

# 近 20 年来中国极地大气科学研究进展\*

陆龙骅 卞林根 效存德 武炳义 逯昌贵

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

## 摘 要

南极、北极和青藏高原是地球上的 3 大气候敏感地区, 是多个国际计划研究全球变化的关键地区。中国的南极和北极实地考察研究, 分别始于 20 世纪 80 和 90 年代, 起步较晚, 但近 20 余年来有较大的进展。极地大气科学考察与研究是极地科学研究的重要组成部分。迄今为止, 中国已组织了 20 次南极考察和 3 次北极考察, 建立了中国南极长城站、中山站和北极黄河站等 3 个常年科学考察站; 进行了常规地面气象、Brewer 大气臭氧、近地面物理、高层大气物理、冰雪和大气化学等观测, 获得了较为系统的极地大气科学第一手资料; 开展了有关极地与全球变化的研究, 取得了新的进展。南极地区大气温度、臭氧和海冰的气候变化在时间和空间上都是多样的。南极地区的增暖主要发生在南极半岛地区, 在南极大陆主体并不明显, 近 10 余年来还有降温趋势。中国南极长城站和中山站的观测资料也证实了这一点。此外, 还揭示了南极半岛西侧和罗斯海外围的海冰变化具有“翘翘板”特征, 由此定义南极涛动指数可用于讨论南极海冰状况和海冰关键区的活动; 用实地考察资料研究了极地不同下垫面的近地面物理和海-冰-气相互作用特征, 给出了边界层特征参数; 讨论了极地天气气候和大气环境特征及其对东亚大气环流和中国天气气候的影响; 利用冰川学、地球化学、地理和地质等方法, 重建了南印度洋历史海平面气压、南极穿极指数和与极地温度有关的企鹅种群数量变化等气候代用资料序列, 开展了极地古气候环境的研究; 研究了南极中山站地区的大气臭氧变化特征及机理; 在极地大气化学、极光和电离层变化特征研究等方面也有了新的进展。在南北极地区, 进一步加强国际合作, 继续监测包括近地面温度在内的大气要素的变化, 拓展大气科学研究领域, 积极获取气候代用资料, 仍是全球变化研究的重要内容之一。

关键词: 北极, 南极, 大气科学, 全球变化, 气候系统, 考察研究。

## 1 引 言

南极、北极和青藏高原素有地球 3 极之称, 是世界气候研究计划(WCRP)及国际岩石圈-生物圈计划(IGBP)等多个国际计划研究全球变化的关键地区<sup>[1]</sup>, 在历次 IPCC 报告中都对极地给予了足够的重视<sup>[2, 3]</sup>。南极、北极是地球气候系统的重要单元, 包含了大气、海洋、陆地、冰雪和生物等多圈层相互作用的全部过程。全球大气是一个相互作用和影响的统一整体, 要了解全球气候变化, 必须对南北极地

区有所研究。极地大气科学研究历来是地球科学研究的重要组成部分, 不仅对气象学、冰川学、海洋学、地质学、生物学、地球物理学及环境科学等研究领域有重要的科学意义, 而且具有深远的政治意义, 潜在的经济和社会效益。

南、北极是影响全球气候变化的敏感地区。极地大部分被冰雪所覆盖, 气候寒冷、暴风雪频繁、自然环境恶劣。作为全球大气的主要冷源, 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。极地大气边界层与冰雪下

\* 初稿时间: 2004 年 8 月 10 日; 修改稿时间: 2004 年 9 月 10 日。

资助课题: 国家气象局气象科学基金“南极气象考察与研究”; 国家自然科学基金及国家南极考察委员会“南极地区近地面边界层物理学的观测分析研究”(4880208)、“地球三极区域环境本底和地气交换对气候影响的考察研究”(49255002); “八五”国家科技攻关“中国南极考察科学研究”(85-905-02)、“九五”国家科技攻关“南极地区对全球变化的响应与反馈作用研究”(98-927); 国家海洋局中国首次北极科学考察科考项目“北极地面臭氧、紫外辐射及边界层参数的观测研究”; 科技部社会公益研究专项“南极地区地球环境监测与关键过程研究”(2001DIA50040), 国家自然科学基金“南北极冰雪圈大气边界层结构和湍流通量输送的试验研究”(49675252)、“南北极地区地气相互作用过程地研究”(49975006)、“北极北极苔原和海冰地区边界层物理过程的观测研究”(40333032)。

垫面之间的动力和热力相互作用,不仅影响着大气层结构和局地天气气候,而且对全球大气环流和气候演变也有重要的作用。从整体上研究全球热力系统一直是大气科学研究的目標之一,在中长期天气预报模式、全球气候动力诊断和模拟模式中,都需要了解两极地区的各种热力和动力参数。目前许多先进的大气环流模式和气候模式对极地大气环流和气候的模拟与实况相比存在较大偏差<sup>[3]</sup>。其主要原因之一是对北极和南极地区冰雪与大气相互作用过程认识不足。因此,必须对极地的辐射平衡、水汽、动量输送和能量交换过程及其参数化方案进行深入研究,为气候模式提供更适合极地大气边界层的物理特征参数,进而合理评估极地在全球气候变化中的作用。

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。极地冷水通过沉降从海底向较低纬度地区输送,在全球海洋温盐环流中起启动作用,对全球各大洋的热量和气体交换起重要作用。海冰是极地下垫面季节和年际变化最大特征,海冰范围及冰密集度的减少使下垫面反射率和对海-气热量交换的抑制减少,而使海洋获得更多的太阳辐射能,与此同时,海水暴露在大气中的范围增加会使从洋面进入大气的水量增加,海洋的热量损失也随之增加,并引起云量的增加,又导致洋面接收的太阳辐射能减少。

极地冰盖和大洋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。目前利用南极东方站和 DOME-C 的深孔冰岩芯,俄罗斯(前苏联)、法国和美国科学家利用对冰岩芯同位素、气泡成份及微量物质的研究,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及甲烷等痕量气体浓度变化的资料<sup>[4,5]</sup>。南极冰盖具有使全球海平面上升 60 m 的水量,南极大陆和北极格陵兰冰盖物质平衡的研究将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。

南北极的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 $-89.2^{\circ}\text{C}$ ,比在西伯利亚(奥伊米亚康)测得的北半球地面最低气温( $-71^{\circ}\text{C}$ )低 $18^{\circ}\text{C}$ ;南极迪·迪尔维尔站实测最大瞬时风速达 $96\text{ m/s}$ ,是全球地面风速最大的地方<sup>[6]</sup>。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,就降水而言,大陆腹地是“白色沙漠”;冰原的代谢率极慢,与其他大陆相比,南极大陆地表反射率均匀,且几乎没有年变化,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地区气候体系中具有控制性的、稳定的特点<sup>[7]</sup>,对其变化应十分关注。

南、北极是目前全球最少受人类活动影响和环境污染的地区。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有重要的意义。对极地温度和极冰范围的监测及对冰原稳定性的研究能为判断“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里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。极区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低层大气活动影响和极区天气气候变化对太阳活动变化响应的观测研究。

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

本文在从大气科学角度阐述极地大气科学考察与研究科学意义的基础上,回顾了中国极地大气科学考察和研究的历史与现状,介绍了近 20 a 来中国极地大气科学研究的新进展,展望了极地大气科学研究的发展方向。南、北极地区气候和大气环境变化及其与全球气候变化关系,特别是对东亚和中国天气气候影响的研究,不仅在大气科学理论上很重要,对中国实施可持续发展战略有参考价值,而且对在南、北极地区建立科学考察站、制定和实施中国极地考察计划有重要意义,对在南极和北极海域中航行及其他人类活动也有着重要的实际意义。

