大降低。

最显著的例子是：在 1580 ~ 1900 年美洲淘金热中消费的汞总量高达 257400 吨，尤其在 1700 ~ 1800 年期间，美洲汞的消费量每年达到 800 ~ 1200 吨，海豹毛中的汞含量在这一时期同步出现高峰，约 1250 纳克 / 克。此后发生在 19 世纪初的南美独立战争使整个南美洲金银生产中，南美洲地区几乎不存在汞消费。这一现象在海豹毛中也得到较好反映，19 世纪初至 19 世纪中期海豹毛的汞含量出现了明显的低谷，仅为 886 纳克 / 克。1840 年开始工业革命后，燃煤、氯碱工业和石油提炼等活动中的汞排放成为大气中汞的另一重要来源，人类总的汞消费持续增长，导致全球大气汞浓度持续升高。海豹毛的汞含量相应地从 1840 年后表现出一个持续增高的过程，直至近代达到浓度最高值 1740 纳克 / 克。事实上，近代大工业的发展不但使全球的汞污染加剧，企鹅粪土中的铅浓度也在急剧升高。

通过海豹毛中汞含量变化可以发现，文明和生产力的发展会带来汞污染加剧，而文明倒退和生产力下降时汞污染降低。这确实是对文明的讽刺。我们注意到，在基督王国、新大陆发现时期先后进行过两次冶炼汞的技术革新，有效降低了生产过程中的汞损耗，海豹毛的汞含量同步降低了。可见，文明与技术的进步对汞污染也有一定的约束作用。遗憾的是，冶炼技术的进步无法遏制当代全球现代化进程给南极和全球环境带来的伤害，也许这就是文明的代价。我们只是期待这种代价越小越好。

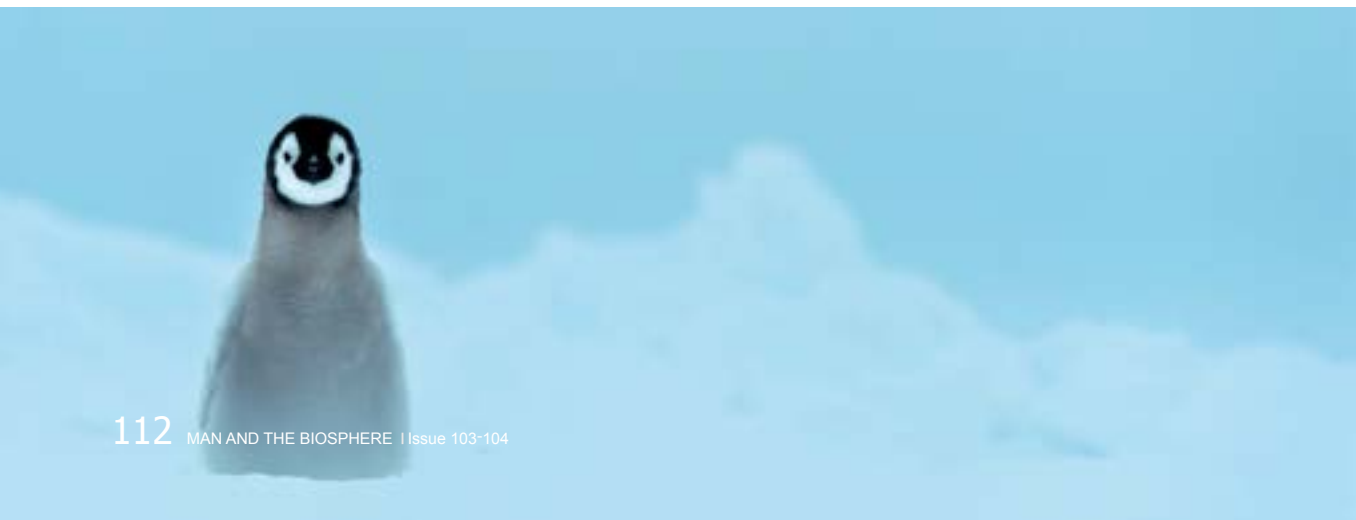
本文作者系中国科技大学教授



我在南极拍摄帝企鹅

文、图 / 冈瑟·里尔

冈瑟·里尔 (Gunther Riehle) 是一名专职食品工程师，也是一位充满激情的野生动物摄影师，在世界各地的摄影比赛中收获颇丰。同时，他是摄影界蜚声世界的“德国超级巡回赛”的竞赛指导，也是一系列野生动物摄影研讨会的组织者，经常受邀在世界各地相关摄影比赛上担任评委。





帝企鹅以其神圣庄严而黑白相间的外观而知名，一般身高 1.3 米，重 25 ~ 45 公斤。野生个体寿命约 20 岁，人工饲养条件下可以活到 50 岁。帝企鹅在外观上和王企鹅很相似，后者体型较小，生活在南极诸多偏远地带，而帝企鹅则沿着南极布满冰雪的海岸线集中为 40 个大群左右。帝企鹅是世界上潜水最深的鸟类，可达 550 米，在水下能待 22 分钟。它们的猎物有磷虾、鱼类和鱿鱼，而自身是虎鲸、豹形海豹以及大海燕的猎物。虽然帝企鹅数量达数十万只，但由于全球气候变化，它们在南极的栖息地正面临着威胁。



作为一名在全世界到处跑的野生动物摄影师，为了拍摄南极著名的帝企鹅的幼鸟，我经历了七年时间的准备才如愿以偿。

地球上天气最寒冷、风雪最凛冽的大陆莫过于南极。南极的面积约为 1400 万平方公里，是中国国土面积的 1.5 倍。

南极也是一块受保护的大陆，我们不妨将它看成一个巨无霸似的“国家公园”。这里是野生动物的天堂，主要有鲸类、海豹类、企鹅以及其他鸟类，如鸬鹚、海鸥和雪鹭。对于植物而言，南极简直就是它们的禁地，几乎不能在这里生存。

由于国际社会不允许任何人在南极捕猎，因此这里的动物通常不会躲避或攻击人类，换言之就是不怕人。但人类得讲规矩，那就是对动物敬而远之，必须待在离它们 5 米远的距离。然而动物才不会管几米线之类的东西，它们对人类有着强烈的好奇心，毕竟很少见到人类这样的生灵，人类也不会来伤害它们，因此它们经常会主动接近人类。不过，要让动物有如此表现，我们事先还得小心，例如需要俯卧在地上、保持安静以及动作要慢。

理论上讲，在南极拍摄野生动物易如反掌。由于没有植被覆盖，因此一般情况下不会存在前景或背景的干扰问题。洁白素雅的雪、泛着青色的冰和那黑黑的岩石共同构成了一幅幅美丽画卷的背景。另外，在南极拍摄时不必考虑曝光不足或过曝的问题。当然，南极并非处处完美。由于存在极昼和极夜现象，极昼时，太阳就是落不下去，一旦没有云层覆盖，拍摄对象就会出现阴影；

最佳拍摄时间是在夜晚，即 22 点至次日凌晨 3 点。极夜时，太阳升不起来，一天 24 个小时都漆黑一片，这一持续就是数月。

再谈谈温度和风力的问题。在南极，零下 25 摄氏度的气温以及强冷风简直就是家常便饭。这意味着摄影师的装备必须精良，穿戴必须讲究。我们遵从“洋葱法则”，也就是衣服穿得一层裹一层，像洋葱那样把身体紧紧包裹在最里边。就拍摄器材而言，我使用的是尼康系列，它让我在南极寒冷的环境里没有后顾之忧。

前往南极最容易且最快速的方式是坐船，可以从阿根廷南部通过德雷克水道抵达南极，单程需要两天半到三天。我们也可以从南非、澳大利亚或者新西兰乘船过去，但时间就长多了。在南极的夏季，即 11 月至次年 2 月，有很多船只前往那里，一些大船能搭载 400 人以上，而小船也就搭载 50 人左右。

在南极有一个规定，那就是每次允许登岸的人数必须控制在 100 人以内。因此，我建议大家选乘乘客人数不超过 100 名的船只，以便最大限度地赢得上岸拍摄的时间。

我经历过三次这样的旅行，不仅看到了南极美丽的景色，还近距离拍摄到不同种类的海豹，如食蟹海豹、豹形海豹，并观赏到好几种企鹅的成年个体及其幼鸟，如阿德雷企鹅、巴布亚企鹅、帽带企鹅以及王企鹅。不过，我一直没有见到心仪已久的帝企鹅幼鸟，因此这些小家伙成为我又一次前往南极的终极目标。





帝企鹅是所有企鹅中最狂野的鸟种，它们在南极的冬天而非夏天繁殖。那时候气温降到零下 35 摄氏度，它们挤在一起，让体温上升至 38 摄氏度！实际上，它们的繁殖周期始于南半球的秋天，也就是每年 4 月前后，此时海冰刚刚结成，冰层很厚，足以承载数千只企鹅。帝企鹅对繁殖地的情感非常专一，以至于它们像朝圣一样每年都会聚集到同一个地方繁殖。

雌鸟在每个繁殖周期只产一枚卵。由于南极没有筑巢的材料，因此雌鸟将卵交给雄鸟，后者先把卵小心翼翼地放在脚上，然后转移到育儿袋中（雄鸟双腿和下腹部之间一块布满血管的黄色皮肤）。由于产卵过程让雌鸟筋疲力尽，因此完成交接工作后它会离开繁殖地回到海中捕鱼。卵的孵化时间需要 65 ~ 75 天。当 7 月来临，雌鸟返回繁殖地，接管刚孵出的幼鸟或即将孵出的卵，雄鸟则返回海中捕鱼。到了 9 月，雌鸟和雄鸟轮流照看幼鸟。当父母同时去捕鱼的时候，幼鸟就自己等待着。有时候、尤其是在夜晚，这些被留下来“看家”的幼鸟会挤在一起相互取暖。





想要拜访帝企鹅的繁殖地，有两条路线可走。第一条路线，乘坐有直升机的破冰船。船会尽力破冰挺进，直到再也开不动时就轮到直升机大显身手。但直升机只能在优良的天气里飞行，而此时阳光太刺眼，阴影又太重，会导致拍摄不理想。在此情形下，每天能拍摄帝企鹅的时间一般不超过4个小时。第二条路线，乘坐特许的伊尔货机从智利南部的蓬塔阿雷纳斯起飞，抵达南极营地后再换乘双獭飞机，经过4个半小时的飞行（中途有一次加油经停）到达威德尔海。每年11月中旬，旅行社在这里建立了能维持两个星期的营地。营地的冰层有3米厚。这条路线虽然折腾，但拍摄者能长时间接近帝企鹅，因此还比较理想。

2015年11月，我选择第二条路线出行。然而好事多磨，由于天气原因，我们在蓬塔阿雷纳斯干等了一个星期，直到天气转好后才飞往南极的营地。结果到了那里还是天气多捉弄，我们又

等了一个星期才飞往帝企鹅的繁殖地。

南极多变的气候让我们此行感触颇深，我们原计划在那里拍摄三天，但实际上花了一个多星期才回来。我们中午抵达繁殖地时阳光很充足，却没料到当天晚上暴风雪会来临。情况紧急，时间紧迫，我们顾不得多想扛起相机就往外跑，抓紧时间拍摄。大约在晚上10点，狂风骤起，冰晶漫天飞舞。我趴在地上，逆着低矮的太阳发出的柔和的金色光芒拍摄企鹅，画面中交织着漫天的冰晶。那天夜里，暴风雪把帐篷吹得晃来晃去。还好，我们的睡袋有三层，隔热性能良好，躺在里面非常暖和。在帐篷里，水、牙膏、湿纸巾和剃须膏都结冰了。我们每隔几个小时就必须清理一次帐篷外的积雪，否则会被永久地“雪藏”。

这场暴风雪持续了大约7天，我们顺利通过大自然严酷的考验，获得了一名摄影师梦寐以求



求的馈赠——充足的时间以及完美的光线。希望一幅幅有关帝企鹅的照片能将我的感受传达给每一位读者。

个人自述

从技术上而言，我最喜欢使用广角镜头拍摄野生动物，这样能将动物及其生存环境都拍摄下来。毫无疑问，我们还需要野生动物的“配合”。对于那些羞涩的动物，你需要一支粗大的远摄镜头。我从不使用三脚架，我没有那样的耐心，尤其是在拍摄充满动感的野生动物的时候，你的动作必须足够快，足够灵活。有了尼康 D4 以及佳能 EOS 1DX 这些强大的相机，我就能保证高感光度，而且噪点不多，因此三脚架就没有必要了。在任何光线条件下，我会使用高快门速度以最大限度地保证锐度。



自从投身摄影以来，它就一直是我的激情所在。我喜欢记录自然之美，喜欢拍摄漂亮的事物，喜欢那种充满正能量的照片。因此，我并不热衷于过度处理图片。我只使用 Adobe Lightroom 之类的工具，而不是 Photoshop 或其他插件。我希望人们明白和意识到，我们的世界和大自然有多美，我们需要保护它，从现在开始。

我坚信，一名摄影师永远需要开放心态，在生活中处处用心，在行走中充满更多意识，像雷达一样扫描四周以获得良好的拍摄机会，然后按下快门。



这样你就能看到更多，经历更多，让更多精彩时刻在记忆里留存。当一段旅行结束后，看看照片，一股感动会再次涌入脑海，勾起美好的回忆。

我喜欢在摄影中比一比，那种胜利让人感觉趣味十足。我刚踏入摄影的门槛时，几乎任何事物都拍，但现在专注于野生动物摄影。在我们这个世界上，我喜欢去越来越远的地方旅行，以体验野生动物摄影带来的乐趣。对于前往南极拍摄帝企鹅的旅程，我酝酿了7年，这个想法大胆而特殊，从心理和体力上都让人紧绷，但值得去努力，去等待，因为它很有趣，能触及心灵，让我毕生难忘。📷



中国生态学家的南极科考

文、图 / 陈建伟

按照国际上通行的概念，一般将南纬 60 度以南的地区统称为“南极”。南极其实是南大洋及其岛屿和南极大陆的总称。地理学上把南纬 66 度 33 分的纬线称为“南极圈”。在极圈内会有极昼和极夜现象，同时，极圈也是划分温带与寒带的界限。因此，南极的范围其实要比南极圈的更大。

南极腹地几乎是一片不毛之地，仅有的生物就是一些简单的植物和一两少数昆虫，偶尔能见到一些苔藓、地衣等。但是，在靠近南极圈附近，

在生态区域的边缘地带和生态系统的过渡带，在这里其实就是亚南极。对于关心生态、对生物多样性感兴趣的人来说，去南极点更多的只是象征意义，如此难得的科学考察机会，应该把时间花在亚南极地区。这个认识，是我此行南极收获颇丰的关键。

认识南极

两千多年前，人类对自己生存的地球远没有像今天这样了解。那时，已知的大陆都位于北半球。但古希腊人根据太阳总是出现在南面天空的

事实，认为南半球也应该有一片大陆。亚里士多德（公元前 384 ~ 公元前 323 年）曾经有一个著名的假说：地球要保持相对平衡，南北两端必须各有一块陆地，如果南半球没有一块陆地，地球就无法保持平衡了。他把这块想象中的陆地称为“南方的大陆”。到了公元 1 世纪，罗马地理学家庞蓬尼麦拉不仅赞成关于南方大陆存在的设想，还指出南方大陆的南极地区与北极地区一样，因严寒而无人居住。

到了 17 世纪末期，地理大发现使探险家们陆续发现南美洲与澳大利亚的存在，却未见传说中的“南方大陆”，有很多人质疑这个南方大陆的存在，但地理学家仍然坚信南极洲不仅存在，而且庞大。

南极开发的历史是人类地理大发现的延续，从 18 世纪起，工业文明积累了大量的财富，为了索取更多的海外资源，西方的探险家们纷纷南下，去寻找传说中的南方大陆。1772 ~ 1775 年，著名的英国库克船长历时 3 年 8 个月，航行 9.7 万公里，环南极航行一周，几次进入南极圈，但他最终未发现陆地。1819 年，沙俄人发现了南极的两个岛。英国人罗斯于 1841 年驶入后来以他的名字命名的著名的罗斯海和罗斯冰架。1908 年，英国的沙克尔顿挺进到南纬 88° 23' 处，距离南极点仅 180 公里，但由于食品耗尽而折回。1911 年 12 月 14 日和 1912 年 1 月 17 日，挪威的阿蒙森和英国的斯科特率领的探险队先后到达南极点。

在南极探险史上，不得不重提沙克尔顿。当年，沙克尔顿率领 28 个船员乘“持久号”靠近南极，目标是徒步横穿南极大陆。在行进过程中，浮冰将“持久号”团团围住，使它寸步难行。沙克尔顿和船员不得不弃船，他们登上了一块巨大的浮冰，但这块浮冰随着时间的推移不断地碎裂并慢慢地变小。1916 年 4 月 9 日，浮冰彻底碎裂了，他们依靠 3 艘“持久号”的救生艇在海上经历了 7 个昼夜的危险后，登上了荒无人烟的大象岛。

为了生存，沙克尔顿带了几个人乘救生艇出去找救援。救生艇在狂风恶浪中横渡了大约 1287 公里后来到南乔治亚岛，这一史诗般的航行在气候极端恶劣、随时都有生命危险的海上持续了 16 天。上岸后，沙克尔顿为了实现救助同伴的承诺徒步翻越南乔治亚山脉，最终寻找到捕鲸站得以获救。经过四次尝试，他终于找到了一条从浮冰上穿过的路。他的不懈努力使所有的同伴都获救了，这时离他出去寻求救援已经过去了 4 个月。

沙克尔顿的故事深深地感动着每一个到达



航行于海冰之间



冰山下的沉船



鲸鱼加工站遗址



马尔维纳斯岛首府斯坦利港教堂前的鲸鱼骨塔

南极的人。为了纪念他，在月球上靠近南极附近的一座环形山以他的名字命名——沙克尔顿环形山。他死后被安葬在南乔治亚岛上的 Grytviken 地区，我们专程到他的墓地祭奠了这位南极探险英雄。人们纪念他，不是因为他的成就，而是因为他的担当、他负责任的行为，以及为了实现拯救队员的承诺而无所畏惧，哪怕做出巨大牺牲也勇往直前的伟大精神。

除了地理大发现外，当时西方人对南极感兴趣的另一个驱动力是南极的野生动物。据统计，在 1780 ~ 1892 年的一百多年间，有超过 1100 艘海豹捕猎船在南极活动，而探险船只有 25 艘。

英国人史密斯在 1820 ~ 1821 年的夏季，用两艘船在南设得兰群岛猎获海豹剥下的海豹皮就有 6 万张之多。为了获取海豹厚重的皮毛和丰富的油脂，大规模杀戮海豹的场面惨不忍睹。那段时间的疯狂捕杀，使南设得兰群岛的海豹几乎灭绝。到 19 世纪末，南极有数百万头海豹遭到屠杀。为了高额的利润，疯狂的寻猎活动也促使了更多的地理发现，有近三分之一的环南极群岛就是由海豹捕猎者发现的。

从 20 世纪初起，南极捕鲸业成了一项主要产业，鲸类的肉及其油脂是导致大量的鲸类惨遭捕杀并几近灭绝的根本原因。南乔治亚岛仅在海岸上就修建了 6 座鲸鱼地面处理站，捕猎的有蓝鲸、长须鲸、驼背鲸、大须鲸和抹香鲸等。1904 ~ 1966 年 60 多年的时间就捕杀鲸类动物共计 17.5 万头，而这个数字仅占南极捕鲸量的十分之一。英国首都伦敦甚至一度用鲸鱼油来供给城市路灯照明！

20 世纪 70 年代，南极的鱼虾又成了捕捞的目标，其中磷虾的年捕捞量高达 40 万吨。

我们在南乔治亚岛看到了当年捕鲸的地面站、大功率的发动机等设备和轮船上能将整条鲸吊起加工的滑轮系统。当年触礁的鲸鱼油运输船依旧矗立在岸边，历年的冰雪堆积已经看不出轮船的原貌了，南极燕鸥在上面坦然地筑巢繁育着后代，只有黑黑的大烟囱还在讲述着那过去的故事。

生态南极

每一个乘船去南极的人，面临的第一关就是必须横穿南大洋，俗称过“西风带”。南大洋的洋流主要是由西向东的环流绕南极洲运动而成，而强劲的西风也助纣为虐，强化了南极环流的形成。由于南极汇流圈以南和以北的海域在盐分浓度、密度和温度上有很大的不同，南北洋流相遇会发生剧烈的碰撞。而我们的船走的是南美洲大陆最南端的合恩角与南极半岛之间最窄处的喇叭口——德雷克海峡，因此这里常常狂风暴雨，恶



海豹对作者的相机产生了浓厚的兴趣

浪滔天，气候变化无常。我们乘坐的 3000 多吨的考察船在这里简直就是沧海一叶。

一般来讲，在太平洋上只有热带风暴（台风）可以达到 12 级，但是在南极，12 级以上的暴风是家常便饭。因此，80% 以上的人都会晕船。大海茫茫，考察船像一叶扁舟，任由恶浪巨涌摆布而无力。房间里凡是没有固定好的东西都会到处撞击、掉落和滚动，想想还要在船上熬上 20 多天，所有人的身体和心理会受到巨大摧残，出现个别人要留遗嘱想自杀的现象就不足为怪了！我虽然也很不舒服，但因为有过在中国南海闯荡的底子和经验，所以还能承受。

从生态学的角度讲，南大洋如此大的风浪并非坏事，正是因为南极汇流圈以南和以北的海域在盐分浓度、密度和温度上的较大差异，造成南北洋流相遇发生剧烈混合，海底的养分被搅动到海面，使南极汇流圈盛产浮游生物、海藻和磷虾等，而依靠它们生存的鱼类、鸟类、海豹和鲸等食物链的上层物种蜂拥而至，使南大洋成为世界上生物数量最多的海洋。

南极自然条件的恶劣更多地体现在气候的反复无常上。南极是世界上风力最大的地方，平均

每年 8 级以上的大风有 300 天，年平均风速 19.4 米 / 秒。法国迪尔维尔科考站曾测到每秒 100 米的飓风，相当 12 级台风风速的 3 倍，而它的破坏力是 12 级台风的近 10 倍！这是迄今为止地球上记录到的最大的风暴。因此，南极又被称之为“风极”。南极风暴所以这样强大，原因在于南极大陆雪面温度低，空气被迅速冷却收缩而变重，密度增大。而覆盖南极大陆的冰盖就像一块中部厚、四周薄的“铁饼”，形成一个中心高于沿海地区的陡坡地形。变重了的冷空气从内陆高处沿斜面急剧下滑，到了沿海地带因地势骤然下降，使冷气流下滑的速度加大，于是形成了强劲的、速度极快的下降风，俗称“冰川风”。

我们这次南极之行最为严酷的考验就是遭遇“冰川风”。在南乔治亚岛的一场经历使我终生难忘：我们乘坐冲锋艇刚一登陆，原来晴好的天气突然就变了，风越来越大，从山上下来的风越吹越紧，气温越来越低。不一会儿，风夹裹着大片雪花铺天盖地以近乎垂直身体的角度横扫过来，人根本就站不住，只能蹲下或者找一块避风的地方蜷曲着。海上更是风浪大作，回到船上的念头根本想都别想。随着时间的推移，身体感觉越来越冷，同伴们只能像企鹅一样相互围着抱团取暖。风暴还在肆虐，不知何时才能停下来。我

们知道，除了严寒之外，狂风是科学考察人员在南极所遇到的另外一个“天险”。狂风会很快带走人体的热量，此时长时间人若置身户外，轻则冻僵，重则冻死。面对突然而至的险情，我们除了相互聚集在一起，没有其他任何办法，唯一的希望是企盼天气好转……好在这场冰川风持续了一个多小时后就慢慢停了下来。

后来我们才知道，当时的风速已经达到了15级！船长说，好险啊，这种情况要是提前几分钟知道，无论如何也不能批准我们上岸的。如果冰川风再持续一段时间，上岛人员就可能有生命危险。如果冰川风不停，后果不堪设想。在这种情况下，人类的一切努力都是无效的。

南极的生物

南极给人的震撼不仅表现在它的雪、冰、海的浩瀚和美丽，冻、风、浪的独特和严酷，更表现在这片土地上丰富和奇特的野生生物上。这片与世隔绝、貌似贫瘠的大陆尽管并不适合人类居住，却孕育了许许多多令世人惊叹不已的野生动物，很多是只有在这里才能看到的生命形式。南极的生物往往依靠海洋生活，种类不多，但数量

庞大。这里的野生动物并不惧怕人类，面对来人，海豹们通常仅报以一个无兴致的哈欠，翻个身又睡过去了；企鹅们忙着恋爱、交配或哺育孩子，有时甚至会列队走过你的面前或者停下来看看你的背包和相机；成群的鲸和海豚在海洋里自由自在地追逐；信天翁和海燕在海面上盘旋飞舞，任凭风吹浪打毫不在乎，似乎在告诉人类：“我，才是这里的主人！”

为了保护南极这块最为纯净的大陆、这块野生生物最自由自在生活的地方，南极目前实施的是最严格的生态环境保护措施。每一个赴南极的人应该都有这样难忘的经历：当人们准备乘船离开南美大陆赴南极前，会有专职人员对每个人及其行李进行严格的检查，主要是防止携带任何可能影响南极原生态系统的动植物及产品。我们还经历了用吸尘器吸净衣物的每一条缝，甚至每一个衣裤口袋都要翻出来吸干净的过程。在靠近南极岛屿及大陆时，任何人只要登岛上岸或是上船下船，都要严格地消毒，鞋子要用药水浸泡并用刷子刷洗干净才放行。还有，天黑以后必须将舱窗遮住，防止飞翔的鸟类因为趋光撞上舱窗而受伤。南极为什么要实施如此严格的环境保护措施，



专家给我们讲述了“挪威鼠”的教训：曾经，由于挪威人不小心在运大件行李时将老鼠带上了某岛，结果老鼠在岛上泛滥成灾，破坏了岛屿原来的生态平衡。到目前为止，虽然已经耗费了大量的人力、财力、物力甚至动用了包括直升机、遥感技术等在内的现代手段来消灭老鼠，但是这个问题至今没有完全解决。

我们上岛考察时，按规定人要和野生动物保持一定距离，不能主动靠近以免干扰动物。譬如：人和海豹的最小距离为15米，人和企鹅的最小距离为5米等等。可是在当地，由于人类极少出现，动物不仅不怕人，反而对人产生了浓厚的兴趣，它们可不管这些规定，探头探脑来找你玩，蹭蹭你的背包、亲亲你的镜头，有趣极了！我尽情地让相机咔咔地唱着歌，记录下一幅幅珍贵的野生动物照片，一个个生动有趣的生态故事。

结束语

从19世纪初人类登上南极至今已经有200年的历史，其中大体经历了地理发现、大肆掠夺资源（主要是生物资源）、各国争夺地盘划分势

力范围、南极条约的签订、保护南极及和平利用南极这样几个阶段。

为了保护和研究南极，世界上共有近30个国家在南极建立了50多个科学考察站，中国先后共建立了4个。从各国南极科学考察站的分布来看，大多数国家的南极站都建在南极大陆沿岸和海岛的夏季露岩区。只有美国、俄罗斯、日本、法国、意大利、德国和中国这7个国家在南极内陆冰原上建立了常年科学考察站。其中，美国建在南极点的阿蒙森—斯科特站和俄罗斯的东方站最为著名。2009年1月27日，中国在南极内陆“冰盖之巅”成功建立了第三个南极科学考察站——昆仑站，标志着中国已成功跻身国际极地考察的“第一方阵”。巍然矗立在海拔4093米南极“冰盖之巅”的中国昆仑站，是目前南极所有科学考察站中海拔最高的一个。

南极是地球上生态环境最恶劣的地方，也是全球气候变化最敏感的指示器，只要气候稍稍变暖，南极大陆周边的海冰就会大面积收缩；而变冷时，海冰会大面积增加。由于白色冰雪的反射率是蓝色海水的15倍，地球会因此变暖或变冷。我们知道，全球气候变暖，海平面上升，南太平洋岛国图瓦卢已经面临灭顶之灾，有些国家，譬如印度尼西亚也丧失了20多座岛屿。科学家警告，气候变化将严重影响人类生存与生活，没有哪个国家能够幸免。人类应当约束自己的欲望和行为，如果由于人类自身的原因加速了气候变化的进程，导致南极冰盖全部消融，全球海平面将上升66米，世界上的很多繁华都市和大面积的平原都将被淹没。

地球上只有一个南极，它是目前唯一的一处相对未被污染和开发的净土，为了保护我们的家园不被海水淹没，为了保护南极特殊的生物物种，人类必须认真思考南极生态保护这个重要的课题。

本文作者系中国野生动物保护协会科学考察委员会主任
中国人与生物圈国家委员会专家组成员



福图纳湾



南极生态简史

文 / 孙立广 摄影 / 蔡石

在当前的全球环境变化研究中，极地生态与环境演化历史的模拟复原和反演有重要的不可替代的作用。企鹅和海豹等海洋生物在极地无冰区的活动历史，反映出与冰盖进退、气候变化、海平面升降和海洋生产力的大小存在着联系，探讨它们之间的相互关系将有助于深入认识生态对全球变化的响应，并为评估和预测气候变化对南极生态系统的影响提供充分的科学依据。

根据近几十年来的监测结果，生态学家发现企鹅数量出现明显波动。在南极的东部和西部的不同区域，企鹅数量的增多或减少并不一致，可能与目前剧烈的气候变化有密切关系，有学者认为，企鹅的生物量是气候变化理想的“生物指示计”；但也有学者在对企鹅进行跟踪监测之后，认为企鹅的数量变化主要受人为因素影响。人类捕杀鲸和海豹、捕捞磷虾以及旅游活动都对企鹅生态产生了影响。监测结果表明，当前企鹅种群数量变化在时间和空间上与人类的活动高度相关。

如何区分自然因素和人为因素的影响，建立起这些因素与企鹅数量变化之间的关系模式，是利用企鹅数量变化作为气候环境变化的“生物指示计”的关键。因此，我们在监测当代企鹅数量变化的同时也应当考察在历史时期、尤其是人类未涉足南极大陆以前企鹅等海洋生物的数量变化。对海豹数量的研究结果也表明，在近两个世纪里，南大洋生态系统因为人类大量捕捞磷虾以及猎杀海豹和鲸类而受到扰动。同时，人类生态道德和行为的进步也改善了海豹的生存状态。有迹象表明，海豹数量的变化与人类活动显著相关，但其数量的大幅波动是否全部是人为因素所引起的，自然因素在其中发挥了怎样的作用？要解读这些问题需要我们了解人类登上南极大陆之前海豹的数量及其与气候环境变化的关系。同时，作为参照系，了解南极大陆边缘的生态现状也是不可或缺的。

冰天雪地中生机勃勃的生物

南极无冰区仅占南极陆地总面积的2%左右，主要分布在环南极大陆沿海及近海边的山间谷地，我国长城站就建在那片区域。那是一些没有被常年冰雪覆盖的地带。在那些地方可以零星见到地衣、苔藓和藻类。地衣的分布范围更广阔一些，它们能够适应严寒干燥的环境；苔藓主要分布在比较潮湿的含有机质的土壤上；而藻类和微生物还可以繁衍至无冰区外，甚至在内陆的雪原上也可以找到它们披着红色、绿色外衣的身影。

记得我第一次登上长城站附近的阿德雷岛时，在肆虐的风雪中深感人类的脆弱，但是，苔藓和地衣却显得那般恬静与顽强。它们要在冰天雪地中熬过8个多月，等待夏日的阳光普照。待积雪慢慢地融化后，大片的苔藓和松萝地衣就会挺雪而出，继而茂盛生长。苔藓与松萝地衣界分明，互不干扰。在有些冻融圈（在冬天膨胀、夏天收缩的反复升降过程中而形成的中间低平、周边突出的圈状地貌）发育的地方，苔藓生长在偏潮湿的圈内；而松萝地衣围绕着苔藓形成一个同心的环，这里相对比较干燥，它们似乎相互

排斥，实际上又相互依存。同心环的中央像个天然院落，铺就天鹅绒般的苔藓地毯，“围墙”的碎石上松萝飘摇，“院子”里干净利落，真是天造地设的“豪宅”。不过，一旦南极海燕前来闲居，那又是另一番景象了。苔藓、松萝地衣、冻融圈是天然的材料和天才的建筑师，它们和海燕等海洋动物一起构成了阿德雷岛上的生态圈。

南极植被虽然简单，但在地衣与苔藓、苔藓与苔藓、发草与苔藓之间，普遍存在着竞争，与苔藓生长在一起的地衣和发草可以造成苔藓生长不良乃至成片死亡。就此，我们设计了一个苔藓与松萝地衣生长环境与温室气体吸收与排放的对比研究方案，旨在研究它们之间的竞争关系。我们在长城站选择了一块谷地，在那里松萝地衣与苔藓分布区泾渭分明。我们用了60天的时间对这片植区分别定点定时采气。

采气结束后，我们开始采集苔藓和松萝的样品。出人意料的是，当我们拔出茂盛的松萝地衣之后，下面竟然还有一层紧贴地面、葱翠油亮的墙藓。它们非常隐秘地潜伏在松萝下面。也许，苔藓经过若干年的新陈代谢，增强了土壤肥力，同时优先吸收了水分；松萝在演化中黏贴在土壤间的石头上，直接从大气中获得养分并为墙藓保温抗风。松萝和苔藓相得益彰，这也许是在竞争过程中达成的妥协吧。

在长城站区的空地上，有一丛直径不超过15厘米的南极发草。这是长城站区一丛罕见的发草，它是禾本科植物，但是我却未见到它开花结籽。我知道，在南极如此严酷的自然环境下，任何有茎的禾本科植物都难以生存。那么，它又是怎样孕育和生长的呢？草籽不知是何年被风搬运过来又扎根在这里的。这丛发草是南极长城站科考队员的宠儿，也是各国旅游者和考察队员的观光一景，大家都小心呵护着它。它青翠、纤细，且长势旺盛。当我16年后再次看到它的照片时，发现它并无多大变化。这丛发草对严寒风雪与时间似乎无动于衷，表现出看破红尘与苍穹的冷漠。

我时常惊讶于南极各色各样地衣的顽强，它们紧贴在坚硬的岩石上，润物无声地从大气中吸收营养，用冬眠来忍受零下几十度的冰天雪地，偶尔有一点阳光它们就灿烂起来，很快复苏。松萝地衣鹤立鸡群地以 10 厘米左右的高度屹立在岩石上，在微风的吹拂下，它叶面上黑色的斑斑孢子就像一对对蝴蝶在草丛间扑动着翅膀。

更让我吃惊的是，还有一些个体极小的虫，形状如同在国内华南山区常见的飞蛾，体长仅 2 毫米，有翅膀但已退化不能飞翔了，有 8 条腿，可能属于蜉类。这些小生命是如何躲避长达 8 个月的冰雪覆盖而生存下来的，它们冬眠吗？它们身上那已退化的翅膀表明它们曾经飞翔过，那么是通过什么途径演化的，又是以什么为食的？这些问题不时闪现在我的脑海中。我目睹那些南来北往的海鸟，它们虽然在夏季掌握了极地的制空权，但是，真正的土著还是这些小虫、地衣、苔藓与发草。它们看起来微不足道，却用卑微的存在证明了它们才是南极的原住民，其他种种都是过客。南极昆虫和蜘蛛等节肢动物约有 40 多种，主要分布在南极半岛地区，而苔藓和地衣分别有 300 多种。与其他大陆相比，南极大陆的动植物实在是少得可怜，也就更显弥足珍贵。

每年，当第一缕朦胧的晨光撕破长长的极夜，贼鸥便第一批迁回故土；接着，企鹅、海鸥、南极海燕、信天翁和海豹等争先恐后地纷至沓来，它们盘踞在海岸边缘，总体上相安无事。可以肯定的是，它们的祖先来自于海洋，但是它们的远祖是谁，是怎样演化过来的目前还不得而知。极地古生态学家根据企鹅的残骨测年数据确定，至少在 4.5 万年前，它们就已经生活在这里了。有古生物学家提出假说，认为企鹅早在 6000 万年前就生活在这里，然后随大陆漂移，从低纬度漂移到现在的位置并逐渐适应了严寒。

从浮游植物冰藻、浮游动物磷虾、鱼类，到企鹅等各类海鸟、海豹和鲸类，它们构成了一个既简单而完整的食物链。企鹅、海豹和鲸类的食

谱里都有磷虾。庞大的磷虾群在海洋表层和冰山下随波逐流，在洋流和浮冰的驱动下流云般地来去无踪。磷虾的数量变化决定了南大洋海洋生物的兴衰，支撑了极地生态圈的繁荣。

除了掠食磷虾，企鹅和海豹还会捕食鱿鱼等高营养级食物。企鹅等海洋鸟类通过从海洋中捕食，会将从海洋中获得的碳、氮、磷、硫、锶和氟等元素通过粪便形式转移到岛屿和海岸上，再转移到淡水湖泊沉积物中去。就这样，海鸟在海陆空的跨界传递中，实现了海陆之间、海洋生物和淡水湖泊沉积物之间大跨度的物质转移。这给贫瘠的南极陆缘和脆弱的苔藓、藻类和地衣带来了生机。另一方面，海鸟和动物粪便中的营养元素和有机质在雨和雪融水的冲洗下回归海洋，海洋藻类得以繁盛起来，这又孕育了磷虾的繁荣，进而繁荣了海洋中的整个生物群落。