## 2 中国的极地大气科学考察

早在 1957 年,著名气象学家竺可桢就指出“中国是一个大国,要研究极地。地球是一个整体,中国自然环境的形成和演化是地球环境的一部分,极地的存在和演化与中国有密切关系”,并专门派出了赴前苏联专修“极地冰川”的留学生。也有气象工作者

在出国学习和访问期间参加了所在国的北极考察和研究。

中国系统的南、北极实地科学考察起步较晚,其中南极实地科学考察研究始于 20 世纪 80 年代,而北极实地科学考察研究始于 20 世纪 90 年代。

## 2.1 中国的南极大气科学考察

中国的南极考察是由国家南极考察委员会(现为国家海洋局极地考察办公室)归口管理的,从 1980 年起,国家南极考察委员会陆续派人赴其他国家的南极考察站考察,为中国独立建站做准备。1984 年国家南极考察委员会组织了我国首次南极考察。1983 和 1985 年中国成为“南极条约”缔约国和协商国,1986 年才成为国际“南极研究科学委员会”(SCAR)成员国。目前,中国科学家秦大河研究员正担任 SCAR 冰川工作组主席。董兆乾研究员在担任 2 届国际南极研究科学委员会(SCAR)副主席后,又被选为“SCAR 组织与战略评估委员会”委员。到 2003 年止,中国已在南极建成了两个科学考察站,作为国家行为组织了 20 次南极考察,有 150 余人次的气象人员参加了这些考察。

1985 和 1989 年,在国家南极考察委员会组织下,中国气象科学研究院与国家海洋局海洋预报中心及南极考察办公室合作,完成了中国南极长城站气象站( $62^{\circ}13'S, 58^{\circ}58'W, 10\text{ m}$ )和中山站气象台( $69^{\circ}22'S, 76^{\circ}22'E, 14.9\text{ m}$ )业务筹备和业务建设任务。长城气象站和中山气象台建成后,很快就列入了世界气象组织(WMO)站网,其国际区站号分别为 89058 和 89573,观测资料能及时通过全球电信系统(GTS)进入世界天气监测网(WWW)。目前这两个气象台站已初具规模,地面观测、发报和气象通讯系统基本实现了遥测和自动化,达到国外站同类水平。1993 年,在长城和中山站都建设了高分辨极轨气象卫星资料接收处理系统,除为制作科考服务的站区天气预报外,还获得了高分辨率图像传输(HRPT)资料。

除常规气象业务观测和站区天气预报外,1985 年以来,先后在长城和中山站进行了近地面辐射和微气象观测实验。1994 年 12 月~1995 年 1 月在中山站附近的大陆冰盖上进行了包括超声风速脉动观测在内的近地面物理观测。

为研究南极与全球气候环境相互作用和影响,从 1993 年起,中山站用国际通用的 Brewer 臭氧探测仪进行了大气臭氧总量、二氧化硫、二氧化氮总量

及紫外 UV-B 观测,为完成南极“八五”和“九五”国家科技攻关任务提供了基础数据,也得到了 WMO 等国际组织的密切关注。目前在 WMO 南极臭氧公报中,已使用了南极中山站的 Brewer 臭氧观测资料<sup>[8]</sup>。此外,在中国南极考察站还进行过降水及冰雪样品化学组分测定、酸雨监测和样品采集及气溶胶和凝结核特性等大气环境特性的观测<sup>[9]</sup>。

在南极长城和中山站,与高层大气物理有关的电离层和极光观测,是由中国极地研究中心、信息产业部电子 22 所和中国科学院地质与地球物理研究所等单位承担的。目前已建成与国际标准接轨的南极中山站高空大气综合观测系统,该系统由数字式电离层测高仪、极光全天空电视摄像机、扫描光度计、地面臭氧监测仪、感应式磁力计、磁通门磁力计、成像式宇宙噪声接收机、CCD 单色极光全天空电视摄像机 8 台观测仪器组成,还建造了专门的高空大气物理(UAP)观测栋<sup>[10]</sup>,实现了对南极地区高空大气环境的连续监测,积累了极区多要素的连续观测资料,应用于极区高空大气物理研究。中国南极中山站具有得天独厚的地理位置,白天处于极隙区,晚上处于极盖区,可以观测到磁层动力学过程丰富的电离层征兆和极光现象,是地面监测空间环境的理想之地。中山站已成为世界上最有影响的 5 个高空大气物理观测站之一。

在参加“1990 年国际徒步横穿南极考察队”时,秦大河研究员进行了从南极半岛北端,经南极点到东南极和平站沿线的地面气象观测、雪坑观测和采样、冰面地貌勘察和观测;并协助前苏联队员进行了臭氧观测<sup>[11]</sup>。随着中国南极考察向南极内陆的延伸,从 1997 年起,中国多次组织了对南极内陆冰盖的科学考察,在赴 DOME-A 及格鲁夫山考察时,除进行冰雪采样、冰雪积累率等考察,地质考察和寻找陨石外,也还进行了气象观测。在 2001 年第 18 次南极考察时,中国与澳大利亚合作,在离中国南极中山站 250 km 的南极冰盖上设置自动气象站(LGB69,  $70^{\circ}50'S, 77^{\circ}04'E$ ; 海拔 1850 m),直接通过卫星传输资料,在北京通过互联网就可直接调用该自动气象站资料。今后还将结合深入冰盖的内陆考察,在从南极中山站到南极大陆最高点 DOME-A 的沿线继续增设 2~3 个自动气象站。

1984 年以来,在“向阳红十号”、“极地号”和“雪龙号”等科学考察船执行南极考察任务赴南极考察航行期间,考察船上都进行了常规的海洋气象观测和大

洋综合考察,近年来还进行了有关地面臭氧、紫外 UV-B、气溶胶、海气间 CO<sub>2</sub> 交换等大气环境监测。

## 2.2 中国的北极大气科学考察

中国对北极的实地考察和研究,比南极的实地考察要晚 10 a, 1996 年才成为“国际北极科学委员会(IASC)”成员国。目前中国已组织了 3 次北极考察,并于 2004 年在斯瓦尔巴群岛的新奥尔松建立了中国首个北极陆地科学考察站——中国北极黄河站。

1991 年在国家南极考察委员会和国家自然科学基金会的支持下,中国科学家参加挪威、苏联和冰岛科学家的北极考察;1994 年中国科学院和美国合作进行了阿拉斯加科学考察;1995 年中国科协组织了北极徒步探险,并到达了北极点;1997 年中国科学院大气物理所和中国气象科学研究院的气象工作者与挪威合作,在北极海冰上进行了大气边界层结构和湍流通量输送的试验研究;这些考察活动和南极考察一样,都为中国在北极开展科学考察和研究积累了经验。

作为国家行为,中国于 1999 和 2003 年利用雪龙号考察船实施了两次北极北冰洋综合考察<sup>[12, 13]</sup>,除在考察航线上进行海洋气象、地面臭氧、紫外 UV-B、臭氧探空等观测外;还在北极浮冰上建立了临时的联合冰站,进行了近地层大气物理(梯度和超声)、边界层大气结构(TMT 软气象塔)、高空大气探测(GPS 探空和臭氧探空)、极区大气化学和海水微量元素以及大气气溶胶和低层大气温室气体采集。