正是海陆之间的元素循环为我们了解人类进入南极大陆之前发生的生态兴衰过程提供了密码。破译存留在湖泊集水区沉积中的这些密码，我们将可能洞察那些湮灭在历史烟云中的企鹅、海豹和磷虾的故事。

回溯企鹅和海豹生态史

通过对企鹅粪土层中硫、磷、锶、氟、硒、钙、铜、锌和钡 9 种元素测试，发现它们具有显著相关性，其中磷的含量达到了 5% ~ 15%。其实，在很多情况下，磷和有机碳再加上锶和氟，就是粪土层特有的标志性元素。结合有机化合物和碳同位素分析的结果以及元素的背景浓度，可以判断南极阿德雷岛的湖泊沉积物受到了企鹅粪的影响。一些元素的含量代表了企鹅粪输入的多少，间接指示了企鹅数量的多少。在此基础上，应用数理统计方法提取出企鹅粪在沉积物中含量的相对变化，将企鹅粪的相对含量变化作为企鹅数量变化的替代性指标，根据放射性碳十四和铅-铀定年结果，确定了粪土层的年代标尺，从而恢复了过去 3000 年来，该地区企鹅数量变化的历史纪录。研究结果显示，在距今 1800 ~ 2300 年，

即新冰期时企鹅数量锐减；在距今 1400 ~ 1800 年间，气候相对温凉时期，企鹅数量较多。现代随着全球变暖，企鹅数量有减少的趋势。可见过暖或过冷的气候条件均不利于企鹅生存，导致其数量减少；温凉的气候条件有利于企鹅生存和繁殖，数量增多，这个时期就是生物的适宜期。

与此同时，综合对比多个替代性生态环境指标，包括粪土沉积层中海豹毛数量、标型元素的浓度及其他替代性指标，恢复了 1500 年以来菲尔德斯半岛海豹数量变化的历史。研究结果显示，海豹数量的两个峰值分别出现在距今 750 ~ 500 年和 1400 ~ 1100 年间；而在距今 500 ~ 200 年的小冰期，海豹数量减少。海豹数量的历史记录对海冰面积变化的响应关系表明，在人类未曾干预的情况下，海豹数量的变化与企鹅一样也是剧烈的，同样受到气候变化、海冰条件和取食行为的控制。

但是影响生态的因素也并非总是一成不变，我们近期的研究表明，它们也受到冰间湖的多少，地形、风向、风力大小和海平面升降变化的影响。而人类活动乃至人类善恶之间的一念之差也会对极地生态产生影响。让我们来看一个影响海豹数量变化的例子。

在南极长城站，我们探访过沿海岸带分布的海豹家族，海豹们横七竖八地挤在一起，每一个海豹群聚集着十几只个体，中间是一只体态肥硕，长达五六米的雄性海豹，其余都是雌性的，它们实行一夫多妻制。在其附近的海岸带上有一个积水区，其中有含海豹粪和毛发的沉积层，它们记录了海豹的生态史。

我们采用铅 - 铯定年的年代学方法，测定了积水区的泥芯是 20 世纪的 100 年中沉积下来的；通过测定海豹毛的数量和海豹粪土层元素磷和铯等含量的方法确定了海豹数量的变化过程。根据检测数据，我们发现了一个非常奇怪的现象，即 1965 年前后几年中，海豹数量发生了突然变化：

在变化之前，海豹数量是低量级地保持相对稳定的状态，然后突然剧烈地上升，又在高点很快平稳下来，在高位保持平缓的态势。海豹数量的突变表达了一个重要的事件，那么，这个事件是气候剧变的结果，还是人类活动的突然干预呢？

可以确定的是，在过去的 100 年中，西南极地区的气温在缓慢地上升，海冰面积在缓慢地缩小；在 1965 年前后，不存在突然变化的极端气候事件。因此，海豹的突发性事件可能与自然过程无关。

那么，就回头看看人类活动的影响了。20 世纪上半叶，海豹成为一种昂贵的商品，它全身是宝：油可以作为燃料，毛皮是制作贵重皮草的材料，等等。在商业利益的驱使下，人们开始在南极半岛疯狂虐杀海豹。在短短的几十年中，南设得兰群岛的海豹濒临灭绝。为了挽救海豹，联合国环境规划署在各国政府的支持下，在 20 世纪 60 年代初通过了一项严禁捕杀南极海豹的禁令，并得到了有效的执行。停止猎杀以后，海豹的自我修复能力超出了人们的想象，它们在短短的几年中繁殖速度大大加快，种群数量迅速上升，在前后 10 年左右的时间内达到了环境容量极限。此后，海豹种群保持了平衡的状态，这保障了海豹聚集区不至于过分拥挤和有充足的食物来源。海豹数量变化的曲线完全符合逻辑斯谛生态平衡曲线：在有限的生存空间，生物的发生发展从启动到爆发性增长再到动态平衡，生物的自控能力维持了生态的可持续发展。

海豹数量的暴涨是人类生态道德改善的结果，而此前的低迷是人类捕杀海豹的一个可悲的历史记录。这警示我们，在维护地球的生态平衡和可持续发展方面人类承担着重要的责任。这仅仅是一个可以看得见的特例，而那些看不见的生态多样性的破坏、物种的灭绝和消亡，正在我们身边悄悄发生着，并改变着这个世界。📖



南极的绿洲

文、图 / 李承森

自 2006 年以来的 10 年时间里，我们多次参加由国家海洋局组织的南极科考活动，到南极长城站开展陆地植物的调查和研究。南极大陆基本上都被厚厚的冰层所覆盖，并且常年不化。在亚南极地区的南极半岛上，有少量未被冰层覆盖的区域，上一年的积雪可以在夏季融化，露出基本上由碎石构成的地面，为植物生长提供了可能。这种极为荒芜的地表环境与 4 亿年前地球上植物初始登陆时的陆地环境非常相似，所不同的是当时没有今天南极这般寒冷。这是我们研究植物登陆及早期演化的科研人员对极地自然环境感兴趣的原因之一。

在我们这个星球上，目前还没有被人类活动所严重污染的地区只有北极和南极。因此，通过观测这些地区植物的生长来监测环境变化是一项十分重要的科学研究内容。相对于会迁移的动物，

植物在指示环境改变方面更具特点。这是我们开展极地植物研究的又一个原因。

由于地球自身旋转及其与太阳之间的关系，每天的 24 小时都经历着白天和黑夜的交替节律，以及一年里季节的变化。但是在南北极，一个夸张的白天（在极点位置）可以持续半年（极昼），太阳 24 小时都在头顶上；而一个漫长的黑夜（在极点位置）也可以长达半年（极夜），见不到太阳露脸。在极点上，一年只有极昼半年，极夜半年。从极点到极圈的位置，极昼和极夜的长度逐渐缩短。我们知道，植物在极夜下应该处于休眠状态，而在极昼，植物又该如何生长？认识极地植物的生长过程也是我们极为感兴趣的科学问题。

我国的长城科学考察站位于乔治王岛南端的菲尔德斯半岛上。该半岛长 10 公里，宽 2 ~ 4

公里，岛上三分之一的面积被常年不化的巨厚冰层覆盖，其余的地方覆盖有季节性积雪。这些积雪在每年1~2月的盛夏季节融化，形成许多溪流和小型湖泊，冰雪融水寒冷刺骨。半岛年降水量在500毫米左右，多以固体降水（雪）为主，夏季会有降雨出现。半岛上夏季风多为7、8级（风速为10米/秒），高达12级（风速超过30米/秒）的狂风也是常客。

南极和亚南极地区陆地上的植被为高寒冻原植被，包括藻类、苔藓植物和被子植物，以及真菌类和地衣。藻类有约300种，分布在雪原之中，以及企鹅和海鸟栖息地的营养丰富之处，繁盛于雪层表面。苔藓植物为南极陆地植被中的优势类群，其中藓类超过100种，苔类超过20种。被子植物仅有2~3种。南极半岛上还发现了真菌类的蘑菇。此外还有大量地衣。地衣是真菌类和藻类的复合体，有超过250种的地衣参与南极陆地生物群落的组成，成为适应寒冷气候和恶劣生存条件的陆地生物的优势类群。在如此恶劣气候条件下，乔治王岛上的开花植物（被子植物）不过两种而已。

雪藻

藻类属于低等植物，不像我们所熟悉的花草树木等高等植物有根茎叶的形态和功能分化。藻类通常是由单细胞、群体和多细胞构成。群体是由许多单细胞个体聚集而成。多细胞的藻类有丝状和片状等形态，如我们熟悉的海带和紫菜等海洋藻类。藻类植物因为所含色素的不同而分为蓝藻、红藻、绿藻、褐藻和黄藻等。我们食用的海带是褐藻，紫菜是红藻，海白菜是绿藻。南极海洋里的藻类植物和世界上其他海洋里的大同小异。这里仅介绍一下南极半岛上的雪藻。

2012年的南极夏季，当我们乘坐的考察船进入南极半岛以后，考察队员离船上岸，在岸上厚厚的积雪上行走，一脚下去就是一个雪坑。顺着雪坑往下看，表层以下几个厘米的地方出现了绿色的雪，而在距离积雪表面20~30厘米深的

地方又是红色的雪。一路走去，每一脚踩下去的雪坑里都可以看到同样的现象。我们身后，绿色和红色的雪层一直蔓延开来，难道有谁给洁白的雪染上颜色？作为植物学研究者，我知道这是极地雪藻的杰作。在南极冬天的极夜里，几个月不见阳光，生活在雪地里的雪藻产生不了叶绿素，它们具有的类胡萝卜素呈现出红色，把周围的白雪也变成红色。冬季雪中的藻细胞处于休眠状态，春季随着光、水分和营养的增加，藻细胞开始萌发，释放出极小的绿色、具鞭毛的细胞，移动到雪层表面进行光合作用，产生了叶绿素，又把白雪变成绿色。

苔藓植物

苔藓植物个体小，结构简单，仅有茎和叶的分化，具有假根，但是缺少传输水分的维管束，不同于被子植物（维管植物），苔藓属于非维管植物。苔藓植物喜欢生长在潮湿多水的环境里，因为它们的精子需要在水里游动接近卵子，完成受精过程。在我国北方夏季多雨的季节里，通常在屋檐下或墙角阴湿的地方会有青苔出现，那就是苔藓植物。在南方流水较多的背阳山谷里以及潮湿森林和湿地里都会有大量苔藓植物生长。苔藓植物主要分成苔类、角苔类和藓类。苔类和角苔类以叶状体，藓类以具有茎叶分化的枝状体为其形态特征。苔藓植物适应各种阴湿环境，可以在自然环境十分恶劣和极端寒冷的地方作为先锋植种开疆辟地。在南极菲尔德斯半岛上，夏季冰雪融化后水流经过或者汇集的地方会生长有各式各样的苔藓植物，像角齿藓、卷毛藓和丛藓等藓类。它们在那里已经生活了上百年的时间。藓类植株的下部已经死亡，上部继续生长。日积月累，形成厚厚的藓类植物层，踩上去就像踩在软软的绿色地毯上。不过要小心，水会从藓丛中挤出来，迅速漫上脚面。在菲尔德斯半岛上也生长有少量的苔类植物。

在南极菲尔德斯半岛上，我们不仅发现苔藓植物是陆地植被中的绝对优势类群，而且在水体中也有它们的身影。这是因为南极的自然环境基

本上保持在原生态水平。空气和水体清洁，基本无污染。在湖泊里经常见到水生藓类，如镰刀藓。在其他几大洲陆地上，也只有在水体没有被污染的溪水和湖泊里会发现水生藓类，我们将其视为水体高清洁度的标志。水生藓类的生长虽然会受到季节变化的影响，但是植株基本上可以均匀生长，其上的枝叶形态变化不大。

但是，南极的水生藓类和其他各大洲的在生长方式上存在差异。南极水生藓类的植株往往会出现一段生长繁茂，叶丰富、排列密集，分出的侧枝数量多，而随后的一段却是生长微弱，叶稀少、排列松散，侧枝几乎没有的独特生长方式，清清楚楚地表现出阶段性生长的特点。这是因为南极的水生藓类即使在冬天依然可以在寒冷的湖泊里生长，但是生长速度极为缓慢，除了冬季格外寒冷（尽管湖水的温度还是在冰点以上）以外，水生藓类在极夜得不到足够光线用于光合作用。而南极夏季是极昼，光照时间长，光线充足，温度升高，有利于植株生长。如此造成的一段生长繁茂的植株体加上一段生长微弱的植株体代表了该水生藓类在一个年度里的夏季和冬季的不同生长过程；到了下一个年度，又表现出繁茂和微弱的不同生长阶段。如此年复一年，水生藓类的植株体上清楚地显示出一年一年有规律的变化，犹如树木的年轮，可以告诉我们水生藓类的生长史以及环境变化的很多故事。

2006 年底，我们在长城站附近水深达到 6 米的西湖里采集到生长在湖底的水生镰刀藓的标本，其连续生长的长度可以达到 1.5 米。水生镰刀藓在每一年里夏季旺盛和冬季微弱生长的总长度是 3 ~ 6 厘米，因此，我们可以计算出这些藓类植物的生长年限。如果再配合其他学科的研究，就可以将藓类植物作为环境指示标志揭示南极水体和自然环境在时间尺度上的变化。我们研究过的北极水生藓类范氏藓，在 2007 年生长过程中的变化与当年日温度的变化也有很好的对应关系。这些研究工作都说明水生藓类可以作为气候和环境变化的监测和指示的生物标志。

被子植物

植物从海洋登上陆地已经走过 4 亿多年的演进历程。在不同的演化阶段，地球上的优势植物类群是不一样的。如今的优势类群是被子植物。由于南极极端的恶劣环境，南极半岛上只有两种土生土长的被子植物：南极发草和南极漆姑草。

南极发草为草本植物，是和水稻、小麦同属于禾本科的单子叶植物；多年生，常常密集生长在一起，垫状，呈现为直径 10 厘米左右的一丛。1 月份春季时，绿色的线条状的叶片从基部长出；小穗构成圆锥花序，每个小穗可以结 1 ~ 2 个果实；颖果红褐色，狭卵形。在 2 月底降雪之前，发草逐渐停止生长，准备度过寒冷的冬季。发草属植物在全世界广泛分布，而作为南极土著南极发草只分布在南极的奥克尼岛、南设得兰群岛以及南极半岛西侧。

南极漆姑草为草本植物，属于石竹科的双子叶植物；多年生；茎单一或分枝，呈垫状生长；花白色，单生于枝端，萼片卵形至三角卵形或披针卵形；花瓣缺失；蒴果，种子浅红褐色。南极漆姑草分布于南极奥克尼岛、南设得兰群岛和南极半岛的海岸地带。

南极发草和南极漆姑草通常生长在南极半岛海拔 50 ~ 60 米的低地上。尽管这两种植物是南极的土著居民，但它们在南极植被中却不占重要位置。这是因为这两种植物对气候和自然条件要求比较高，远不如苔藓植物和地衣适应寒冷和荒漠的自然环境。当南极 1 月份春天来临，积雪融化、万物复苏之际，多年生的南极发草和南极漆姑草长出绿色的茎叶，它们要在一个多月的时间里完成生长、开花和结果的过程，赶在 2 月下旬降雪寒冬来临之前结束一个完整的生活周期，然后要在冰天雪地里度过 9 ~ 10 个月的漫长冬季。正是因为生长季节短，植物生长缓慢，年复一年也很难看到它们有多少变化。在参加 2006 年第 26 次南极考察时，我在长城站靠近长城湾的海滩上发现了几丛发草，用鹅卵石把它们围起来，以



藓类植物



藓类植物



南极漆姑草



南极发草



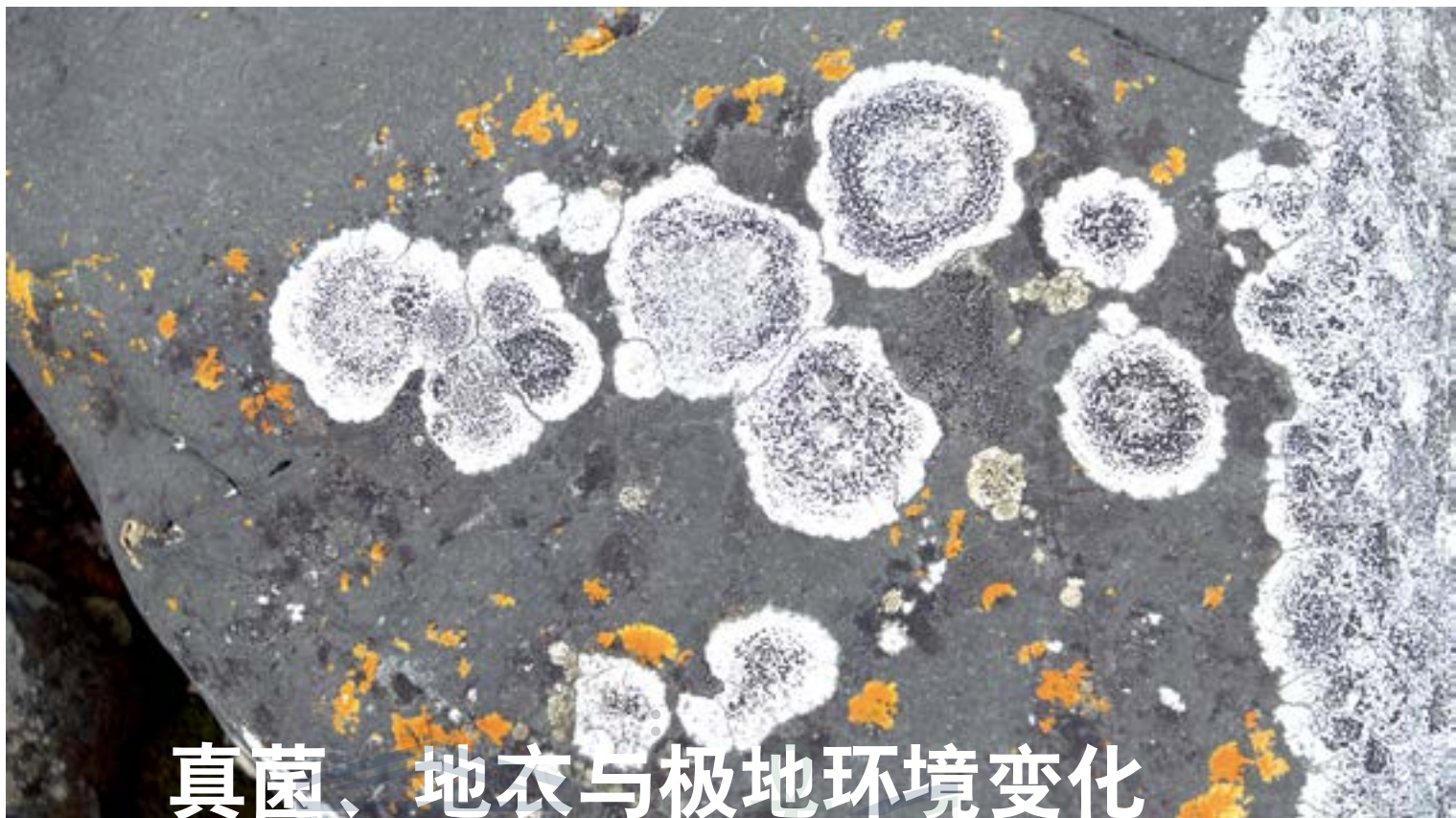
便于日后观察它们的生长变化。到了 2016 年，几乎可以说无论是草丛的数量还是生长的规模都没有明显变化。

就在这冰天雪地的南极地区，却也存在着令人难以置信的迷人绿洲。2015 年 1 月，我们随智利科学考察船在南极半岛开展考察活动，曾于 1 月 26 日登上一个名叫“生活岛”的哈纳角。在一面山坡上，一片面积在 200×100 平方米的碧绿草地展现在我们眼前。其组成主要是发草和漆姑草，还有藓类植物；周围聚集着大量的金图企鹅和海豹以及各种鸟类。这是一个寒冷的白色世界里充满生机的绿洲。这样的景致或许可能持续 1 ~ 2 个月的时间，然后会被无情的冰雪所覆盖。在南极，每年夏季绿洲的出现都为海豹、企鹅以及鸟类提供了尽情享受夏日温暖和舒适的绿地。与之相对应的，却是我们虽然在夏季却依然身穿厚厚的羽绒服在野外忙碌的身影。我们要赶在南极的夏季结束之前采集标本，制作植被样方，还要在天气变得更加恶劣之前返回考察船，否则就要留下来与绿洲共存亡了。

化石植物

在中生代侏罗纪和白垩纪的恐龙时代，南极大陆上也生活着恐龙。那时的南极也是一个炎热世界。进入新生代后，全球气候逐渐变凉，即使在新生代早期，南极大陆上依旧是山清水秀，树木葱葱。大量的植物化石提供了这方面的证据。在长城站附近的化石山以及菲尔德半岛的许多地方都可以找到植物叶片和木材的化石，包括蕨类植物的叶片，如沈氏密锥蕨；裸子植物苏铁的羽状叶片，如南极狄戎苏铁；被子植物叶片和木材，如少脉假山毛榉和科林斯卡可卢型木等等。现在依旧生长在智利和阿根廷南端的南极假山毛榉就是古代树种的延续。在中新世之前，南极大陆是与南美洲相连的，假山毛榉树就是通过相连的陆地在地传播和生长。2000 多万年的时间过去了，天翻地覆，沧海桑田，南极从绿色天地转变成冰雪世界，物是景非，大自然的威力是不可抗拒的！

本文作者系中国科学院植物研究所研究员



真菌、地衣与极地环境变化

文、图 / 李莹

南极的真菌类

我们于 2006 年、2011 年和 2012 年在南极考察时，在菲尔德斯半岛西海岸一片水源充足的海滩上发现了蘑菇。在这里我要特别强调一下：我们所熟知的蘑菇、酵母菌以及各种霉菌都属于真菌类生物。这是和植物、动物既相似而又不同的一类生物，被科学家分立为真菌门（分类单位）而与植物门、动物门和细菌门相区别。它们最大的不同之处在于真菌细胞有以甲壳素为主要成分的细胞壁，与植物细胞壁的纤维素组成成分不同。此外，真菌属于单鞭毛生物，而植物是双鞭毛生物。植物可以进行光合作用，属于自养生物；真菌不能够进行光合作用，属于腐生生物，即通过腐化作用来吸收周围物质，从而获取营养。真菌与动物比较亲近，同属于后鞭毛生物，但是真菌却不属于动物。因此，真菌自成一门。

每当夏季，南极温度升高，高地上的冰雪融化以后顺着山谷流下，穿过菲尔德斯半岛西海岸

这片绿地流入大海，源源不断地为这片湿地输送着水分。企鹅和海豹就在这里休憩，绿地上分布着数量不多的小蘑菇。这些蘑菇呈褐色，子实体圆伞状，直径在 1 厘米左右，生长在由藓类植物占优势的地块上，在绿色的藓类植物之中“鹤立鸡群”，格外显眼。尽管这些蘑菇个体较小，数量不多，并且分布面积不大，但却是地球上生长位置最南端的真菌类。我们在之后的几次考察中没有再发现它们，或许是因为考察时不是它们生长的最适宜时间。

南极的地衣

生活在南极半岛上的陆地生物的两个主要类群：一个是苔藓植物，另一个就是地衣。可以说这两大类群在南极陆地生物王国中平分秋色。在自然界中，地衣具有极其顽强的生命力，能够适应各种恶劣的生态环境。在南极极端寒冷、贫瘠和荒芜的自然条件里，多种多样的地衣成为陆地上的先锋生物，同时也成为陆地生物中的优势类

群。由于南极半岛上缺少土壤，地衣主要生长在岩石表面。它们可以产生一种酸性化学物质，将岩石表面进行分解，从而获得它们需要的部分营养物质，并且能够促进土壤的形成，为后续生物的生长开辟新的小生境。因此，地衣成为南极极端恶劣环境中的开拓者——寒冷和荒漠陆地上的开路先锋，其功劳不可埋没。

地衣作为生物界独特的一个生物类群，其特殊性在于它是由真菌类与藻类共生组成的一个具有稳定形态和特殊结构的二元性复合有机体。真菌构建生物框架结构，而藻类生活在其中。后者进行光合作用，制造营养物质，与真菌共享。这两种生物形成稳定的相关关系，具有固定的形态和结构，并且两者长久共存，以至于分类学家可以对它们进行分类学研究，给予它们双名法的属种定名。

地衣在形态和结构上通常具有三种主要类型：枝状、壳状和叶状。南极叶状地衣的代表是南极石耳，一种长在石头上的黑色地衣，与我们所熟悉的木耳的形态相类似。南极枝状地衣的优势类群是随处都可见到的簇花石萝。簇花石萝以其基部黏附在岩上，其分枝呈三维状态生长。南极壳状地衣贴着岩石表面，以同心圆的方式放射状地向四周生长，例如巢状地图衣等。

地衣通常生长在空气、水和土壤等自然环境非常洁净的地方。因此，地衣对大气等环境污染相当敏感，它们多样性的变化受到环境变化的制约。南极半岛的自然环境基本上属于原生态，生活在这个极度寒冷环境里的地衣生长速度非常缓慢。正因为地衣对环境的洁净度要求甚高，并且生长速度慢，生长年限长，因此，南极地衣可以作为环境变化的重要指示物，用来监测南极自然环境的变化，分析环境污染的可能性和污染程度。我们目前开展的南极簇花石萝所含化学元素，特别是重金属元素的分析，就是要探究南极自然环境的变化是否受到污染，以及被污染的程度。

依据地衣寿命较长的特性，在冰川退却后裸

露岩石上生长的壳状地衣可以用来推测冰川退却的年代，即地衣测年技术。地衣测年是 20 世纪 50 年代提出来的一种年代测定技术，依据地衣原植体的直径大小来估算地衣所依附的沉积物年龄。该方法被广泛地应用于陆地冰川及其邻近地区环境变化的研究，是地球上测量晚近时期冰川及冰缘沉积物年代的有效方法之一。

地衣测年技术的基本原理是基于冰川退却后裸露的岩石或其他沉积物表面上并无地衣生长，随后在很短的时间里地衣侵入。当地衣侵入后，其原植体不断生长，结果是原植体的直径不断增大。原植体直径的最大长度与其依附的岩石表面暴露时的年龄成正比关系。根据所测量到的地衣原植体直径数值，参照该地衣类群的生长曲线，我们就可以获得冰川退却时的年龄。目前用于地衣测年比较多的是壳状地衣中的地图衣和红石黄衣等。

壳状地衣新陈代谢缓慢，生存期较长，其测年范围相对也比较大。但是，叶状地衣和枝状地衣的生长速度相比较要快，测年范围也因此相对较小。例如，*Alectoria minnuscule* 测年范围不超过 500 年。生活在南极地的地衣生长速度到底有多慢，众说不一，有人认为 10 年才长 1 毫米，有人说比这还要慢。我们通过研究，获得了比较清晰的认识。我们选择生活在极地的 6 种壳状地衣为研究对象，最终发现这些壳状地衣在极端寒冷环境里的生长速度确实非常缓慢，每一年的平均生长速度不会超过 1 毫米。

依据壳状地衣研究南极冰川变化的工作开展得比较多，而利用枝状地衣进行测年的研究工作相对较少。南极半岛上的枝状地衣相当丰富，尤其是在南极半岛的陆地/海平面升降运动所造成的海滨阶地上生长着大量的枝状地衣——簇花石萝，为开展这方面的研究提供了大量的研究材料。

我们研究了南极簇花石萝的生长速度。在菲尔德斯半岛生长有两种石萝：簇花石萝和南极石萝（有研究认为这两种地衣可能归为一种）。



壳状地衣



壳状地衣



枝状地衣—南极簇花石罗



壳状地衣

簇花石罗主要分布在南极半岛西海岸，并延伸至南美洲的亚南极地区。簇花石罗在菲尔德斯半岛上分布广泛，成为该半岛地衣中的优势种群。我们对簇花石罗依附在岩石上的黑褐色基部进行碳十四测年，再根据该石罗的枝状体从基部到顶部的长度被其生长年限所除，得到了其每一年的生长速度为 4.3 ~ 5.5 毫米。

我们又选择了生活在极地和高山寒冷地区的另外 6 种枝状地衣作为研究对象，获得了所有这 7 种枝状地衣每一年的生长速度。我们发现，这些枝状地衣在极端寒冷环境里的生长速度也非常缓慢。但是它们每一年的生长速度平均会超过 2 毫米，与壳状地衣相比，枝状地衣的生长速度明显更快。

为什么枝状地衣会比壳状地衣生长得快？我们推测，壳状地衣是贴在岩石表面向周围生长，

呈现为 2 维的平面生长方式，整个地衣的原植体可以均匀获得光线。枝状地衣是以基部固着在岩石上，其分枝体是向空中生长，呈现为 3 维的立体生长方式。为了获得更多的光照，枝状地衣的分枝体会出现竞争生长的特点，从而加快其生长速度。无论如何，在南极地如此寒冷环境里，以及在十分短暂的夏季生长季节里，地衣的生长速度确实是十分缓慢的。

世界各国的科学研究人员对南极半岛上地衣的分类研究已经有了雄厚的积累。在此基础上，依据地衣的多样性、对寒冷和荒漠环境的适应性、对洁净生长环境的严格限制及其生长速度极为缓慢的特性开展南极环境的监测和分析已经成为国际上南极研究十分重要的课题。同时，利用地衣来研究南极冰川的动态变化，也是研究南极环境变化的重要内容之一。

本文作者系德国海德堡大学地理学院博士

保护南极植物和地衣

文 / 李承森

在国家海洋局极地考察办公室的支持下，我们于 2012 年正式启动了“南极植物保护与管理问题研究”专题。本专题针对南极植物及微生物保护这个重要内容，以南极半岛、拉斯曼丘陵和维多利亚地等区域的植物和微生物的种类组成、分布、数量等为研究对象，结合南极条约《环境议定书》附件 2 的相关规定，对保护南极植物，防止外来物种损害南极生态环境，对南极植物采集等行为进行有效管控，为科学规范管理我国在南极半岛开展的采集植物样本等可能干扰植物生长的人类活动提供对策和建议。

南极陆地上极为少量的被子植物以及占优势地位的苔藓植物和地衣，均处于非常缓慢的生长状态。一旦这些生物个体、群体、群落遭到破坏，要想恢复是极为困难的。在菲尔德斯半岛的西海岸，有一片自然环境和生物都极具特色的区域，那里的发草（被子植物）、苔藓植物、地衣等都有分布；大量的企鹅和海鸟、成群的海豹、再加上夏季冰雪融化的湿地，无疑是一片生物多样性丰富的区域。建议可以作为我国长城站今后工作的重点，组织动植物、地质、海洋、冰川和大气各个相关学科的专家联合开展研究。

目前南极的自然环境是一个几千万年历史演变的结果，具有极端寒冷、荒芜和极为脆弱的特征。南极大陆环境和气候发生重大变化的关键时期是在 2200 万年前，南美洲与南极大陆的最后一块陆地联系断开之后，环绕南极大陆的海洋洋流形成，并且是属于寒冷的洋流。从低纬度（赤道）流过来的海洋暖流被环绕南极大陆的海洋冷流所阻挡，到达不了南极地区，致使南极的气候越来越寒冷。

在南极自然环境和气候的漫长演变过程中，南极大陆和周边的海洋、陆地上厚达数千米的冰盖、宇宙辐射、高空大气以及海洋生物和陆地生物，逐步达到一个均衡和统一的状态，即处于一个相对稳定的自然环境之中。南极陆地上的生物和环境的统一是南极自然环境长期演变的结果。但是南极的自然环境具有独特的极端性和脆弱性，极易遭到破坏。因此，要保护南极植物和地衣，必须首先要考虑保护南极的自然环境。在全球变化中，受到地球与太阳的关系变化所影响的气候变化是人类能力所不能够控制的。而人类活动加剧的环境污染所导致的气候变化确实需要引起高度重视，尤其是在南极地区。

作为《南极条约》所允许和鼓励的南极科学考察活动，使南极大陆上不断增加着考察站和考察人员。所有建站以及考察人员的生活物资都是从海上或者从空中运输进来的。大量的化石燃料（航空油、汽油和柴油等）用于运输、客轮和考察站发电，其燃烧后的废气和残留物加上来自科学考察活动和游客的数量极大的生活垃圾，以及所有这些危害环境的物质处理，都关系到南极环境的保护。如果南极环境保护不到位，首当其冲受到破坏的就是南极的陆地植物和地衣。保护南极自然环境，保护南极陆地生物，特别是保护陆地植物和地衣，不仅是重要的科学研究课题，而且是一个亟须规范的社会行为。

有关南极条约规定，所有科学工作者都有义务保护南极的自然环境，保护南极陆地上的生物。对于科学研究所需要的南极植物和地衣标本的采集，必须要事先得到相关部门的批准和持有许可证。除此以外的任何对南极陆地上生物的采集和破坏都是不允许的。

地球是一个家

文 / 张庆华

我们于 2009 年开始在长城站及附近区域开展持久性有机污染物 (Persistent Organic Pollutants, 简称 POPs) 的样品采集和环境行为研究。经过 7 年的努力, 我们已经在菲尔德斯半岛和附近的阿德利岛布设了数十个固定的样品采集点, 获取了大量宝贵的南极环境样品, 为调查南极环境中持久性有机污染物赋存水平、迁移转化和环境效应提供了重要的支撑和保障。

随着现代工业和技术的发展, 南极洲也相继出现了各种环境问题, 如过度捕捞、垃圾污染、旅游干扰、动植物生存环境的破坏, 以及潜在的矿产资源开采等。一些全球性的环境问题, 如全球气候变暖、臭氧层空洞等, 也都对南极的生态环境造成严重的威胁。

除此之外, 南极还遭到了另一种危害——来自工农业化学品或副产物的污染。20 世纪 60 年代, 滴滴涕、六六六和环氧七氯等有机氯农药首次在南极地区的野生动物体内检出, 随后的研究表明, 有机氯农药已广泛存在于南极地区几乎所有的环境介质及生物体内。这些有机氯农药类属典型的持久性有机污染物, 具有难降解性、生物蓄积性、长距离迁移性及高毒性, 是对环境和人类健康有严重危害的人工合成或天然的有机污染物。第二次世界大战期间, 有机氯农药开始得到大规模的使用, 由于其惊人的杀虫效力, 对当时的黄热病、疟疾和霍乱等疾病的控制起到了巨大作用。1962 年, 美国海洋生物学家雷切尔·卡逊 (Rachel Carson) 在她的著作《寂静的春天》一书中首次揭露了滴滴涕等有机氯农药进入食物链, 导致大量的鱼类和鸟类中毒死亡, 让原本鸟语花香的大自然变得万籁俱寂。随着这些化学品

对生态系统和人体的巨大危害被越来越多的研究所证实, 20 世纪 70 年代, 滴滴涕等杀虫剂陆续在世界各国被禁用或限制生产和使用。

为保护环境和人类免受持久性有机污染物的危害, 2001 年 5 月 22 日, 179 个缔约方在瑞典首都斯德哥尔摩签署了《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》, 我国作为缔约方加入了这个公约。公约规定对 12 种持久性有机污染物, 包括艾氏剂、氯丹、滴滴涕、狄氏剂、异狄氏剂和七氯、六氯苯、多氯联苯、灭蚁灵、毒杀芬、多氯代二苯并-对-二噁英和多氯代二苯并呋喃, 在缔约国内进行严格控制和削减。该公约自 2004 年 5 月 17 日正式生效, 随后在 2009、2011 和 2013 年又相继增加了几种污染物进入公约受控名单。到目前为止, 公约受控物质已经增至 23 种。

极地 POPs 来源途径

全世界范围内, 无论是偏远的沙漠腹地还是高海拔地区, 在各种环境介质中都发现了持久性有机污染物, 甚至在荒无人烟的南北极地区也都检测到了这些物质的踪迹。为什么这些持久性有机污染物会出现在那些人类活动较少, 没有明显污染源的地区呢? 究其原因, 就要提到它们特有的长距离迁移性质了。持久性有机污染物由于具有半挥发性, 能够在温度相对高的低中纬度地区从水体或土壤中挥发, 并以蒸气的形态进入大气或者吸附在大气颗粒物上, 在高空进行远距离迁移, 随着降水或气温的降低而冷凝沉降到地表, 温度升高后又挥发回大气。如此反复, 这些持久性有机污染物在大气和地面间来回跳跃, 这种现象被称为“蚱蜢跳效应”, 这样这些物质就能从

近些年来，随着对全球环境加强整体化保护的意识的逐渐提高，人们开始认识到南极能提供一个独特的平台，使得持久性污染物的输移、行为及效应等方面的研究成为可能。实际上，《斯德哥尔摩公约》激发了有关持久性有机污染物的研究项目，体现在溯源、大范围输移、环境中的水平、生物学效应、污染物现有替代物、可能的补救行动等的评估上。为获得这些结果，地球被划分为12个区域，南极被联合国环境规划署指定为开展持久性有毒物质的全球评估区域。然而，和北极相比，相关研究在南极开展得不多，协调一致的监测和评估工作也尚未得到开展。