2001~2002 年在中国科学院、国家自然科学基金会和中国科协、中国科学探险协会等单位组织和支持下进行了民间的中国伊力特·沐林北极探险考察,在斯瓦尔巴群岛的朗伊尔地区进行了有关大气、冰川、地质和植物等学科的综合考察,这是极地科学工作者首次利用企业赞助进行较大规模的北极科学考察研究。

北极地区是一片由陆地包围的海洋,绝大部分陆地已有领土归属,由于中国是 1925 年“斯瓦尔巴德条约”成员国之一,斯瓦尔巴群岛是中国在北极地区能建立科学考察站的唯一地区。2004 年 7 月中国在斯瓦尔巴群岛的新奥尔松建立了中国第一个北极陆地科学考察站——北极黄河科学考察站(78°55'N, 11°56'E),进行高空大气物理、海洋生物、气象、GPS 跟踪观测和冰雪等方面的考察。中国北极黄河气象站是中国在本土以外建立的第 3 个气象站;中国南极中山站位于南极圈内,离南磁极也较近,

而新建的北极黄河站与中山站是在同一根磁力线上北南两端的共轭点,可以观测到受地球磁场控制的,同时,对称出现的南、北极极光等高空大气物理现象,对了解日地相互作用和地球环境有重要意义。

## 3 中国的极地大气科学研究

中国对南、北极气象的认识至少可追溯到 20 世纪 30 年代,已故北京大学教授李宪之先生在留德时,利用当时极为稀少的气象资料,作出了“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”<sup>[14]</sup>及“北半球西太平洋台风的生成与南半球强寒潮侵袭有关”<sup>[15]</sup>的大胆论断,这一些结论已被近代气象观测资料和数值模拟结果所证实。特别是利用气象卫星资料可清楚地看到,源自南、北半球中高纬度的云系能越过赤道影响另一半球。中国学者对于北极地区冷空气活动及其对中国天气气候的影响也早就有较多的研究<sup>[15~17]</sup>,对海冰与气候的关系也有所认识<sup>[18]</sup>。但对于南半球,特别是南极地区对全球大气环流及天气气候影响的研究工作则不多,很长时间停滞在“来自南半球的越赤道气流可能会对北半球天气气候产生影响”<sup>[9, 19]</sup>这一认识上。70 年代,中国气象学者对南、北两半球的相互作用有了进一步的认识<sup>[9]</sup>,并翻译了美国气象学会出版的《南半球气象学》<sup>[20]</sup>。结合 1979 年全球大气试验和中国青藏高原科学实验,中国学者对南、北半球及高、低纬度环流的相互作用作了进一步研究,并向 1983 年在巴西召开的第一次南半球气象学国际学术会议提交了论文<sup>[9]</sup>。国家海洋局的气象工作者参加了这次国际学术会议,并翻译出版了南极和南大洋天气气候研究译文集<sup>[21]</sup>。在此期间也进行了极地冰雪和中国气候关系<sup>[9, 22~24]</sup>及用微波遥感测定南极洲雪累积率<sup>[25]</sup>的研究。

近 20 a 来,中国的极地大气科学研究主要经历了 1990 年前、后两个阶段:

1990 年前是中国极地大气科学研究的起步阶段。有关南、北极的研究主要由中国气象科学研究院极地气象研究室和中国科学院大气物理所与冰川所承担<sup>[9]</sup>。1986~1989 年期间召开了几次学术讨论会<sup>[26~29]</sup>,主要收集在国家南极考察委员会组织的南极科学考察论文集和会议文集<sup>[26~30]</sup>。文献[9]对该时期南极气象考察研究在天气气候、天气预报和应用气象、大气物理与大气化学、高层大气物理及

古气候研究等方面的进展作了简要的回顾和评述。

1985 和 1989 年,中国建成了中国南极长城站气象站和中山站气象台,为开展南极实地气象考察和研究创造了条件。特别是南极中山站建立后,中国南极考察和研究的重点由以考察站建设为主转向以开展极地科学研究为主。在进行极地考察的同时,开展了有关极地气象和全球变化、地-气相互作用物理过程等考察和研究工作。

1990 年后,在全球变化思想指导下,围绕国家级科研项目,多学科协同合作,共同攻关,中国极地大气科学研究进入了快速发展阶段。“八五”期间,国家南极考察委员会组织了国家科技攻关“中国南极考察科学研究”项目,其中第 5 部分“南极与全球气候环境相互作用和影响”<sup>[31,32]</sup>和第 6 部分“南极地区日地系统整体行为研究”<sup>[32]</sup>分别由中国气象科学研究所和中国科学院大气物理研究所牵头承担。

在“九五”期间,国家海洋局极地考察办公室组织的国家科技攻关计划《南极地区对全球变化的响应与反馈作用研究》项目是继“八五”国家科技攻关《中国南极考察科学研究》计划的后续项目<sup>[33]</sup>,中国气象科学研究所和中国极地研究所等承担了有关气象和大气科学的“南极大气和空间物理过程及其对全球变化响应”专题的研究。1999 年的中国首次北极科学考察,围绕全球变暖对北极地区气候和环境的影响,开展了多学科的《北极海洋环境与海气相互作用研究》<sup>[34]</sup>。在“十五”期间的科技部社会公益研究专项《南极地区地球环境监测与关键过程研究》中,设有与大气有关的“南极地区气候异常过程及其对中国气候变化的影响”对南极敏感性气候因子与南半球主要大气活动中心的相互关系;南极中山大气臭氧总量、地面臭氧、紫外辐射及南极地区二氧化碳等温室气体和气溶胶的监测与基本过程进行了研究。2003 年中国第 2 次北极科学考察,以了解《北极变化及其对中国气候环境的影响》为主要科学目标,开展了一系列综合现场考察研究<sup>[13]</sup>。

近 5 a 来,国家自然科学基金委员会资助和结题的与南、北极有关的项目共 40 余项,与大气科学有关的有 16 项,涉及了极地大气科学研究的各个领域。

## 4 中国极地大气科学研究的重要进展

极地大气科学考察与研究是近 20 a 来在中国有较大进展的科学领域,通过研究对南北极与全球

变化的关系有了初步认识。在南极研究方面,对南极地区的天气气候特征、气候变化的时空多样性;南极臭氧和紫外辐射变化、长城和中山站及临近地区的辐射平衡特征、南极不同下垫面大气边界层结构特征;南极冰雪、地球化学等代用资料序列的建立及研究;极冰变化与关键区极冰的不同空间分布对中国降水和温度异常的影响、南极冰异常影响中国地区的天气气候的遥相关机制;南极洲海冰变化规律及海冰监测、气象预报服务等研究方面<sup>[9,32,33]</sup>获得了很好的成果。

在北极研究方面,揭示了考察航线上紫外 UV-B 辐射和地面臭氧、海-气二氧化碳通量的时空变化特征,北极地区大气气溶胶和大气化学特征;在北冰洋联合冰站,用国际先进的观测仪器获得了海面和浮冰区辐射和湍流交换的第一手资料;研究了北冰洋地区夏季大气边界层结构和下垫面能量平衡各个分量的变化特征;指出了北冰洋夏季海-气和冰-气之间边界层物理过程有明显差异<sup>[34,13]</sup>。

### 4.1 极地天气气候与全球变化

#### 4.1.1 南、北极地区的天气气候特征

极地气象工作者分别对极地天气气候特征、南、北极极地气旋路径、影响中国考察站的天气过程、极地气旋的卫星云图特征、中国南极考察的业务天气预报等进行了研究<sup>[9,31~34]</sup>。利用实地考察资料研究了东南极冰盖格罗夫山地区夏季的天气特征<sup>[35]</sup>和北冰洋浮冰区的气象要素特征<sup>[36]</sup>。