编译自南极研究科学委员会官方网站

低纬度地区迁移到高纬度地区了。由于温度差异，地球就像一个大的蒸馏系统，持久性有机污染物在温度相对高的低中纬度地区挥发进入大气，在寒冷的高纬度地区重新沉降下来，而极地的低温又抑制了它们的挥发，因此很多持久性有机污染物最终都会沉积在南北极。除了随大气长距离迁移，持久性有机污染物还可以通过海洋洋流输送、迁徙动物携带以及人类的极地活动等途径进行长距离迁移，最终有可能到达南北极。

南极 POPs 生物放大效应

很多持久性有机污染物，如有机氯农药、化工产品（多氯联苯、六氯苯）等在很多国家已经禁止生产和使用很多年了，但是为什么我们仍然能在南极的地衣、企鹅和海豹等生物体内检测到这些物质？这是因为它们还具有另外一种特性——持久性。由于其化学结构稳定，受自然界微生物、光热、水解作用等影响很小，一旦排放到环境中，很难被分解，因此可以在水体、土壤和底泥等环境介质中存留数年甚至数十年或更长的时间。如，20世纪60年代美国在越南战争中喷洒一种叫“橙剂”的化学品使树叶脱落，使当地的游击队员无法利用茂密的森林藏身。“橙剂”的主要成分为植物生长调节剂2,4,5-三氯苯氧乙酸和2,4-二氯苯氧乙酸，但其中高含量的剧毒物质——二噁英不仅使当地人深受其害，就连参战的美军也未能幸免，甚至其后代同样受到影响。那些曾经被喷洒过“橙剂”地区的水源和土壤中的二噁英毒害至今仍未消除。

另外，持久性有机污染物具有较高的脂溶性，通过饮食、呼吸和表皮接触进入生物体内后，极易在脂肪组织内累积，并通过食物链由低营养级向高营养级生物体传递。我们对数次南极科考所采集的样品分析发现，部分持久性有机污染物具有很强的生物累积效应。以多氯联苯(PCBs)为例，海水中的多氯联苯浓度极低，约为0.005 ppt (ppt为浓度单位，表示万亿分之一)，在藻类中的浓度为0.08 ppb (ppb为浓度单位，表示十亿分之一)，南极鱼体内约为0.5ppb，企鹅体内的浓度约为5 ppb，而在海豹体内，多氯联苯的浓度富集到20 ppb。由海水到海藻，多氯联苯发生了几万倍的生物浓缩，而从食物链低端的藻类到食物链中间的底栖鱼类再到食物链高端的企鹅、海豹，持久性有机污染物的浓度越来越高，多氯联苯的浓度从海藻到海豹放大了几万倍。由此看到多氯联苯通过食物链传递后，其浓度逐渐升高，在高营养级生物体内进行了蓄积和倍增。当然并不是所有持久性有机污染物在食物链中都存在显著的生物倍增效应，因为不同污染物的生物可利用性有差异，不同生物的污染物降解或生物转化行为也不同。目前关于南极地区食物链中持久性有机污染物的生物富集效应报道较少，我们的研究也还很初步，需要后续研究补充和完善数据信息。

南极样品采集和分析

南极地区的采样工作难度很大，这里气候寒冷潮湿、道路泥泞崎岖并且电力供应缺乏，采样设备运输和操作都面临重重考验。2009年，江

桂斌院士作为我国第 26 次南极考察队队员到达长城站时，发现站上样品采集和实验条件十分简陋，根本无法开展基本的大气等样品采集和处理。鉴于这种情况，研究团队决定加快基础实验设施和野外站点建设。从这次考察开始，环境科学工作者先后在长城站装备了四台大流量大气采样器，并首次在该地区开展了大气中持久性有机污染物的样品主动采集和分析工作；同时配备了生物样品冷冻干燥仪、大体积水样富集器等必要的样品前期处理设备，基本可以满足对持久性有机污染物研究所需的水土气和生物样品的样品前处理需求。由于研究团队仅可进行度夏科考，为了获得大气中持久性有机污染物常年的监测数据，考察团队和国家海洋环境预报中心极地预报室合作，开展了全年大气中持久性有机污染物监测研究，成功获得了极地冬季研究数据。目前该监测活动已经持续 4 年多，获得了数百份宝贵的样品，部分研究成果已经以论文形式发表，这是国际上针对该地区大气中持久性有机污染物主动大气数据的首次报道。

刚开始时，大流量空气采集设备安置在室外，为避免恶劣天气，我们只能集中在夏季的两个月采集大气样品。在 2013 年的南极科考中，我们对空气采样器进行了改造，把仪器安移到室内，抽气管位于室外，这样即使在极端恶劣的天气下也能正常采样。另外，我们还在大气采样点周围采集了土壤、底泥、苔藓、地衣、褐藻和海草，海洋动物（南极蛤、帽贝、端足类、海星、南极鱼）等多种样品。我们在采样过程中，除了要考虑到安全因素，会注意尽可能地减少对南极原生环境的破坏。采集到的液体样品封装在塑料或玻璃瓶内，而对于固体样品尤其是生物样品，为防止其在后续的运输过程中腐烂变质，需在长城站内进行初步的冷冻干燥，再密封保存和运输。

极地的持久性有机污染物在环境中的浓度水平非常低，尤其是超痕量的污染物如二噁英等，需要使用特别灵敏的检测仪器和方法进行分析，样品处理和检测工作也需要在清洁和温湿度相对稳定的专业实验室内完成。我们在实验室内对部分含水的样品进行冷冻干燥并研磨粉碎，对样品

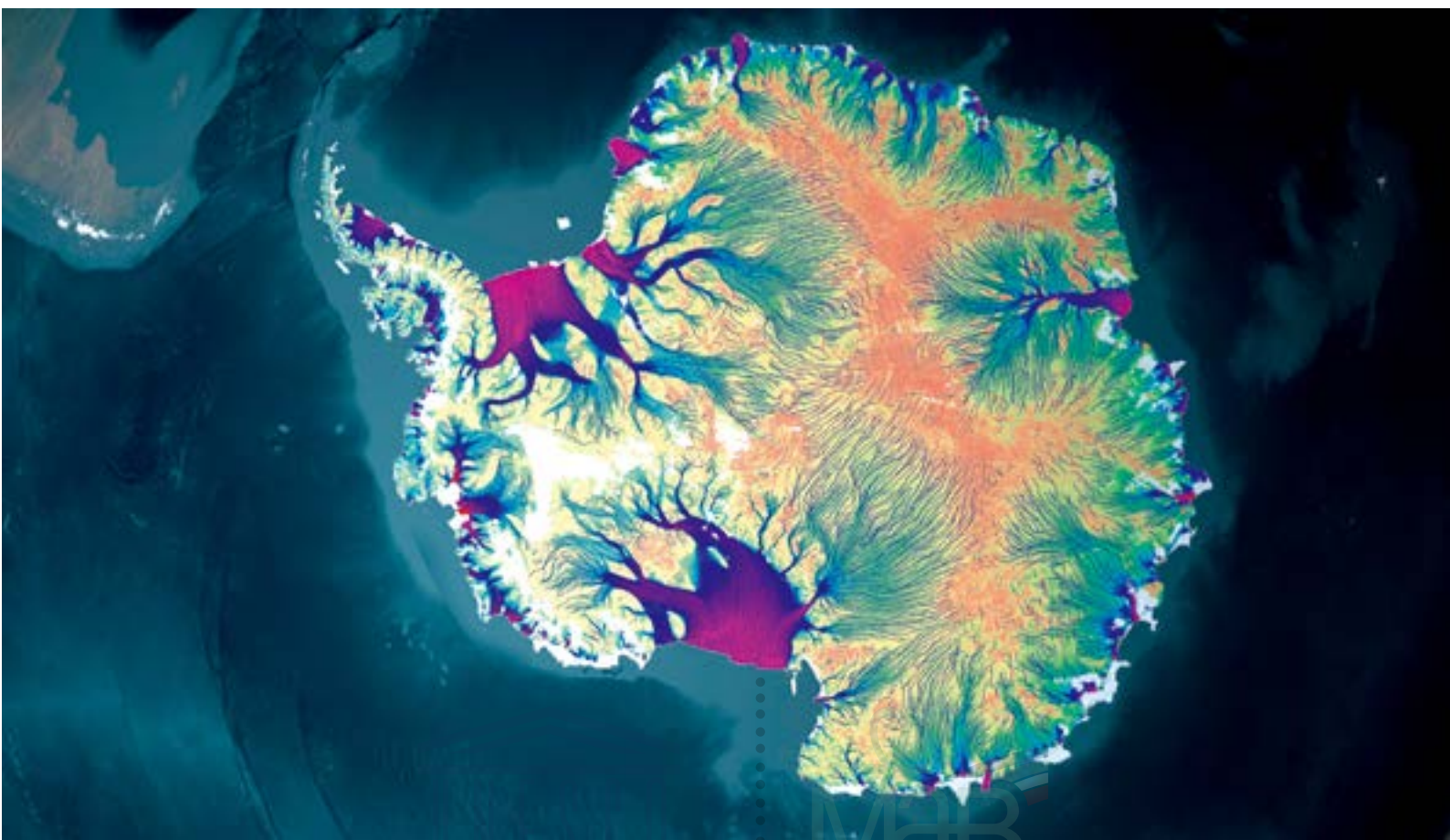
中目标污染物进行溶剂萃取、净化以及多步浓缩，最后进行仪器分析。我们采用目前国际上最成熟和先进的分析仪器——高分辨气相色谱/高分辨质谱来检测二噁英、多氯联苯、多溴联苯醚等痕量污染物。它拥有超高的灵敏度和低检测限值，可对目标污染物进行精确的质量筛选，确保分析结果的准确性。

南极开展 POPs 研究的意义

斯德哥尔摩公约是保护人类和环境免受持久性有机污染物危害的全球行动规划，我国是首批公约缔约国。极地检出是判定某种化学品为持久性有机污染物的重要依据，因此这项极地研究对于我国履行国际公约有十分重要的战略意义。以往由于研究基础薄弱，此项工作都由西方发达国家主导。我国是发展中国家，很容易被西方发达国家利用公约的规定对我国某些产业进行限制，造成巨大的经济损失。研究团队的极地持久性有机污染物研究工作提高了我国极地研究地位，增加了我国在公约谈判中的主动权。我们极地研究团队的成员江桂斌、郑明辉和王亚韡等以中国代表团代表的身份，已经 46 次参加联合国环境署《斯德哥尔摩公约》缔约方大会以及相关谈判工作会议，为我国开展相关的履约活动提供了重要技术支持，为争取国家利益做出了重要贡献。

南极独特的地理环境使其远离化学污染源并与其他生态系统处于相对隔离的状态，从而使它得以提供全球环境演变的历史背景信息，成为全球环境变化最有价值的“参照区”。研究南极地区持久性有机污染物在环境及生物体内的浓度水平，不仅可以对南极环境中这些物质的污染情况进行监测，也有助于我们对它们的长距离迁移途径有更进一步的理解。同时，这些持久性有机污染物在具有捕食关系的生物体内浓度的差异，可以清晰地反映出污染物在食物链中可能存在的生物富集和放大效应。为了对极地持久性有机污染物的来源及其在极地生态系统中的赋存及食物链中的迁移规律进行研究，我们还需要更为系统地采集当地的环境及生物样品并进行深入的分析和探讨。

本文作者系中国科学院生态环境研究中心研究员



“天眼”看南极

文、图 / 程晓

伴随着人类科学技术和文明的发展，人类认识南极的过程不断深入，其中，几个关键时间点分别是航海时代、航空时代和航天时代。

人类认识南极的几个阶段

航海时代：1774 年，来自英国的库克船长在执行航海任务时发现了一片“隐约的大陆”，即南极大陆。库克船长成为第一个进入南极圈的人，也由此拉开了世界各国南极探险的序幕。

在南极探险的历史中，竞先到达南极点的故事最为人们熟知。1910 年，英国海军上校斯科特和挪威探险家阿蒙森先后宣布向南极点进军，两队之间开展激烈的生死角逐。阿蒙森用狗拉雪橇于 1911 年 12 月 4 日成为第一个到达南极点的

人；而斯科特于 1912 年 1 月 6 日到达，并在返程中遭遇暴风雪而全军覆没。前往南极的探险家们前仆后继，甚至不惜献出自己的生命，谱写了一曲曲人类南极探险的壮丽诗篇，同时也积累了宝贵的南极地理学、气象学、生态学、冰川学和海洋学等多方面的资料数据，为后续南极科考提供了有力的支撑。

航空时代：20 世纪 20 年代人类进入航空时代后，苏联、美国和澳大利亚等国的飞行员飞入这片神秘大陆的上空。他们用胶片相机记录一幕幕从飞机舷窗看到的白色大陆的景色，在这一时期也命名了南极的很多重要地名。

1929 年 11 月，美国人伯德驾驶飞机飞越南

极点，之后他曾三次飞临南极点进行低空摄影。1946 ~ 1947 年，美国海军部启动了代号为“跳高行动”的大规模南极考察项目，调动了海军第 68 特遣队共 4700 余名军人、13 艘舰艇和 33 架飞机对南极大陆进行了详细勘探，意图在南极建立长期基地从而利用其潜在军事价值。次年，美国又开展了代号为“风车行动”的后续南极考察项目。

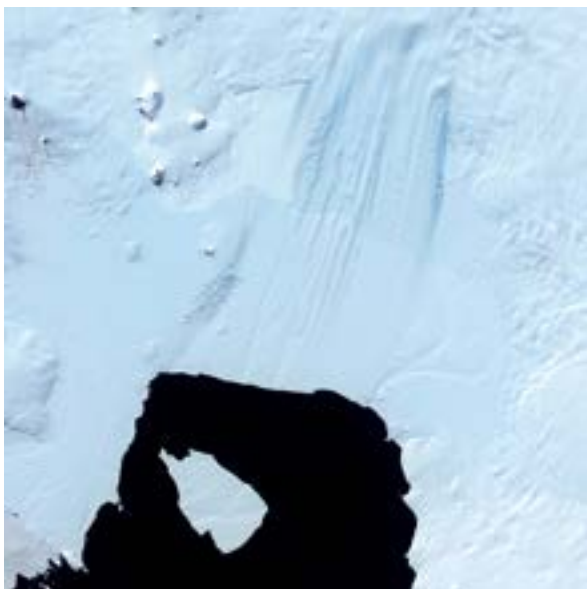
1956 ~ 1960 年，澳大利亚南极考察队对东南极地区进行了大规模的航空摄影，并命名了东南极中部的许多地名，比如以莫森站通讯主任之名命名了萨哈罗夫岭，以 1958 年在此降落的澳大利亚空军飞行员的名字命名了格罗夫山等。

可以说，飞机在极地考察中的应用，极速缩小了南极的未知区域，让南极越来越清晰地展现在人类面前。

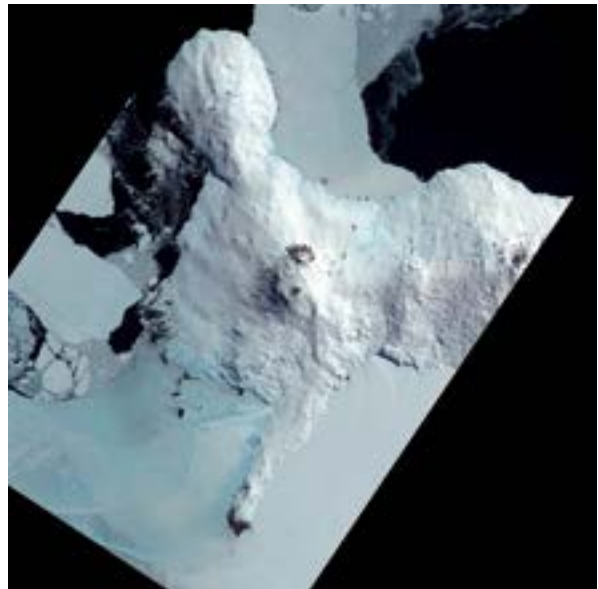
航天时代：20 世纪 50 年代，人类进入航天时代。遥感技术，尤其是由航天发展派生的卫星遥感技术成为科学家研究南极的重要手段。人类第一次认识南极洲全貌就是通过遥感卫星，20 世纪 60 年代的美国 Argon 返回式间谍卫星解开了

南极洲的神秘面纱。Argon 间谍卫星在轨运行时间为 1961 ~ 1964 年，主要拍摄目标是南极洲，卫星成像的地面分辨率为 140 米，幅宽 556 千米，该卫星拍摄了历史上第一幅南极遥感影像。Argon 卫星连同另外两颗极轨间谍卫星 Corona、Lanyard 在 1959 ~ 1980 年期间共拍摄了 99 万张全球地表遥感影像，这些影像在 1995 年 2 月 23 日解密，并由美国国家档案馆和美国地质调查局保存。2005 年，美国国家冰雪中心科学家精选了 62 张由 Argon 卫星在 1963 年 8 月 29 日至 1963 年 11 月 3 日拍摄的南极洲影像，拼接得到了分辨率为 100 米的南极外围黑白镶嵌图，该镶嵌图所记录的南极洲早期冰川特征为南极冰盖变化监测研究提供了重要的历史资料。

随着 NOAA 系列卫星的成功发射，该卫星上搭载先进的高分辨率辐射计 AVHRR 能以 1000 米的分辨率对地成像，影像高幅宽的优势使 AVHRR 影像适合于南极洲影像镶嵌图的制作。20 世纪 80 年代，美国地质调查局的科学家选取了搭载在 NOAA-6、7、9、10、11 和 12 这六颗卫星上的 AVHRR 在 1980 ~ 1994 年期间所拍摄的 38 景夏季无云影像，拼接得到了第一幅南极彩色镶嵌图。



LIMA 计划拍摄的 1999 年 1 月 1 日（左）松岛冰川



LIMA 计划拍摄的 2013 年 12 月 31 日的埃里伯斯火山



卫星雷达技术加速南极科研进程

科学家仍然不满足于得到的南极洲静态图像，因为南极的冰层是处于不断运动中的，有的年份运动速度甚至超过 2000 米。20 世纪 90 年代发展起来的卫星雷达干涉测量技术，能够检测到细微的地面运动或形变，成为从太空中探测南极洲表面冰流速的利器。科学家利用卫星雷达数据开展了大量的冰流速测量。

1997 年 9 月 26 日，美国国家航空航天局、加拿大宇航局、阿拉斯加卫星接收站和俄亥俄州立大学等多个机构展开合作，租用加拿大商业遥感卫星 Radarsat-1 号，通过重新编程将其雷达天线翻转方向，对超过南纬 78° 的整个南极洲开展了为期 24 天的连续成像活动，第一次获得了整个南极洲的雷达图像，空间分辨率高达 25 米。2000 年，在此基础上实施了第二期南极制图计划 AMM-2，借助 Radarsat 精细成像模式，完整拍摄了三个重访周期，南纬 80° 以北的地区都得

到了至少六次拍摄，获得了南极大陆大部分注出冰川的表面流速信息，这也是人类研究南极的重大科学行动。此次测图任务充分展现了星载合成孔径雷达遥感的巨大威力，基于两次测图计划生成的冰川流速、海岸线位置、接地线位置、后向散射强度和表面冻融等信息已成为南极冰川学研究的重要基础数据。例如，在此基础上发现了拉森-B 冰架 3 年内退缩 30 公里，该冰架在两年之后完全崩解。

进入 21 世纪后，不断涌现出干涉雷达、极化雷达和激光雷达等新技术，Envisat、MODIS、Hyperion、ALOS、ICESat、CryoSat-1/2、IceBridge、Landsat-8 和 Sentinel-1/2/3 等飞行任务也接连启动，为深入开展南极研究提供了更多可选的数据源。例如，利用 ICESat-1 对冰雪物质平衡进行精确估算；利用 ERS-1/2、Envisat 等进行长时间序列的干涉测量，监测西南极海洋型冰盖接地线退缩情况。2011 年，基于 ALOS-

PALSAR、Radarsat-2 和 ERS-1/2 等，美国国家航空航天局喷气动力实验室发布最新的南极冰流速数据集，首次展现了全南极冰流特征。

1999 年，美国发射的陆地卫星 7 号对南极地区开展了长期拍摄，积攒了上万幅卫星照片。获得这些图片资料后，美国和英国的科学家又启动了 LIMA 计划，即陆地卫星南极制图计划。从 2008 年开始，他们从 1999 ~ 2003 年间的上万幅照片中精选了 1073 幅，历时 1 年多拼接得到了一副南极洲全图，分辨率由之前的 25 米提升到了 15 米，成为人类认知南极的又一重要里程碑。

近年来美国开展 Worldview 计划，对南极进行了高精度的监测，成像精度高达 0.3 米，再一次领跑世界对南极的研究工作。

中国南极遥感科技新进程

在南极科研的早期阶段，我国科学家并没有自己的极地遥感声音。但是近年来，在国家科技部“863”计划的支持下，中国科学院遥感应用研究所和北京师范大学合作，与美英科学家几乎同步完成了南极洲陆地卫星全图，部分地区和部分指标领先于陆地卫星南极制图计划的成果图。此外，我国科学家还在此基础上研制了全世界首个南极洲地表覆盖图，得到国际同行的广泛赞誉。从这时开始，我国极地遥感领域的科学家开始逐步跟上国际同行的步伐。同时，他们还积极参与极地科考船航行安全保障任务，提供实时冰情图以及航线规划建议等，极大地促进了我国极地科考工作的开展。

我国卫星遥感技术发展多年，但过去对于极地尤其是南极地区缺乏关注，拍摄主要面向国内和我国周边地区。2008 年这一状况得到突破，年初，受中国南极科学考察队委托，我国北京 1 号小卫星和资源 2 号卫星对南极格罗夫山和冰穹 A 地区开展了拍摄，资源 2 号由于相机曝光增益未调节到位而发生曝光过度，北京 1 号小卫星则成功拍摄了南极格罗夫山地区大范围彩色影像和



北京师范大学无人机团队在南极中山站作业

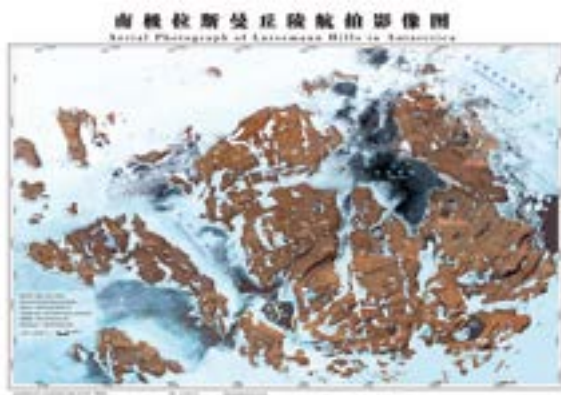
南极冰穹 A 地区的高分辨率全色影像。这被认为是中国遥感卫星南极拍摄的处女作。此后，虽然我国遥感卫星没有实现对接南地区的业务化拍摄（主要受制于卫星地面接收站的稀少），但只要接到请求在条件允许的情况下都会安排拍摄，如环境与减灾小卫星、资源 3 号卫星以及高分卫星等。一些卫星图片在“雪龙”号被困于南极海冰时发挥了非常重要的作用。

近几年，中国对于南极的科学研究项目逐渐增多，研究人员利用辅助卫星遥感以及无人机等先进的观测技术对南极进行了更加细致、全面的科考工作。

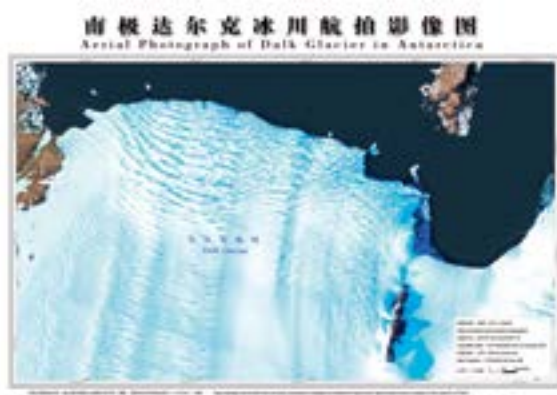
科技助力南极冰架研究

南极冰盖的浮动部分（“冰架”）发挥着稳定内陆冰流的作用，决定了南极对全球海平面上升的影响。利用卫星遥感图像，我国科学家首次围绕整个南极海岸线测量所有大于 1 平方公里的冰山，并评估了所有冰架的“健康”状态。结果显示，南极一些大的冰架正在扩张，而许多小的冰架正在退缩消失。同时，由高崩解率导致退缩的冰架正经历着由底部消融带来的厚度变薄，这揭示了冰架的命运可能超出前人的预估，对海洋强迫更为敏感。

2015 年 3 月的《美国科学院院刊》发表了以上研究成果。国际专家对此次中国的研究成果给予了高度评价，认为：“南极崩解数据本身已非常重要，而在建立冰架底部消融与崩解潜在关系上研究者又迈出了重要的一步”“这是多年来



南极拉斯曼丘陵航拍影像（北师大 PRSDC 无人机团队）



南极达尔克冰川航拍影像（北师大 PRSDC 无人机团队）

在冰架动力学、物质平衡及其与海洋相互作用方面最引人注目的研究”。国际卫星测高研究顶级专家、法国科学院院士 Anny Cazenave 指出，该研究结果将有助于提高未来冰盖模式模拟的准确性和未来海平面升高预测精度。

无人机在南极成功应用

21 世纪以来，美国、日本和英国等科技强国开始在南极利用无人机技术开展实验和科学研究，我国也积极开展了无人机对南极的监测工作。2014 年 11 月，中国第 31 次南极科学考察队配备了“极鹰一型”遥感无人机。该型无人机由北京师范大学研发，是国内首款专门用于极地遥感观测的无人机。“极鹰一型”翼展 3 米，使用汽油发动机动力，能以每小时 105 公里的巡航速度，在 1500 米的最高高度上连续作业超过 90 分钟。在南极 5 个月的考察期间，“极鹰一型”共飞行 7 架次，拍摄地面影像超过 2000 景。借助无人机拍摄的高清影像和经处理得到的数字地形模型，中国科学家首次在中山站周边的达尔克冰川前端发现一个冰隆，该冰隆对达尔克冰川的生命周期和周边海洋环境有着重要影响。

2015 年底至 2016 年初，中国第 32 次南极科考期间，新型电动无人机“极鹰二型”被用于以长城站为中心的南设得兰群岛相关科考。北京师范大学派出的两个无人机组分别在长城站、阿德雷岛和洛克港等重要地区进行航飞拍摄，所获取的影像总量超过 1500 景。获取的成果图件除可以支持中国在长城站的站基考察和周边生态地貌调查外，也受到西班牙和智利等国科学家的关注和好评。

2016 ~ 2017 年，中国第 33 次南极科考队中，来自北京师范大学的无人机组携带了 5 种机型共 9 架飞机参加科考，其中最新的“极鹰三型”无人机可以在半小时内完成起飞前的全部准备工作，整个作业过程基本无须人为干预，实现了真正的自动化快响应观测。在前半程的科考工作中，机组出色地完成了固定冰探冰、冰山调查和冰川观测等任务。这标志着我国极地无人机遥感技术已经完成了技术测试和验证，开始进入业务化观测和数据采集的新阶段。

结束语

南极作为远离人居大陆的最后一块净土，在各国历代探险家与科学家的不断探索与研究下，其神秘面纱被一点点揭开。人们也从早期的实地野外考察，开始逐渐转变为利用飞机、卫星和无人机等高科技手段进行观测，并取得了一系列细致且全面的科研成果。同时，基于这些数据也可以对南极进行长时间序列的变化监测。可以说新兴科学技术的引入为人类认识和了解南极提供了强有力的支撑，但是在南极研究上仍然缺乏有效且丰富的数据资源，缺乏长期的数据积累与储备。对于我国而言，需要更快地提高卫星遥感的成像及监测技术，并加强极地地区影像数据的获取效率。此外，也急需加强国际间极地科研的交流与合作，共享各国的数据资源和研究成果，快速推动人类对南极的研究工作，使这片神秘的土地可以更多地被人们所了解，进而可以更加合理利用和保护南极丰富的自然资源。

本文作者系北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院院长，教授



文、图 / 李航

极地科考，测绘先行。测绘在极地科考中发挥了重要的保障服务作用，同时也是科研工作者研究南极及其环境变化的重要观测手段，为人们更深入地认识南极做出了贡献。30 多年来，一代代测绘科研人员前仆后继，探索南极奥秘，揭示地球科学规律，引领着南极测绘科学问题的研究潮流，为我国极地测绘考察探索出了一套完整的科学技术体系，填补了我国相关科学研究领域的空白。

1991 年，为了更好地对南极进行测绘相关学科的研究，原国家南极考察委员会和原国家测绘局联合发文批准成立了中国南极测绘研究中心，并在 2010 年成为直属武汉大学管理的实体

性科研机构。从我国第一次独立开展南极科考开始，武汉大学测绘学科就选派专业人员参与其中，30 多年来从未间断，至今已累计派出了一百余人次参加。

测绘科学在南极的主要研究领域包括：极地大地测量与地球动力学、极地遥感应用、极地地理信息与资源环境评价、固体地球物理与极地海洋以及极地战略等。经过长期以来的积累和发展，我国北斗卫星导航系统在南极测绘基准和系统建设初具规模，建立了包括平面坐标系、高程系统、重力基准和 GPS 卫星跟踪站等在内的东、西南极和南极内陆大地测量基准系统，布设了 100 多个大地测量控制点；为南极长城站、中

山站、昆仑站、泰山站以及维多利亚地新站（筹建中）建站选址和建设提供了及时可靠的测绘保障，为科学考察活动提供了导航定位支撑；利用高分辨率遥感卫星和低空航空摄影测制了覆盖面积 30 多万平方公里的南极地图，命名了 300 多条得到国际南极研究科学委员会承认并公布的南极地名，建成了极地空间数据库和信息管理系统；建立了中山站至昆仑站内陆考察大通道，找到并测定了南极冰盖最高点——冰穹 A 等。测绘学科考察队员们前赴后继，为我国南极考察提供了现场技术支撑，也取得了丰硕的科研成果，受到国内外极地科学界的广泛认可。

实验室里的年轻老师张胜凯，是我们眼中的极地英雄。2004 年末，他受命第二次前往南极，肩负的一项重要任务就是寻找南极大陆冰盖最高点冰穹 A。冰穹 A 海拔超过 4000 米，是南极内陆冰盖海拔最高的地区，也是南极内陆距离海岸线最远的一个冰穹。因为该区域的气候条件极端恶劣，被称为“不可接近之极”。由于当时国际上还没有从地面进入冰穹 A 开展过系统科学考察活动，因此也成为了南极科学考察和研究的空白地区和制高点。我国早在 20 世纪 90 年代向国际南极研究科学委员会正式提出冰穹 A 科学考察计划，并在数次的南极考察过程中对冲顶该区域进行了准备工作。

站在在南极大陆一望无际的冰原上，如果没有精确的技术手段作为支撑，很难分辨出周围地形的起伏。“雪盲”现象也从侧面很好地解释了人们在长时间没有参照物的情况下，丢失自身坐标的现象。为了精准测量出这片白色荒漠上最高点的坐标，张胜凯和队员们在到达冰穹 A 区域附近后，就开始了高强度的野外测绘工作。在风雪肆虐、高原缺氧的环境下，他们必须要抓紧时间进行野外测量和数据处理工作。据他回忆，在近两周的时间里，白天要扛着沉重的仪器从营地外出采集数据，晚上要对白天采集的数据进行处理和分析。那段时间里，他们几乎都要工作到凌晨四五点，睡眠时间也只能压缩到四个小时。最后，

在队友的协助下，他一共测绘了冰穹 A 区域 70 平方公里范围的地形图，才最终确定了南极冰盖最高点的精确坐标。这是人类历史上第一次对南极冰盖最高点区域进行实地测量，填补了国际研究上的空白，也为三年多后昆仑站在该区域的落成打下了坚实的基础。这是我国为人类探索南极奥秘做出的又一个重大贡献。

目前，全球共有四套大型的全球卫星导航系统，它们分别是美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、欧盟的 GALILEO 以及我国自主研发的北斗卫星导航系统。其中，已经投入市场 20 余年的 GPS 为大家熟知并广泛使用。相比美国在全球范围内布设 GPS 卫星地面监控站，我国的北斗卫星地面监控站曾一度均建于国内。因此卫星的定轨和地面用户的定位精度都受到了一定的限制。从 2007 年开始，在南极中山站布设的卫星地面接收站开始接收北斗导航卫星的信号，极大地延伸了地面对北斗卫星轨道监测的弧段，成倍地提高了北斗卫星的测控精度，具有非常重要的科研和战略意义。2015 年 2 月，长城站建成了北斗卫星导航系统南极基准站，并将逐步升级为南极地区北斗地面测控站，为今后北斗在南极地区的应用和研究提供更好的数据支持。

虽然目前世界各国总计已经有数十座科学考察站位于南极沿海地区，但严酷的自然环境和稀少的采样点都限制了人类对南极周边海域的认识和研究。验潮站是用来监测海平面变化最直接的观测手段。先我参加南极科考的老师和师兄们，在长城站和中山站建立起可以实时接收潮汐观测数据的验潮站。通过监测仪器不停地工作采样，融合气象数据后能够提取海洋潮汐特征，并可以对未来一段时间内的潮汐做出预报。

2014 ~ 2016 年，我参加了中国第 31 和 32 次南极科学考察，在南极中山站连续驻守了 15 个月，主要负责全球卫星导航系统南极地面接收站和极区验潮系统的运行和维护。考察队中，大多数的队员只在南极待一个夏季，而我和另外 17

名队友继续驻守在中山站，在这片白色荒漠上工作和生活，直到被下个年度的考察队员接替，这个过程叫作“越冬”。

南极大陆极端的自然环境大大增加了开展各项工作的难度。在野外，恶劣的天气迫使我们必须穿着厚重的防寒装备，但这会让我们行动不便。有时候为了操作仪器需要摘下面罩和手套，这时凛冽的寒风便会立即侵蚀整个身体。如果遇到暴风雪天气，所有的既定工作都会暂停。同时，极端的气候对野外设备的耐久性能也提出了考验。相比国内而言，裸露在室外的观测设备发生故障的风险更高，这也需要投入额外的精力去尽量避免因设备故障导致的数据中断。南极大陆与世隔绝，对执行现场工作的考察队员提出了更高的要求。因为南极距离其他大陆太遥远，物资难以得到及时补给，人员也难以快速到达，一旦设备出现硬件或软件方面的故障，有时候仅凭在现场的科考队员无法及时排除，甚至会出现某些备用零件用尽的困境。

在这样一个寒冷又孤立的环境下工作一年，我深感肩上责任的重大。我和队友们各自肩负着不同学科的考察任务，虽然大家研究的领域不尽相同，但很多时候我们都会相互协助着一起完成任务。

从5月中旬开始，太阳不再露面，中山站所

在的拉斯曼丘陵地区进入了极夜。极端寒冷的气候加上长达两个月的黑暗，最严峻的考验向我们逼近。出于安全考虑，大家尽量在这个时间段减少户外活动，短期的野外数据采集都被暂停，只有一些常规观测项目仍在进行。除此之外，因为长期缺少阳光照射，健康状况成了我们共同关注的问题。另一方面，极夜还会对人产生一定的心理暗示，往往会伴随着嗜睡、易怒，甚至抑郁等症状出现。

然而，大自然是公平的。我们跨越万里来到这片白色荒漠，一方面接受大自然最严峻的生存考验；另一面却享受着世界上最纯净的空气，得见大自然最奇伟瑰丽的景观：纯净的大海、一望无际的冰原、巨大的冰山、绚丽的极光、璀璨的星空，这些美景只有在人迹罕至的南极才可以见到。我们在南极单调和乏味的生活还会被自然界的种种不期而遇冲淡——站区不时会有企鹅和海豹前来造访，雪海燕和贼鸥经常在我们头顶盘旋，而幸运的我还曾目睹成群的虎鲸在浮冰区游弋……我曾一度感到孤独，但最终却在极地生灵的包围中感受到了强烈的生命活力。

目前，包括卫星定位和遥感、航空摄影测量、地面形变监测以及潮汐观测等测绘手段被广泛应用于极地环境和气候的研究中，如通过研究长时间投放在冰盖上的GPS浮标可以推算出该区域





用电钻钻透海冰，再量取厚度。

冰盖的流动速度和方向；结合遥感卫星影像和现场的实际测绘数据进而研究冰雪消融量；利用常年运行的全球卫星导航系统跟踪站的数据参与演算南极地区的地球物质平衡等等。

随着各种卫星导航系统在科学研究和各行各业的应用越来越广泛，人们越来越依赖其在例如交通运输、林业渔业、电信等方面发挥的重要作用，这也使得我国自主研发的北斗导航系统具有巨大的应用前景。另一方面，社会的飞速发展和人们日益增长的需求也对北斗导航系统提出了在适用性和定位精度方面更高的需求。可以预见的是，随着将来我国在南极建立更多的科学考察站，相应地也会有更多的北斗地面观测站在考察站落成。这些观测站对经过南极上空的北斗卫星不间