南极长城气象站和中山气象台是中国南极考察和研究的重要基地。与长城站相比,中山站的温度低、干燥、云量和降水少,风速大、大风天数也多<sup>[37]</sup>。南极长城站和中山站的纬度都高于 60°S,因而温度年变化都有南极特有的“无心冬季(Coreless Winter)”和“短暂夏季(Pointed Summer)”的变化特点。

对南极地区的大气振荡特征的研究表明,准 2 a 振荡是南极地区各区域普遍存在的一种主振荡周期,在东南极和南太平洋地区,准 2 a 振荡的强度要大于其他区域;不同大气要素温度准 2 a 振荡的经向传播方向也不同的。准 1 周和准 2 周振荡是南极地区各层次温压参数和大气臭氧普遍存在的 2 种主振荡周期,不同年份其振荡强度也有所不同。在中山站-昭和站地区准 1 周和准 2 周振荡都是由西向东传播的。准 1 周和准 2 周振荡都可以由上而下或由下而上地穿越对流层顶,平流层和对流层的中期振荡有着密切的关系。在南极地区,大气的准 2 周

振荡可能是极涡本身固有振荡的反映,而周期较短的准 1 周振荡则可能是外来扰动强迫振荡的反映<sup>[9, 38, 39]</sup>。

在中山站附近东南极冰盖,采用自动气象站对雪面相对高程(SSH)变化的自动监测表明:从 2002 年 2 月至 2003 年 1 月 LGB69 站点的年雪积累量为 0.68 m,与花杆网阵所得结果接近。南极夏季(10 月至次年 4 月)为主要积累期,占全年积累量的 101.6%;南极冬季(5~9 月)雪面高度几无变化,雪层密实化作用使之略有下降,为全年雪面变化量的 -1.6%。该地雪面突升时均伴随空气湿度增加和太阳总辐射下降,是由降水过程所致;下降风对雪面高程变化有正向作用,主要积累期风速的增大伴随着积雪增加,估计其贡献率在 35% 以上。上述结果为估算“Lambert 冰盆-Amery 冰架”地区物质平衡、解释冰芯气候记录以及验证卫星测高仪测量结果提供了直接的地面依据<sup>[40]</sup>。

#### 4.1.2 南极地区气候变化的时空多样性

南极地区天气气候变化有明显的区域性特点,聚类分析结果表明,在 50°S 以南存在着 5 个温度变化不同的区域;海冰变化的区域划分基本上与温度变化一致。南极气候变化区域性差异的提出为进一步研究南极地区对全球变化的响应提供了重要的线索<sup>[41~43]</sup>。

南极地区的气候变化从时间、空间上来说都是多样的。近 50 a 来南极和邻近地区的温度变化与全球平均并不一致。南极地区的增暖主要发生在南极半岛地区,南极大陆主体并不明显,近 10 余年来还有降温趋势<sup>[41, 43]</sup>;近年来西南极频繁发生的冰架融化和崩塌,在东南极却没有发生。中国南极长城站和中山站正好处于南极半岛和东南极两个不同的气候区,中国南极长城气象站和中山气象台常规气象观测(图 1)及与气象有关的科学考察资料也证实了上述观点<sup>[37]</sup>。上述南极地区气候变化时空多样性的提出为进一步研究南极地区对全球变化的响应提供了重要的线索。

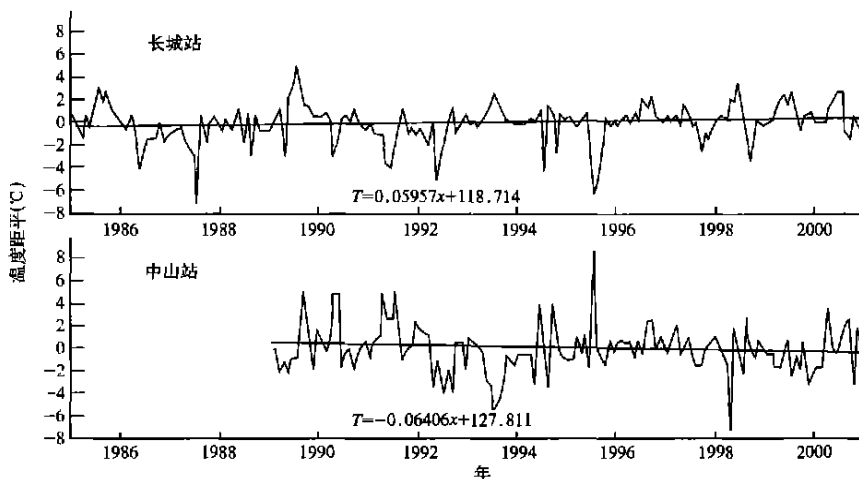


图 1 南极长城站和中山站的温度变化(1986~2000 年)<sup>[37]</sup>

Fig. 1 Air temperature variations at Great Wall and Zhongshan St

南极地区的气候系统是十分复杂的,南极和邻近地区大气温度、臭氧和南极海冰的变化趋势在时间、空间上都是多样的,有些变化也很难用单一的人类活动影响来解释。目前还没有足够的依据能说,近 50 余年来南极和邻近地区的温度变化是由于温室效应加强的结果,这种变化在很大程度上仍可能是由于气候系统内部变化的结果。对南、北半球温度短期气候变化趋势的差异,以及近 10 余年来南极半岛以外的南极若干地区出现降温倾向的气候学意

义应予以重视<sup>[37, 41, 43]</sup>。

#### 4.1.3 极地海冰变化和南极海冰涛动

南、北极是海冰的季节变化最大,备受大气科学家关心的下垫面特征<sup>[44~47]</sup>。与温度一样,极地海冰变化也存在明显的区域性变化特征。对海冰北界月平均变化距平序列的聚类分析结果表明,南极海冰可以划分成 5 个短期气候变化相似的区域,此种区域划分在时间上是稳定的,海冰资料长短并不影响对区域划分的结果<sup>[45]</sup>。

对南极海冰密集度距平场的 EOF 和 SVD 分析表明,首要模态的正负距平区分布与聚类分析方法划分的南极海冰聚类分区结果基本一致。南极半岛西侧的别林斯高晋海及罗斯海外围是两个具有“翘翘板”特征、与 ENSO 有紧密联系的两个关键区(图 2, 见封三),也反映了南极海冰变化的区域差异。由此定义南极海冰涛动指数(ASOI)与 SOI, NINO3 指数的变化有密切关系。可用南极海冰涛动指数来讨论海冰状况和南极海冰关键区的活动;南极海冰涛动指数的建立,将为进一步认识南极海冰变化对大气环流及中国天气气候影响的研究提供新的思路,为中国短期气候预测提供新的线索<sup>[48, 49]</sup>。

中国学者提出了南方海洋涛动的观点,把南极海冰和厄尔尼诺事件联系起来;指出南极威德尔海是南极海冰的正反馈中心,罗斯海是南北两极海冰的负反馈中心,解释了南极海冰、厄尔尼诺事件和海平面变化之间相互关系的物理机制;研究了两极海冰对南方涛动的影响,指出北极海冰与南方涛动指数是反相关,而南极海冰是正相关,南极海冰与南方涛动的关系比北极冰更明显。研究了两极海冰活动的相互影响,大西洋北极海冰起主导和领先的作用,影响南极威德尔海海冰的变化;太平洋区域南极海冰起主导和领先作用影响北极海冰的变化<sup>[33]</sup>。两极海冰与青藏陆面物理过程也存在耦合关系<sup>[50]</sup>。

#### 4.1.4 极地影响的转盘模拟和数值模拟

南极地形及冷源对大气环流影响的流体物理转盘模拟实验表明,南极附近大气环流及气候特征的形成是南极地形和冷源共同作用的结果。如果只有地形没有高空冷源或只有平面冷源或没有地形,都难以生成南极附近的大气环流特征。南极地形对南半球对流层平均流场影响的物理实验表明:南极附近流场的成因,可以用位涡守恒原理解释,大尺度环流的形成机制是正压的,南极沿岸和南极大陆上空的气旋性和反气旋性涡旋主要是因非对称南极地形的动力强迫作用而生成的<sup>[44, 51, 52]</sup>。

数值模拟表明:南极地区海温、海冰等大气环境特征异常,先是通过赤道纬向环流异常,然后在西北太平洋自南向北能激发一串涡列,影响中国地区的天气气候,这可能就是南极温度及南极冰异常对大气环流影响的遥相关机制<sup>[53, 54]</sup>。

南极大陆地形动力和热力作用不但对长期天气和气候过程有影响,而且对南半球的中期环流演变也有重要影响<sup>[55, 56]</sup>。在南亚季风区春-夏季节过渡

时期,南、北半球的相互作用还受青藏高原大地形和低纬地区非绝热过程的强烈影响。海冰变化对中国东部地区夏季降水、南极地形对南极地区中期天气过程、以及南极地区的超长波系统对北半球夏季环流和特征行星波也有重要的影响<sup>[57, 58]</sup>。

建立了冰-海洋耦合模式,首先在渤海和波罗的海进行模拟和数值试验,从而验证该耦合模式的可靠性,并着手用于研究南大洋海冰及其与海洋相互作用<sup>[59-62]</sup>。

#### 4.1.5 极地天气气候及其对东亚环流和中国天气气候的影响

南极冷暖和冰雪状况的变化及其对全球大气环流和天气气候的影响一直是气象学者十分关心的重要问题。南极地区的积雪量与中国长江流域梅雨及中国东北地区夏季低温有密切的关系<sup>[9, 22]</sup>。南极海冰与赤道海温、西太平洋副热带高压及台风也有一定的关系。北半球夏季的环流形势及中国夏季降水和温度状况与前期南极大陆的温度状况、南极海冰变化与中国汛期降水存在着遥相关关系。南极大陆冷空气活动和越赤道气流异常对中国灾害性天气有重大影响;南极地区热汇强度,冰雪消涨与越赤道气流及季风区的环流有显著的联系<sup>[44]</sup>。

天气学相关分析表明,南极地区夏季温度变化与中国夏季降水有着显著的相关,南极大陆是南极温度与中国降水相关的最敏感的区域,而南半球夏季则是对中国夏季降水产生影响的敏感季节;中国东北地区夏季温度的变化与前期南极大陆的温度也存在显著的遥相关<sup>[63]</sup>。

南极海冰与极涡指数的时空变化也存在一定的关系<sup>[64]</sup>。南极海冰变化对大气热量传输和大气环流会有影响,南极海冰面积偏大可以引起南极大气冷源偏强,副热带高压在极地海冰与全球大气环流的联系中起关键作用。极冰冷源可以激发北半球大气的遥相关,这种现象可以看成二维罗斯贝波列在西风带中沿一定的波导传播,并有可能在低纬引起反射现象<sup>[33]</sup>。

北大西洋涛动和北极涛动能对东亚气候变化产生影响。北大西洋涛动(NAO)是除南方涛动外影响气候年际变化的主要源地。长期以来,NAO 研究主要强调它对欧洲和北极气候变化的影响,很少研究它与东亚以及北太平洋气候变化之间的联系。近年来,中国学者研究了冬季 NAO 极端异常对东亚冬季风的影响<sup>[65, 66]</sup>,指出冬季 NAO 强(弱)则西伯

利亚高压弱(强)、东亚冬季风也弱(强),NAO 能通过影响西伯利亚高压进而影响东亚冬季风。

1998 年, Thompson 等<sup>[67]</sup>提出了北极涛动(AO)的概念,中国学者<sup>[68]</sup>则定义了南极涛动(AAO),他们均以月平均海平面气压 EOF 第一模态的主成分作为 AO 或 AAO 指数。它反映北极或南极与中纬度地区海平面气压的反向变化关系。AO 与 NAO 有高相关,实际上,很难把两者明确区分开来。与 NAO 一样,冬季 AO 可以影响冬季西伯利亚高压,特别是在贝加尔湖以北以西地区。当 AO 不同位相时,冷空气的主要活动范围有明显差异,AO 可以直接影响东亚地区的气温。从 80 年代末开始,AO 主要处在正位相时期,因此,东亚冬季风一直偏弱。这就是 AO 影响东亚冬季风的主要机制<sup>[69]</sup>。

北极海冰变化对东亚气候变化也有影响。冬季巴伦支海和喀拉海海冰变化与中国气候年际和年代际变化有密切的联系<sup>[70,71]</sup>。北半球副热带高压与北极海冰有遥相关关系<sup>[72~75]</sup>,冬季关键海区海冰面积变化与东亚冬季风强弱变化有关系,即海冰通过影响大气遥相关型和冷空气活动,影响东亚冬季风及后期夏季西太平洋副热带高压(图 3)和夏季风。冬季巴伦支海海冰面积异常强迫下的大气环流跨季度数值模拟实验也证实了上述结论<sup>[76]</sup>。

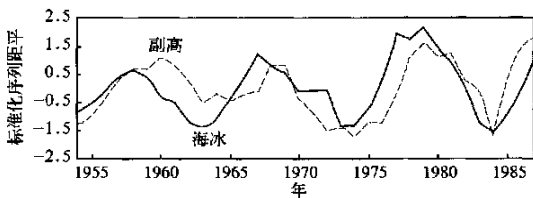


图 3 冬季巴伦支海、喀拉海海冰(实线)与后期夏季西太平洋副热带高压面积指数(虚线)变化<sup>[76]</sup>  
(3 a 滑动平均后的海冰和副高指数的标准化序列,对冬季海冰,1954 表示 1953/1954 年冬季)

Fig. 3 The 3-year moving mean of winter sea ice extent in the Barents\_Kara Seas (solid) and the extent index of the western Pacific Subtropical High during the following summer (dashed) (Normalized time series), For winter sea ice, 1954 denotes the winter of 1953/1954.

用观测资料诊断分析和数值模拟方法,研究了春季白令海和鄂霍次克海的海冰范围极端异常与东亚夏季风降水变率之间的相关及其动力学机制,结果表明:当春季白令海和鄂霍次克海的海冰范围偏少时,夏季东亚高纬度地区存在一个异常高压,该异

常高压使中国南方冷空气活动频繁,阻止了东亚副热带夏季风向北推进,使梅雨锋及其降水加强,其中欧洲陆面过程是连接春季海冰与东亚夏季风之间的桥梁<sup>[77]</sup>。

## 4.2 极地边界层物理和海-冰-气相互作用研究

### 4.2.1 辐射状况

利用南极考察资料,对南极地区近地面辐射平衡特征、中山站的紫外辐射,南、北极考察航线紫外 UV-B 辐射等进行了研究<sup>[78~86]</sup>;研究了南极大气外太阳辐射的能谱分布<sup>[87]</sup>和 UV-B 对南极生物群落系统的生态学效应<sup>[88]</sup>。