断地进行观测，通过复杂的数据分析，反过来可以提升北斗系统在南极地区的定轨和定位精度。另外，相比 GPS 而言，北斗系统的一个压倒性的技术优势是其自带的短报文功能。也就是说，利用北斗系统不仅可以对自己进行定位，还能将自己的坐标发送给指定的用户。这在南极荒无人烟、长距离通信不发达的情况下，无论是对行驶船舶还是飞行器，野外工作的科考人员或是游客，其重要意义不言而喻。除了实际应用方面，北斗导航系统在南极也将为研究极地冰川动力学、地质构造、高空大气物理等科学研究提供了方便可靠的数据支撑。

本文作者系武汉大学中国南极测绘研究中心研究人员



解读南极条约中的生态与科学

文、图 / 刘惠荣



《南极条约》协商国会旗

南极洲包括南极大陆及其周围岛屿，是世界上发现最晚的大陆，它孤独地坐守在地球的最南端。其中，南极大陆 95% 以上的面积被厚度极高的冰雪所覆盖，故有“白色大陆”之称；其平均海拔为 2350 米，是人类已知的最为寒冷的高原大陆。南极大陆总面积约为 1400 万平方公里，居世界各洲第五位。位于南极大陆边缘、与大陆相连的浮动冰层，即陆缘冰，又称“冰架”，占南极冰盖总面积的 10%。另外，南大洋面积约为 7700 万平方公里，占世界大洋总面积的 22% 左右。南大洋环绕南极大陆，使南极大陆呈完全封闭状态。《南极条约》所规定的法律意义上的南极地区是指南纬 60° 以南的地区，包括冰架在内，涵盖了南极洲和南大洋部分区域，总面积约 6500 万平方公里。

1738 年，法国人布韦在航海时发现了南极附近的一个岛屿（今布韦岛）。1772 年，法国人格尔古莱恩也开始了南极探险，在印度洋南部毗邻南极洲的地方发现并命名了格尔古莱恩岛，宣布该岛为法国所有。英国人詹姆斯·库克于

1772 ~ 1775 年完成了人类历史上的首次南极航行，但他没有登上南极大陆。俄国的别林斯高晋发现了南极大陆。1911 年，挪威人罗尔德·阿蒙森首次登上南极点。

南极主权声索

从 1908 ~ 1947 年的 40 年间，英国、法国、澳大利亚、挪威、智利、阿根廷和新西兰七个国家，分别根据发现、先占、继承和扇形等原则先后对南极大陆提出了领土和主权要求。各国对南极的领土瓜分狂潮也由此展开。这场资源争夺战中，美国的战略可谓别具一格——虽然声称独立发现了 80% 左右的南极领土，美国却并不像上述七国那样热衷于提出南极领土主张，而是追求对南极的某种实际操控。美国于 1948 年提出了八国共管南极或由联合国托管南极的主张，遭到大部分国家的反对。当时的苏联也对此做出了声明，表示没有苏联的参与，任何形式对南极进行领土划分，苏联都不予承认。1952 年，英国和阿根廷在南极半岛的霍普湾兵戎相见。后虽经过双方协商后问题暂时得以解决，但也为日后的南

极开发埋下了安全隐患。其后，关于南极的领土争端愈演愈烈，为了避免战争，规范南极事务，在美国的积极倡导下，1957～1958年国际地球物理年南极考察活动结束后，美国邀请七个南极领土主权声索国并苏联、日本、比利时和南非，于1959年12月1日在美国华盛顿签署了《南极条约》（The Antarctic Treaty），1961年6月23日正式生效。

南极条约

《南极条约》正文共14条，其基本宗旨和主要内容为：

一、和平利用和非军事化。条约规定南极仅用于和平目的，不应成为国际纷争的场所或目标。一切具有军事性质的措施均予以禁止，除非为了科学研究或任何其他和平目的而使用军事人员或军事设备。

二、领土主权冻结。任何缔约方放弃其在南极原先的领土主权主张或领土要求，在条约有效期间所发生的一切行为或活动，不得构成主张、支持或否定对南极的领土主权的权利的基础，也不得在南极建立任何主权权利。

三、科学考察自由，鼓励在南极科学考察中开展国际合作；各协商国都有权指派其国民担任观察员，对南极的一切地区，包括一切驻所、装置和设备，以及在南极之货物或人员装卸地的一切船只和飞机，开展视察。

《南极条约》对主权的“冻结”，搁置了对领土主权问题的争议，并形成了在条约框架下协商国协商一致的共管体制和相对稳定的格局。根据《南极条约》的规定，在南极开展实质性活动的缔约国组成“南极条约协商会议”

（ATCM）作为南极事务的决策机构，协商会议的表决机制采取协商一致的原则。成为协商国的门槛是：首先必须是南极条约缔约国；其次必须是在南极进行了实质性科学研究活动的缔约国。所谓实质性科学研究活动主要指建立了南极科学考察站，或者是向南极派遣了科学考察队。那些不具有协商国资格的缔约国只有权派代表参加会

议讨论，而无权进行表决。

南极条约体系

《南极条约》签订后，“冻结主权主张”的共识促使各国把关注点转移到科学考察和环境保护事务上。为了保护南极的生态环境，合理利用南极资源，南极条约协商会议根据形势的需要先后制定了一系列法律文件，这些法律文件和协商会议通过的措施和建议一起构成管理南极事务的法律体系——南极条约体系（ATS）。直至今日，南极条约体系主要包括《南极条约》《南极海豹保护公约》《南极海洋生物资源养护公约》和未生效的《南极矿产资源活动管理公约》《关于环境保护的南极条约议定书》及其相关附件。在整个南极条约体系中，居于核心位置的《南极条约》从整体上界定了南极的法律地位和规制缔约国在南极的活动，其他法律文件的基本宗旨都是保护极其脆弱的南极环境和生态系统。

南极地区拥有地球上极其独特的自然环境和生态系统。南极洲陆生植物种类很少，但环绕南极大陆的南大洋无论是海洋生物的种类还是其生物量都很可观，尤其是鲸、海豹、鸟类、磷虾和鱼类资源更为富饶。南极的冰、雪、水和土壤及岩石样品中广泛存在着各种类型的微生物，具有众多嗜冷/耐冷、嗜盐/耐盐、抗辐射的特性。近几十年来，取自南极动植物和微生物等生物资源体内的生物遗传资源，被广泛应用于食品、医药和生物等众多产业，创造出巨大的经济价值。因此，南极生物勘探成为若干届南极条约协商会议讨论的重要议题，议题聚焦于南极生物勘探的涵义以及如何区分科学研究意义上的生物勘探和商业开发利用。目前虽然尚未达成明确而有效的法律文件，但限制、甚至禁止取自南极的生物遗传种质资源的商业化开发似乎已经趋向共识。

南极地区的已知矿产资源有220多种，包括煤、铁、铜、铅、锌、铝、金、银、石墨、金刚石和石油等，还有具有重要战略价值的钍、铀和铯等稀有矿藏。据科学估计，在罗斯海、威德尔海

和别林斯高晋海蕴藏着 150 亿桶的石油和 3 万亿立方米的天然气。南极洲煤的蕴藏量约有 5000 亿吨；在东南极洲的维多利亚地以南，煤的蕴藏量极为丰富，煤田面积达 25 万平方公里。

南极条约体系在保护南极环境方面最具有代表性和综合性的法律文件是 1991 年制定的《关于环境保护的南极条约议定书》（以下简称《议定书》）。《议定书》序言写道：为了保护南极环境及依附于它和与其相关的生态系统，将南极确定为特别保护区；并且深信制订一个保护南极环境及依附于它的和与其相关的生态系统的综合制度是符合全人类利益的。《议定书》将整个南极地区视为南极自然保护区，并仅可用于科学与和平的目的使用，规定了全面的环境保护措施，是南极环境保护具有里程碑意义的法律文件。《议定书》建立了包括环境监测、环境影响评估、废物处理、海洋污染预防、区域保护和管理等一系列制度，用以保护南极环境以及包括南极独有动植物在内的南极生态系统，努力减少人类南极活动对南极环境和生态系统的不利影响。其中，《议定书》提出的环境影响评价制度已被各国采纳并在南极考察中得以实施，即成员国在南极进行任何活动都必须进行环境影响评估，对大型活动还必须进行综合环境影响评估，经南极环境保护委员会（CEP）讨论并提交南极条约协商会议通过后方可实施。因此，《议定书》是迄今为止内容最全面和措施最严格的环境保护条约，它的生效对南极环境保护的实施产生了具有划时代意义的影响。

《南极矿产资源活动管理公约》命运多舛，原本已经在 1988 年 11 月 25 日第四届南极条约特别协商会议上通过了。然而不到一年的时间，形势发生新的变化，法国和澳大利亚在 1989 年第十五届南极协商会议上率先以工作文件的形式，联合提出“综合保护南极环境以及其特有和相关的生态系统”的建议，认为现有的保护南极环境的法律文件仍显分散，不够综合全面。由此推动南极条约协商会议于 1991 年签署了《关于

南极环境保护的议定书》。《议定书》第 7 条规定“科学研究除外，禁止任何与矿产资源相关的活动”，不允许在南极从事任何与矿产资源相关的活动。所以，《南极矿产资源活动管理公约》就成了罕见的已获得通过但未生效的公约。

南极考察与南极保护区

迄今为止，在南极地区被列为首位的人类活动是科学考察。科学考察水平和能力是彰显一个国家在南极体系中影响力以及领导力的重要标志。南极的科学考察主要形式有两种：一是派遣南极科学考察队；另一种就是建立常年的南极科学考察站。各国之所以积极建立南极科学考察站，是因为南极科考奉行的不成文规则是：谁首先对一个区域进行考察，谁就拥有在这个区域建站的优先权；哪国在某地建站，周围的科研活动就以哪国为主。建立南极科学考察站并进行广泛的南极科学研究，有助于人类更加全面的了解南极、认识南极，有利于增强国家在南极的实质性“存在”，并维护好该国在南极的国家利益。

早在《南极条约》缔结前，就有国家以划定区域的形式对南极环境进行保护，新西兰与美国率先合作在南极罗斯岛建立了数个“限制区”，目的是保护历史遗址和科考现场，避免其因人类活动而遭受不可恢复的破坏。这种做法逐渐为各缔约国接受并推广应用。1964 年通过的《南极动植物保护议定措施》，首次提出在南极设立“特别保护区”的概念。20 世纪 70 ~ 80 年代，南极条约协商会议又相继提出了建立特别科学兴趣区、多用途规划区和历史遗址与纪念物保护区等问题。1991 年，《议定书》将整个南极确定为“一个专用于和平与科学的自然保护区”。2002 年，南极条约协商会议依据《议定书》附件五“区域保护及管理”的规定，通过了“南极特别保护区的命名与编号系统”决定，将以往设立的各类保护区重新划分为南极特别保护区（ASPAs）与南极特别管理区（ASMAs）两个类别，重新统一编号并命名。《议定书》附件五规定，任何区域，包括任何海洋区域，均可被指定为南极特别保护

区，其目的是保护显著的环境、科学、历史、美学和荒野形态的价值或者任何此类价值的结合，以及支持和协助正在进行的或计划进行的科学研究活动；同时，规定进入南极特别保护区需要取得相关的许可证。

如果说南极科学考察水平和能力是彰显一个国家在南极地区的影响力乃至领导力的重要因素的话，保护区的建设则更是这种影响力和领导力的强有力证明。为了增强本国在南极的实质性“存在”，迄今为止已经有相当多的国家独立或者与其他国家合作在南极设立南极特别保护区，尤其是澳大利亚、新西兰、美国和英国等一向在南极表现活跃的协商国更是投入了巨大的精力。目前已经在南极设立特别保护区的国家有 15 个，特别保护区的总数达到 75 个，特别管理区 7 个。澳大利亚、新西兰、美国、英国设立的南极特别保护区的数量均超过 10 个。中国与澳大利亚、印度、罗马尼亚和俄罗斯联合建立一个南极特别管理区（ASMA 6）；单独设立了一个特别保护区（ASPA 168）；与其他国家联合设立两个特别保护区（ASPA 169 和 ASPA 174）。

由于各国近海渔业资源日趋减少，南大洋渔业捕捞炙手可热。因此，南大洋渔业资源的可持续发展问题逐渐成为热点问题。《南极海洋生物资源养护公约》（CCAMLR，以下简称《养护公约》）是南极条约体系中的一个重要组成部分，根据《养护公约》设立的南极海洋生物资源养护委员会（亦

简称“CCAMLR”）自成立以来就与联合国旗下的国际组织保持合作，以对科学数据的研究分析为基础和依据，采用生态系统方法和风险预防方法制定养护措施，通过对渔业的严格管理，确保实现南极海洋生物资源养护的目标。它建立起一套针对“非法、无报告及未受规范渔业活动（IUU）”的南大洋反对 IUU 捕捞的体系。到目前为止，南极海洋生物资源养护委员会仍然是世界上最为严格的国际渔业管理组织，取得了卓越的养护绩效。

2011 年，美国和新西兰分别提出在罗斯海区域建立海洋保护区的提案，澳大利亚和法国也提交了关于在东南极区域建立代表性海洋保护区体系的联合提案。五年来，围绕罗斯海和东南极两个海洋保护区提案的科学依据和政策目标问题，各方以及国际组织争执激烈，内容包括相关法律与政治问题以及基本技术问题。2016 年 10 月 28 日，在澳大利亚霍巴特召开的南极海洋生物资源养护委员会年会上，24 个成员国以及欧盟一致通过了关于在南极罗斯海建立海洋保护区的提案。该海洋保护区面积达 155 万平方公里，建成后将成为全球最大的海洋保护区，也是全球首个大型公海海洋保护区。罗斯海保护区的建立拉开了南极海洋生物资源养护委员会建立更多保护区的序幕，也将会对国家管辖外海洋生物多样性的养护和可持续利用协定（BBNJ）国际谈判产生重大影响。

中国于 1983 年 6 月 8 日正式加入《南极条约》，于 1985 年 10 月 7 日取得协商国的地位。时至今日，中国在南极科考方面已经取得了一系列的成就，在南极建有中山站、长城站、昆仑站和泰山站四个科学考察站，在南极保护区建设方面也展现了一定的实力。但是，与南极活动大国相比，中国亟须增强在南极地区的有效实质性存在，提升在南极条约体系以及相关国际组织中的话语权和影响力，展现中国在国际南极事务方面的大国风范和责任，维护中国在南极地区的国家权益。

本文作者系中国海洋大学法政学院院长，教授



本文作者



极之美旅游公司供图

南极旅游的思考

文 / 王自磐 图 / 蔡石

一个国家旅游文化的兴盛与否，往往被视为国家经济发达程度与人民总体素质水准高低的风向标。包括旅游资源在内的南极资源属全人类所共有，这不是一句空话。发达国家南极旅游业的蓬勃发展已证实，这些国家视南极科考与南极旅游同为国家南极权益的两个重要组成部分。中国作为世界上最大的新兴国家，中华民族作为世界人口第一的民族，不仅在极地科学研究方面应有较大作为，对南极旅游资源的开发利用也应享有充分的正当权益。

新形势下国际南极权益之争

地球资源的过度消耗，尤其面临后南极条约时期的到来，那些曾经对南极有领土诉求的国家相继调整南极战略，南极权益争夺大有重趋激烈之势。目前，各国持续采取以下具体举措：一·加

大南极科考基地的基础设施建设，以硬实力扩大区域有效管辖权；二·加大南极科考投入，以科学研究成果为支撑，强化在国际南极事务中的话语权；三·加强南极环境与各类资源的勘探与研究，做好充分的资源信息储备，以应对不时之需。所有这些措施，反映了各国曲突徙薪，积极防范日后南极条约体系一旦发生重大变故（如一旦开禁南极自然资源开发），以能占据有利地位和为谋取更大权益进行战略准备。在南极自然资源开发基本处于封禁的当下，对所有国家而言，最具现实意义的南极资源开发利用除了部分海洋渔业外，就是科学资源和旅游资源两大块。南极条约体系的法律文本规定南极只用于和平之目的，而“议定书”有明文确认科学考察与旅游探险同为人类在南极的合法活动。两者在南极条约协商会议一系列相关文件的表述，通常归类于“政府行

为”和“非政府行为”，后者还包括那些零散的非商业性的探险活动。

随着国际南极旅游业的蓬勃发展，尤其在发达国家，南极旅游探险事实上已与南极科学考察一样，同为体现国家南极权益的两个重要组成部分，不仅为国家所重视，也为民众所关注和接受。美国、英国、德国、比利时和澳大利亚等国，从未阻止国内民众赴南极探险或旅游，而且默许甚至鼓励民间资本开发南极旅游业。这些国家所制定的一系列国内南极法，着重于南极环境保护，参照南极条约体系法律条文对辖区内的本国（含外籍）违规者进行惩治，其宗旨是引导公民依法开展包括南极旅游探险在内的各项南极活动。最好的例证就是：1991年7月，伴随着《关于南极环境保护的南极条约议定书》的生效，国际南极旅游业者协会（IAATO）同期成立，该协会的发起者正是欧美的7家南极旅游公司。此后，IAATO成为迄今为止主导并把控世界南极旅游业的运营与发展的唯一国际行业机构。

南极条约体系确认南极属全人类共有，理论上全世界所有国家的公民都有参与南极活动的权利。南极旅游资源是眼下最现实的可开发利用资源，因此成为国际南极旅游业发展的主要动力，而一些国家把鼓励民间资本发展南极旅游业纳入国家南极战略选项之一，也就不足为怪了。

从某种意义上来说，中国的极地旅游事业在国家极地战略中能否占有一席之地，是国力强盛和民族全球意识极大提升的重要体现。自1985年我国独立自主地进行首次南极科学考察，并建成首个科学考察站——长城站，至今已经历了30个年头。冰山、企鹅、海豹以及磷虾等这些远离人类社会的新奇事物，如今已成为大家所熟知的南极元素。原先只能从报纸杂志或考察者演讲中感知的南极神奇风貌与独特景观，如今随着我国经济突飞猛进与国人腰包的充盈，已让越来越多的国民得以临其境，实现期盼已久的南极梦。

有关南极旅游的规制

南极是世界公认的最大自然保护区，也是迄今全球唯一有着较为完备的国际条约与法律体系严格规制的地区。这些法律法规基本源自南极条约协商会议。在1991年之前，除了《南极条约》，还有《保护南极动植物议定措施》（1964年）、《保护南极海豹公约》（1978年）和《南极海洋生物资源养护公约》（1980年）等。1991年出台的“议定书”文本及其6个附件，涵盖了南极条约地区海洋与陆地的环境生态、动植物和矿产资源问题，包括防止环境污染和废弃物处理的方方面面，是南极环境保护最权威最全面的基本法规。同时，南极条约协商会议还设立了环境保护委员会（CEP），旨在审核各国南极项目的环境影响评估，指导监督各项环保措施的实施等。“议定书”适用于南极所有人类活动，包括科考与旅游探险，由于前者的活动形式与涉及内容远较后者复杂多样，因而“议定书”的许多条款具体指向南极科考活动及其后勤服务等，例如工程施工、物流车、船舶运输和人员野外活动等。为确保南极环境安全，“议定书”对所有赴南极活动的项目与人员实施进入许可制度。毫无疑问，与之相比，旅游观光活动对于南极环境生态的负面影响显得短暂和轻微得多。