中国南极长城站和中山站,纬度差异并不大,但由于气候状况,特别是天空云量不同,长城站到达地面的总辐射仅为中山站的 50% 左右。在冬半年,长城站有积雪覆盖时地面反射率达 40%~60%,而无积雪覆盖时地面反射率仅 20% 左右。两站净辐射夏半年为正,冬半年为负。就全年而言,净辐射均大于 0,地面对大气而言为热源<sup>[9]</sup>。

在中山站地区紫外辐射(290~385 nm)占总辐射的比值各月变化不大,紫外辐射年总量大致为总辐射的 5.6% (1993~1994 年),与北极 Bergen 地区(60°24'N, 5°19'E, 45 m)的 5.1% (1991 年)大致相近,而略高于青藏高原那曲地区(31°29'N, 92°03'E, 4507 m)的 4.2% (1992~1993 年)。中山站地区有 55 d 极昼和 58 d 极夜。在极昼期的 12 月,中山站总辐射月总量(938 MJ/m<sup>2</sup>)和紫外辐射月总量(53 MJ/m<sup>2</sup>),都大于青藏高原那曲地区 6 月份的相应值(728 和 31 MJ/m<sup>2</sup>)。对极地辐射气候的这一特征应予以重视<sup>[89]</sup>。

利用实测资料,对北极浮冰区辐射平衡特征的研究表明<sup>[36]</sup>,总辐射和净辐射都有明显日变化,净辐射日平均在夏季为正值,冰面有净的辐射能收入。地面有效辐射、大气逆辐射及冰面射出长波辐射的日变化和日际变化都不明显。由于南北两半球海陆分布及南极和北极地区海拔和下垫面状况的不同,北极该纬度(75°N, 160°W)气温和南半球接近同一纬度的格罗夫山地区(73°S, 75°E)的气温差异显著,同样是夏季,北极气温比南半球同纬度地区气温高出 15 °C 以上<sup>[36]</sup>。

### 4.2.2 热状况和能量平衡

长城站地区,仅夏季进行过近地面热量平衡的考察,1987 年 12 月~1988 年 3 月长城站地区的平均感热通量为 39 MJ/m<sup>2</sup>,小于中山站 12 月~次年



3 月的平均值 ( $104 \text{ MJ/m}^2$ ); 平均潜热通量为  $218 \text{ MJ/m}^2$ , 则大于中山站地区 ( $79 \text{ MJ/m}^2$ ), 这与长城站云量多、降水多、湿度大是一致的<sup>[89]</sup>。在夏季, 长城站地面相对于大气而言, 仍为热源, 地面主要以潜热输送的方式加热大气。夏季长城站的热状况特征与中国青藏高原东部地区进入雨季后的情况相近<sup>[89~92]</sup>。

中山站地区, 各月感热通量的绝对值都大于潜热通量; 夏半年感热和潜热通量大于 0, 鲍文比 ( $\beta = S_h/L_e$ ) 为 1.25, 地面通过湍流感热和潜热加热大气, 感热和潜热输送的数值相当; 冬半年感热和潜热通量都小于 0,  $\beta$  为 22.75, 大气通过湍流感热和潜热失去热量, 与感热相比, 潜热输送数值很小; 感热通量的年总量为负值, 地面对大气而言为感热汇, 潜热通量的年总量为正值, 地面对大气而言为潜热源。在中山站潜热通量年总量的绝对值大于感热通量, 地面仍以湍流热通量的方式加热大气<sup>[89,93,94]</sup>。

对东南极大陆中山站南部冰盖上极昼期间超声风速仪直接测量的大气湍流资料和大气廓线资料分析表明, 南极沿海地区冰盖上下风特征十分明显, 湍流强度比较弱, 在风小的情况下, 切应力有增加趋势。感热通量有明显的日变化, 日振幅达到

$50 \text{ W/m}^2$ 。雪面全天以感热方式损失的热量大于所获得的热量<sup>[94]</sup>。

用整体输送法和四维资料同化系统(DAS)模式结合卫星遥感资料计算了南极近海域的感热、潜热通量<sup>[95,96]</sup>。南极近海域动量通量均为负值, 量级为  $10^2 \text{ N/m}^2$ , 从大气向海洋输送动量, 感热通量为负值, 潜热通量为正值; 1987 和 1988 年夏季是一个微弱的热源, 即热量是从海洋向大气输送的, 1985 年感热、潜热通量之和为负值, 为热量汇<sup>[95,96]</sup>。

对北极考察所获资料的研究表明<sup>[34,97~102]</sup>, 海气和冰-气边界层物理过程的差异十分明显(图 4)。冰面净辐射还不到海面净辐射的 1/10, 且主要消耗于感热输送和冰面融化过程; 而海面净辐射大致有一半消耗于潜热输送过程, 水中热通量和感热输送量大致相当(各占净辐射的 1/4); 海冰的存在大大地抑制了海洋与大气间的热量交换<sup>[97,100]</sup>。在北冰洋夏季, 无冰海面有大量的水汽向大气输送, 潜热为负值; 而当观测的浮冰位于数公里的浮冰区中时, “逆湿”消失, 往往冰面温度高于  $0^\circ\text{C}$  时冰面融化, 潜热为正值。在北冰洋大气边界层参数化方案中, 应对冰-汽相互作用过程和无冰海面的边界层过程的差异予以足够的重视<sup>[100]</sup>。

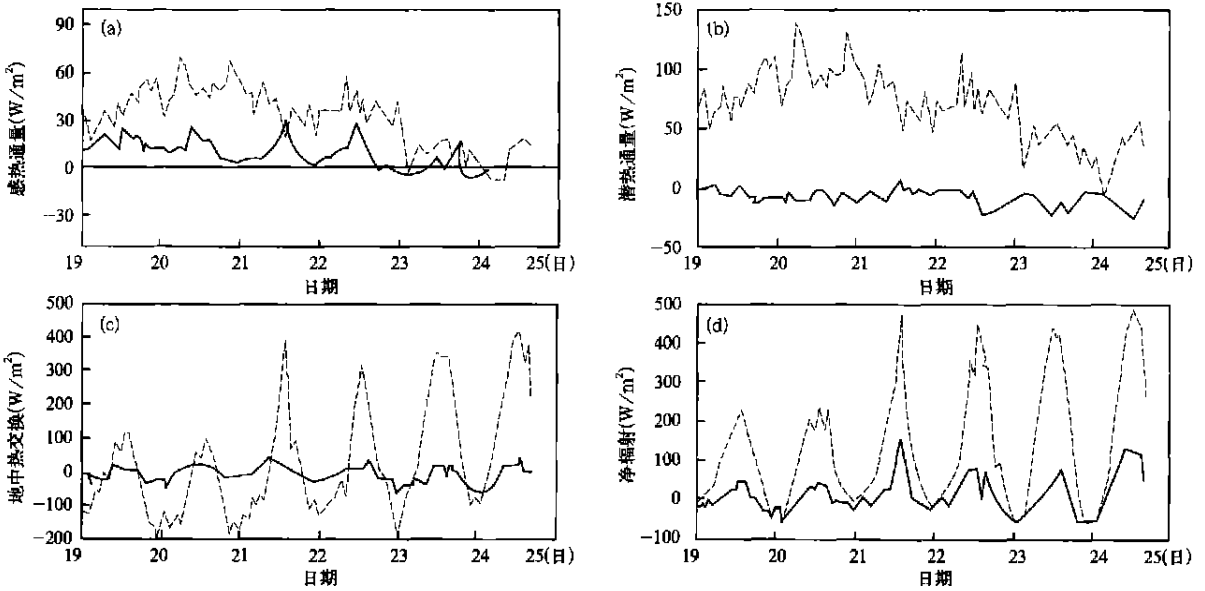


图 4 1999 年 8 月 19~24 日北冰洋洋面和冰面的能量通量<sup>[100]</sup>的时间序列  
(a. 地表感热, b. 潜热, c. 地中热交换, d. 净辐射变化特征; 冰面热通量(—)和海面热通量(---))

Fig. 4 Time series of hourly sensible(H) and latent(LE)heat flux, ocean heat flux and sea-ice conductivity heat flux(G) and net radiation flux(Rn)for over the ice(—) and water(---) surface in August 19—24, 1999

#### 4.2.3 边界层结构和特征参数

用现代化的边界层及湍流观测仪器, 进行冰盖

及南极大陆上大气边界层观测, 取得了边界层动力和热力通量结构参数及大气湍流特征的宝贵资料;

分析研究了南极不同下垫面大气边界层结构特征<sup>[93, 94]</sup>。

首次北极考察时利用系留气艇(TMT 软气象塔),在 69~ 75°N 不同海冰密集度洋面和浮冰上,获取了有关北极大气边界层结构特征的第一手资料<sup>[100~ 103]</sup>,在北极地区洋面和浮冰等不同下垫面上空,大气层结大都是稳定的,且还经常出现持续时间长,逆温层厚度厚且强度高。北冰洋地区的大气边界层结构(特别是逆温结构)不仅与陆地、海洋下垫面,而且与南极大陆的大气边界层结构有明显差别<sup>[100, 103]</sup>。逆温层的存在严重阻碍了海-冰-气之间能量和物质的交换,逆温层内感热和潜热通量均为负值,且潜热通量小于感热通量,此时大气以感热为主的方式向海面(冰面)输送热量<sup>[102]</sup>。

在北冰洋及其邻近海域,海-冰-气交换往往是渐近积累和在一定条件爆发的,这种过程与大气逆温的屏障有关<sup>[102]</sup>。因而在研究该海域海-冰-气交换和相互作用时不仅要注意云辐射的缓冲、不同下垫面反射率变化及海冰对热量传输的阻断,还要重视大气逆温的屏障作用。

通常近地面湍流感热输送能力用拖曳系数( $C_D$ )来表征,南极中山站地区的年平均  $C_D$  为  $1.11 \times 10^{-3}$ ,  $C_D$  月平均值的年变化并不大,在夏季 11 月~次年 2 月  $C_D$  平均值为  $1.19 \times 10^{-3}$ ,冬季的 5~7 月  $C_D$  平均值为  $1.02 \times 10^{-3}$ ,  $C_D$  月平均值的最大年相对变化仅 23%。长城站地区夏季的拖曳系数  $C_D$  为  $1.21 \times 10^{-3}$ ,基本与夏季中山站( $1.19 \times 10^{-3}$ )及南极瑞穗附近的冰雪覆盖面上( $0.8 \times 10^{-3} \sim 1.5 \times 10^{-3}$ )的值相近。在青藏高原唐古拉地区,冬季的  $C_D$  为  $1.18 \times 10^{-3}$ ,与夏季中山站和长城站相差不多。再次说明在夏季,南极大陆的边缘地区与亚南极地区一样,近地面的湍流交换能力较弱,仅相当于冬季青藏高原某些地区的湍流交换能力<sup>[89, 104]</sup>。

北冰洋夏季近地层大气以(近)中性层结为主,北冰洋浮冰区即使在极昼期的晴天,湍流交换的强度也很弱。近中性层结的动量和热量交换系数分别为  $1.24 \times 10^{-3}$  和  $1.12 \times 10^{-3}$ ,与在格陵兰东侧浮冰上获得的结果较为接近<sup>[102]</sup>。从总体上来说,极地洋面的  $C_D$  值小于极地陆地上的观测值。其中,夏季浮冰区的  $C_D$  值约为  $1.12 \times 10^{-3}$ ,与南极大陆沿海地区大致相近;而在开阔洋面则为  $1.0 \times 10^{-3}$ ,略

小于海冰区<sup>[99, 100]</sup>。在相同条件下曳力系数  $C_D$  大于水汽交换系数  $C_E$ ,而水汽交换系数  $C_E$  又大于感热交换系数  $C_H$ 。其中,  $C_D$  值为  $(0.87 \sim 1.76) \times 10^{-3}$ ,  $C_H$  值为  $(0.84 \sim 1.37) \times 10^{-3}$ ,  $C_E$  值为  $(0.85 \sim 1.40) \times 10^{-3}$ 。动量通量、感热通量和潜热通量与平均风速、平均位温差和平均比湿差有明显的关系<sup>[101, 102]</sup>。

北极苔原表面  $C_D$  随稳定度参数  $Z/L$  的增加而减小,数值约为  $(2.5 \sim 4.5) \times 10^{-3}$ ;苔原表面的  $C_D$  大于洋面和浮冰表面<sup>[103]</sup>。在北极苔原地区,夏季地面向大气输送的感热通量要大于洋面和浮冰表面。

#### 4.2.4 理论研究

利用倾斜地形上的地转阻尼定律和热传输定律,在各种外参数条件下,试验研究了南极冰盖地形坡度对近地面的动量和热量垂直交换所产生的影响<sup>[105]</sup>。

通过理论研究和对南极中山站附近冰盖上观测梯度和湍流脉资料的分析发现,南极地区近地层大气逆温较强时,也可出现热量自下向上输送的逆梯度输送现象,这对近地面逆温的发展和维持具有重要意义。这一现象可以用湍流统计的多尺度理论来解释,在此过程中,浮力湍流的穿越能力起了主要作用<sup>[106]</sup>。

#### 4.3 极地大气化学

大气化学是近代发展起来的一门交叉学科,是大气环境和大气污染问题研究的主要手段之一。长城站建成后,研究人员采集了降水、积冰、积雪和海上冰山碎片及气溶胶等各种样品,进行了大气化学分析和研究<sup>[107, 108]</sup>。中国学者对南极地区气溶胶中的硫酸盐、磷酸盐、硝酸盐的浓度及其来源也进行了研究<sup>[109]</sup>。通过这些研究,对长城站附近地区的大气环境质量有了基本的了解,为进一步开展此项研究积累了经验。在中山站建设过程中,科技人员广泛采集了该地的大气、水、土、冰、雪等样本,为评价该地的大气本底环境取得了第一手材料。利用参加国外站考察的机会,中国学者也对澳大利亚南极莫森站的大气凝结核和日本昭和基地背景气溶胶的化学成分进行了研究<sup>[110]</sup>。

##### 4.3.1 臭氧研究

中国对南极大气臭氧的实地考察研究始于 20 世纪 80 年代,中国学者在参加国外站南极考察时,利用国外资料,讨论了春季平流层爆发性增温与臭

氧变化的关系<sup>[111]</sup>。1988~1989年,利用北京大学地球物理系研制的太阳光谱仪,在南极长城站对大气臭氧总量等进行了观测,并讨论了臭氧总量的日变化<sup>[112]</sup>。1993年中国在位于东南极大陆的中山站,运用国际通用的 Brewer 臭氧光谱仪进行大气臭氧总量观测,并开展了有关的研究<sup>[113~117]</sup>。

对南极地区大气臭氧总量的短期气候变化特征和臭氧洞形成机理的研究<sup>[118,119]</sup>表明,近40a来南极地区的大气臭氧有较明显的减少趋势( $-2.9\%/10\text{a}$ ),且1970年前后为一转折点,在此前南极地区臭氧是增加的,而在此后则是减少的;从季节上来说,臭氧亏损主要发生在春季,在下半年,大气臭氧总量的年递减率几乎为零。这说明南极地区大气臭氧显著的损耗现象主要是由南极臭氧洞的形成与发展所造成的<sup>[42]</sup>。