南极条约协商会议有关南极旅游对南极环境影响的研讨与争论由来已久，其背后更多的是对各自国家权益的考量。因此，“争来争去”的结果是南极旅游越做越大。早在20世纪最后10年，南极旅游人数就已经从过去每年数千人，增至每年上万人。首个关于南极旅游的指导性文件，经反复研讨与修订，终于在1994年第18届南极条约协商会议上正式通过，并以《旅游指南》的形式问世；至2005年，陆续开放了亚南极岛屿、南极半岛区和部分东南极地区的一系列旅游景点；2009年，又将历届会议所确定的各开发景点统一整编为新版南极《旅游景点指南》。另外，为减少对南极特定景点的环境压力和便于旅游活动的安全有序，南极条约协商会议明确了准许驶入南极景点港湾的游船大小与登陆旅客数量（游

船载客量以不超过 500 人为限), 以及在每个南极景点每次仅限一艘游船靠岸, 每次登陆人数不超过 100 人, 上岸游客每 20 人至少配备一名导游等规定。

上述有关南极旅游的规制具体而详尽, 兼顾了南极环境保护和极地旅游业的发展, 完全是双赢的举措。问题的关键是这些措施的有效实施与严格监管, 而国际南极旅游业者协会恰恰成为担当这一任务的最佳角色。它建立起一套适用于南极这一世界上最特殊地区开展旅游服务的行业标准, 发挥了有效监管各国旅游机构在南极的业务营运和确保环境生态安全的功能, 其成效显著, 也为国际所公认。尤其现今各国凡合法的南极旅游组织与游船, 都须经过它的严格审批而成为其成员单位, 方可获取所在国有关管理部门授权并在南极开展相关业务的资质。国际南极旅游业者协会因此成为配合南极条约协商会议对南极旅游进行科学管理的得力助手。

综上所述, 南极条约协商会议针对南极旅游的所有举措, 包括了旅游政策研讨与制定, 旅游活动环境影响评估与对策, 旅游景点审定、开放和保护, 不同规模旅游活动量化标准、限定措施与管控途径, 以及与国际南极旅游业者协会的信息沟通与交换、安保原则与救援措施对接等, 足见其对南极旅游的基本态度是: 坚持“和平利用”原则, 推进南极旅游业的有章可循和管理的有法可依, 促进南极旅游与环境保护的协调发展。

南极旅游异军突起

个人赴南极的旅游价格为 10 万 ~ 20 万元, 属高端旅游。即使是在发达国家, 这个价格也属于中等偏上消费水平。2008 年国际金融危机导致南极旅游业滑坡, 游客总人数从最高点 (46069 人) 跌至 2010 年的最低点 (33824 人), 随后逐年回升。这期间南极游客人数一直名列前茅的西方国家, 除美国客源量持续超万人之外, 英、澳、德等国受经济不景气影响而波动较大。与之相反, 中国前往南极的游客数量却异军突起, 令

世人瞩目, 从 2007 ~ 2008 年的区区数百人飙升至上千人; 2014 ~ 2015 年中国南极旅游人数更是达到 3367 人; 2015 ~ 2016 年, 在欧美各国游客量普遍下降的情况下, 中国不减反增, 达 3558 人。而对世界南极旅游的贡献率从原先的可忽略不计, 不到十年的时间上升至 10% 以上, 成为南极旅游的一支生力军。

应当指出的是, 极地旅游与其他高端旅游有所不同, 其主要目的地是地球南北两极, 是地理区位、自然环境和人文历史与地球其他地方完全不同的特殊地区。两极不仅对全球气候变化具有无可比拟的重要影响, 而且其白色面纱遮掩下的神秘世界, 人们至今认知尚少, 因此仍然是当今人类大自然探索的三大主攻目标 (太空、深海与极地) 之一。极地旅游探险, 无论从业者和游客, 都需具备相应的科学基本知识与良好的文化修养。当今世界, 现代科技日新月异。但由于历史的原因, 我国社会文化教育、思想道德教育与科学普及程度, 无论从宣传内容、活动形式和受众面的局限, 与发达国家相比都存在一定差距。就极地旅游来说, 中国的游客普遍不差钱, 而对地球、海洋、极地、生物以及生态环境的科学认知, 尤其国际人文史观与管理体系等方面的关心和了解较为欠缺。由此, 从一个侧面表明, 对于一个正处于面向世界、走向复兴之路的伟大民族而言, 努力加速提高科学、道德和文化素养, 不仅是参与极地旅游前亟待解决的基础课题之一, 也是有关管理者和极地科学家有责任去倍加关注和投入精力之处。

南极旅游的战略意义

近十年来, 国内网络上有关南极旅游的广告随处可见, 表面上轰轰烈烈, 事实上却步履维艰。迄今, 全世界已有 100 多家旅游机构获得国际南极旅游业者协会营运资质。中国原有两家有资质的单位, 其中一家因难以为继于两年前退出, 现仅“极之美”旅游公司一家。而在全球 60 余艘核准许可载客进入南极地区营运的游船中, 竟无中国一艘, 商用极地旅游航空器更无从谈起。目

前我们的情况是：赴南极的游客基本上由国内旅行社组团，在南极门户港或包船或拼团，将游客送交外方公司游船或飞机前往南极（北极旅游雷同）。中方旅游经营者的收益主要依靠其中微薄的佣金。尽管在游客人数上我国已成为世界第三大南极旅游国，但在国际市场中，却并不掌握南极旅游资源，更无话语权。这一状况严重阻碍了我国极地旅游业的发展。业界殷切期盼国家尽快出台相关政策，得到管理部门的指导与帮助，及早突破阻碍我国南极旅游事业发展的瓶颈。

理；应借鉴国际南极旅游业者协会的管理模式，鼓励有条件的企业加入国际南极旅游业者协会组织，尽快设立相应的国内行业协会，发挥民间协调与自律功能。

中国游客数量的不断增长，不仅打破了长期由西方人把持国际南极旅游市场的局面，也促使南极旅游格局发生显著的变化。随着与国外极地旅游文化的交融，中国人极地旅游活动的形式与内容也更加多样化，游客构成日趋社会化和多元



极地领域，无论极地科考和极地旅游，通过参与规则制定来强化中华民族的极地发言权和决策权。这既是国家极地战略需要，也是对我国极地管理推进体制改革与强化管理职能提出了新要求。可以预见，随着我国经济、科技实力的快速提升和国家极地事业的强劲发展，中国人的非政府极地活动将会越来越多，这是大势所趋，不可忽视。

南极旅游业的消长，会遵循其自身的市场规律，但离不开政府管理部门的指导 and 帮助。业务主管部门应鼓励和支持国内业界有实力的企业家积极投资南极旅游和游船业，指导构建独立自主的完整南极旅游服务链，培植真正属于中国人自己的南极旅游市场，推动中国融入世界，参与南极旅游规制制定与修改，掌握资源与产品开发的主动权。笔者认为，中国南极旅游市场管理宜实施国家管理部门政策指导下的行业自主细化管

化。中小企业家、普通职员，中、高级教师和退休科教人员，甚至青年学生比例的逐年增加，这一切表明南极旅游正逐渐走近社会普通民众，走向大众化。

此外，我们还应当看到，全国各地极地考察单位和科考人员，不辞辛劳地在社会大讲堂、大中小学，以及报纸杂志上宣传南极风貌与科考，其目的正是希望国人关注南极，热爱科学，支持我国极地事业。而今，有越来越多的中国人，从关注南北极进而向往和期盼有机会亲赴两极，以体验冰雪王国的神奇。这正是我国极地事业兴旺发达的重要标志，也是中华民族在极地实质性存在的最佳体现。因而，中国极地旅游需要注入更多正能量，助其走向成熟。更为重要的是，维护好中华民族的极地权益，无疑是国家相关管理部门的职责所在。

本文作者系国家海洋局第二海洋研究所研究员

中国南极旅游现状

文 / 极之美旅游公司

常规的南极旅游，通常有四条线路，分别是南极三岛游（包括南极半岛、福克兰群岛和南乔治亚岛），穿越南极圈游和南极极点游。其中，南极极点游又分为南非和南美两条路线。

随着南极旅游的火爆，越来越多的人把去冰天雪地的极地旅行作为自己的“终极梦想之地”。在国际南极旅游经营者协会发布的年度报告中提到：在 2015 ~ 2016 年南极旅游季，到南极旅游的人员总数为 38478 人次。其中，美国和澳大利亚游客数仍然位居第一、第二，分别占游客总量的 35.5% 和 11%。中国游客人数则跃升至第三位，占游客总量的 10.6%，比前一个旅游季增长了 25.7%。其余依次为英国、德国和加拿大。

极之美作为中国首家获得国际南极旅游经营者协会认证的专业极地旅行机构，为中国人的南极旅行提供了巨大支持。

中国于 1983 年 6 月 8 日加入南极条约组织，该条约规定：“南极为和平领土且不属于任何一个国家，冻结目前领土所有权的主张。”这一规定意味着所有国家都能够以和平目的造访南极。但是，由于南极生态极其脆弱，外来物种的入侵会对生态环境造成严重破坏，因此需要所有南极到访者严格遵守南极条约，自觉保护南极环境以及野生动物，禁止危害或干扰南极地区的野生动植物；不得干扰在陆地上、空中或海中的各种生物；不可接近、喂食、触摸鸟类和海豹从而改变它们的生态行为；不可损伤植物，避免惊吓野生动物；不能携带任何动植物到南极地区。

因南极环境的特殊性，对游客素质有很高的

要求。在这方面，欧美国家对于中国游客还是有些许偏见的。但是，曾经真实发生的一件事情可为中国游客正名：有一名来到南极的中国游客坐在地上休息时，一只企鹅走了过来，或许是这只企鹅过于疲惫，竟趴在她的腿上睡着了！按照国际南极旅游经营者协会的相关规定，游客不能主动接触动物，且要求与企鹅保持 5 米以上的距离。但是由于企鹅太多，无法躲避。游客又不能主动触碰它，于是这个游客就保持了 20 多分钟的坐姿，直到企鹅睡醒后自己走了，游客才站起身。

由于南极旅行的消费门槛较高，目前能参加的中国游客大多为高收入者。随着中国经济的持续增长，未来将有更多的人到南极旅行。到访过南极的游客基本都会被南极的生态环境所震撼，返程后大部分人成为极地环境保护者，开始关心全球变暖等环境问题，并以自身为核心辐射影响身边的人们。正如瑞典环境学家林得布拉德所说：“你永远不可能去保护一个你根本不了解的地方”。

虽然中国的南极游客数量目前排在世界第三位且逐年增加，但实际上中国旅游公司在国际南极旅游经营者协会组织中除了拥有船只代理权外，几乎没有任何话语权。有关运营权和规则制定权等一切重要资源均掌握在国外探险公司手中，目前基本处于外方垄断南极旅游资源的局面。在旅行保险方面，保险金额虽可以得到修改，但在赔付规则方面中国旅游公司受控较多，话语权薄弱，处境非常尴尬。希望未来在南极旅游市场上，中国的旅游公司可以得到更多的支持以缓解目前的处境。

南极的价值

文 / 位梦华

气候变化的控制器

控制地球气候变化主要有三个因素：大气对流、海洋环流和地球上必须反射回太空的一部分热量。这三个因素都与地球南北两极，特别是南极有着密不可分的关系。地球表面的热量主要来自于太阳，就像是个热动力机，热源在赤道，冷源在两极。太阳光把热带的空气加热膨胀，因密度变小而上升，到了高空向两极分流。两极温度很低，大气释放出热量，密度变大，下沉到地面，再吹回赤道，这就是大气对流。同理，太阳光把热带的水加热，热的水沿大洋表面向两极流动，海洋学上叫做“暖流”；两极的水向赤道流动，叫做“寒流”。一个大气对流，一个海洋环流，在影响和控制地球的气候变化因素中占90%以上。正是因为这两个对流循环往复，不断进行着热交换，地球上才会有风，有雨，有雪，有今天的气候。

至于第三个因素，即太阳光投放到地球表面的热量，有一部分还要反射回太空，保持着一种动态平衡，同样与两极有密切的关系。南北两极的大冰盖就像两面巨大的“镜子”，把相当大一部分来自太阳的热量反射回太空。由于温室效应，全球变暖，两极的冰盖越来越小，反射回太空的热量也越来越少，导致地球上气温进一步上升，从而加速了温室效应。反之亦然。

由此可见，两极在很大程度上控制着地球气候变化的进程。虽然现在人类可以上天，可以登月，但还控制不了气候，甚至不能准确地预报气候，而是被气候所制约。

潜在的资源宝库

南极大陆及其周边海域到底有什么资源，

有多少资源，谁也说不清楚，几乎可以说无法估计。但是，根据极其有限的调查和评估，南极大陆蕴藏有220多种矿产资源，包括各种形式的能源。那里有世界上最大的铁矿，可供全球开发利用200年；有世界上最大的煤田，广泛分布于东南极的冰盖下面，储藏量约达5000亿吨。南极半岛的铜、铅、锌、钼以及少量的金、银、铬、镍、钴等有色金属储量也很丰富。南大洋海底的多金属锰矿资源也非常可观。主要分布在南极大陆架和西南极大陆的石油和天然气储量惊人，石油储藏量有500亿~1000亿桶，天然气储藏量为3万亿~5万亿立方米。南极地区还存在着巨大的风能、波浪或潮汐能和地热能等潜在能源。

而在浩瀚的南大洋中，无论是海洋生物种类还是其生物量都是相当可观的，尤其是鲸、海豹、磷虾、鱼类和海鸟资源均极为富饶。其中，南极磷虾是南大洋中最重要的甲壳类浮游生物，也是南大洋中数量最大的生物资源和生物链中最为关键的一环。据初步调查，南极海域磷虾总量保守估计3亿~10亿吨。极端环境下的南极特种微生物资源具有潜在的经济和战略意义，特别是在现今生命科学研究和生物工程实验中，有着不可替代的特殊作用和科学价值。

南极大陆冰雪平均厚度达2450米，冰雪总量2500万~3000万立方千米，占全球冰雪总量的90%以上，储存了地球上约72%的淡水。据估算，这一淡水量可供全人类饮用7500年，而且水质极好。

难以估量的科学价值

实际上，南极的科学研究价值要比资源重要得多。例如，关系到人类生存和发展的臭氧空洞

和温室效应都是在南极考察中首先发现的。如果地球上空的臭氧层遭到破坏，太阳光中的紫外线可以直接照射到地表，不仅能够杀死生物的细胞，而且会导致皮肤癌发病率上升，威胁到人类和所有生物的生存。如果地球表面的气温快速上升，会导致冰川融化，海平面上升，不仅会淹没沿海的大城市、村庄和耕地，还会因为海洋面积增大，陆地面积缩小，海洋的蒸发量就会增大；大量的水蒸气变成巨厚的乌云，把地球笼罩起来，太阳光照不到地球表面，气温就会骤然下降，使气候发生逆转，进入下一个冰期。

除此之外，南极的大冰盖就像是一部无字天书，包含着极其重要的科学信息。例如，冰层中的气泡包含着地球的古空气。研究这些古空气，可以了解古代气候的变化规律。冰层中保留的古花粉是非常宝贵的，分析这些古花粉，可以了解地球上植物分布和进化的历史。这个大冰盖在1500万年前就开始形成了，保留着几百万年积累起来的古老冰层。由于它对全球气候变化的巨大影响，因而其冰面的热量交换模式、冰内温度变化的规律、冰体运动的规律、冰盖的物质平衡，及其冰层的形成和变化机制等，都是冰川学家极为关心的重要课题。

南极冰川可以提供真实的全球气候历史背景，从而使气象学家容易剔除偶然的气候异常，预测今后几十年乃至上百年尺度的气候变化大趋势。冰川学家在南极内陆冰盖上钻取冰芯，通过分析不同年龄冰芯里的氢、氧同位素、痕量气体、二氧化碳、大气和宇宙尘埃等，就可以在百年尺度上确定当时全球平均气温、大气成分、大气同位素组成以及降水量等各项气候环境要素。

能在南极生存下来的生物，从小小的细菌到硕大的企鹅，都有自己的独门绝技，具有超强的抗寒能力。帝企鹅能在极夜中零下几十摄氏度的严寒里养育自己的后代，堪称生物界最伟大的父母。南极冰鱼可以在零下2摄氏度的水里游动自如，因为它们血液里有一种特殊的蛋白质。如果能把这种蛋白质提取出来或者制造出来，注射到

人的血液里，也许就可以提高人类的抗寒能力。南极冰盖下面保存着1500万年以前的细菌和病毒。如果冰盖消融，它们纷纷出笼，人类没有抵抗力，也许就有可能带来灾难性后果。

极光来自于太阳风，对于研究太阳的物质成分和地球大气的电离层很有意义。陨石携带着宇宙、特别是太阳系的信息，可以研究宇宙特别是太阳系的演化和物质组成。南极大陆的形成是板块运动和大陆漂移的结果，通过对它的了解，可以研究地球的构造演化和板块运动的机理与规律。如此等等，可以看出，南极的科学考察和研究与人类的生存和发展密不可分，非常重要。

展望

综上所述，南极大陆蕴藏着丰富的自然资源，包含着无数的科学奥秘。那么，人类将怎样处置南极这块处女地？目前主要有两种意见：科学家和环境保护主义者主张把南极大陆永久性地保护起来，作为一个世界公园，给子孙后代留下一块世外桃源。他们认为，南极大陆埋藏的矿产资源解决不了人类的根本问题。而一些政治家和经济学家，甚至军事家则主张把南极大陆瓜分掉，并加以开发和利用。回想起1982年，我跟随美国科考队去了南极。那个考察队的任务就是在罗斯海上寻找石油。那时候，中国的南极考察还没有开始。1983年8月，中国加入了《南极条约》；1984年6月，中国成立了第一支南极科学考察队；1985年2月，中国在南极洲乔治岛上建立了中国南极长城考察站；同年10月7日，中国获得了《南极条约》协商国资格。三十多年后的今天，我国的南极考察事业也突飞猛进、后来居上，取得了巨大的成就，至今已经开展了33次科学考察，建起了四个南极科学考察站。

今天，中国已经成为南极事务的重要相关国家，参与了多项有关南极的科学研究工作，并且取得了可喜的成果。将来，当人类要决定南极未来的时候，中华民族将拥有极其重要的发言权和决策权。

本文作者系中国科学院地质与地球物理研究所研究员