中山站 Brewer 大气臭氧总量观测结果与同期气象卫星 TOMS 反演结果的对比分析表明:两者的变化有很好的一致性,这说明中山站 Brewer 观测结果是可靠的,有国际可比性。在中山站上空大气臭氧总量有着十分显著的日变化,这种变化与中山站位于臭氧洞边缘,受南极平流层极地涡旋摆动与伸缩的动力过程影响有关。大气臭氧总量的变化与平流层的环流系统有着密切的关系。UV-B 的辐射强度与臭氧斜程柱总量之间存在着负指数关系,且负指数系数随着波长的减小而增大<sup>[114,115]</sup>。讨论了南极臭氧洞期间中山站和日本昭和站大气臭氧的自谱特征及其相互关系、臭氧总量和大气温压参数振荡的相互关系及大气振荡的垂直结构<sup>[39]</sup>;近10a来中山站大气臭氧总量与全球臭氧变化一样,也有明显的下降趋势(图5)。虽近40余年来,南极地区的大气臭氧总量的变化与全球大气臭氧总量变化趋势相同,但也有其时空多样性的特点<sup>[118]</sup>,继2001年南极臭氧洞接近有记录以来最大后,2002年臭氧洞异常减小就是例证。

自1993年以来,9~10月中山站地区的平均大气臭氧总量都低于220 DU<sup>①</sup>,是该地上空春季臭氧洞最强的时候,经常出现低于200 DU 的大气臭氧总量低值。中山站处在南极大陆的边缘地带,也常处于极地涡旋及南极“臭氧洞”的边缘,对“臭氧洞”的变化反应十分敏感,故春季臭氧总量日际变化幅

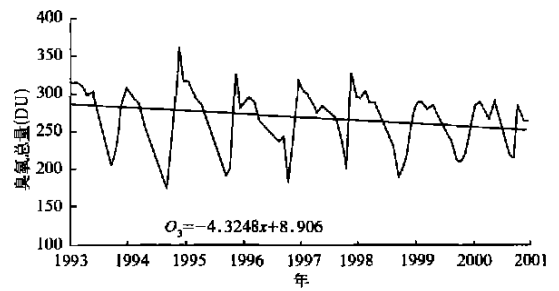


图5 1993~2000年南极中山站大气臭氧月平均总量的变化<sup>[37]</sup>

Fig. 5 Variations of total ozone amount at Zhongshan St(1993—2000)

度非常大<sup>[114]</sup>。数值模拟结果表明,臭氧洞的产生与人类活动排放到大气中的污染物(CFCs, Halons, NO<sub>x</sub>等)在平流层低温条件下气溶胶冰晶云(PSC)表面的非均相化学反应密切相关。春季臭氧低值的出现,与极夜结束后,人类活动排放到大气中的氟氯烃(CFCs)和溴化烃(Halons)等含氯和溴的化合物,在平流层低温条件下形成的冰晶云(PSCs)或液态硫酸气溶胶表面,通过非均相化学反应大量消耗臭氧有关。在南极春季,极地平流层冰晶云的形成增加了氯化物浓度,降低了臭氧的生成速率,使奇氯成份对臭氧的损耗占主导地位,这是南极臭氧洞形成的直接原因。除氟里昂外,大气中氮氧化物等污染物也对南极臭氧洞形成有重要影响<sup>[119]</sup>。秋季南极臭氧相对低值的产生主要与天文日照减少有关。在南极除春季臭氧洞外,秋季也出现臭氧低值。秋季相对低值的出现,主要与南半球夏至(12月22日)以后,南极地区日照时数减少有关,该低值的产生机理与臭氧洞不同<sup>[118,119]</sup>。

采用 Brewer 臭氧观测仪除获得了大气臭氧及二氧化氮柱总量的连续资料外,通过 Umeker(逆转法)反演也得到了大气臭氧垂直分布廓线<sup>[116]</sup>。南极臭氧洞期间的大气臭氧减少,主要发生在平流层冰晶云(PSC)经常出现的平流层下部(14~25 km);平流层二氧化氮与臭氧柱总量变化的关系密切,平流层二氧化氮的减少是南极臭氧洞形成的主要原因之一<sup>[117,119]</sup>。

#### 4.3.2 南、北极考察航线地面臭氧和二氧化碳等通量的观测研究

① DU——指大气平流层,假定垂直气柱中 O<sub>3</sub> 全部集中起来成为一个纯臭氧层,这一纯 O<sub>3</sub> 层在 0 °C, 1013.25 hPa 条件下, 10<sup>-3</sup> cm 厚度定义为 1DU。

除大气臭氧总量外, 利用“雪龙号”赴极地考察的机会, 获得了从 75°N~70°S 极地考察航线上的地面臭氧观测资料(图 6), 研究表明, 北半球的平均地

面臭氧浓度大于南半球, 东亚地区是考察航线上地面臭氧浓度和日变幅最大的地区, 两极地区平均日变化幅度很小<sup>[120]</sup>。

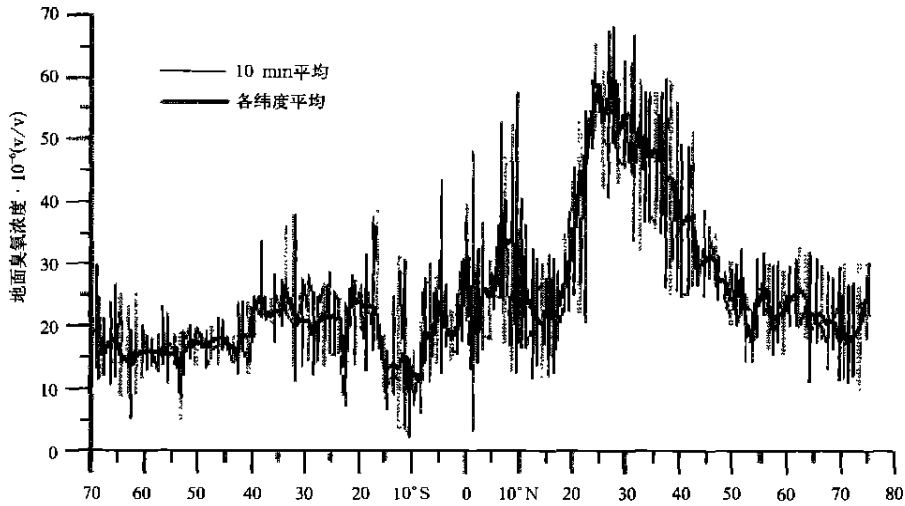


图 6 雪龙号赴极地考察航线上地面臭氧随纬度的平均变化<sup>[120]</sup>

(赴北极航线: 1999 年 7~9 月; 赴南极航线: 1999 年 11 月~2000 年 4 月)

Fig. 6 Latitudinal variations of surface ozone concentration on aboard of the Chinese scientific ship Xuelong (To: Arctic 1999 Jul. —Sep; To: Antarctic 1999 Nov. —2000 Apr.)

对南大洋海冰区 CO<sub>2</sub> 源汇分布及其海-气通量的研究表明, 80°E~60°W 之间的南大洋海冰区在整个夏季都是大气 CO<sub>2</sub> 的净汇区, 其中 1 月份通量约为 12 月份通量的 2 倍。反映了南大洋海冰区夏季高生产力对南大洋碳通量的显著影响<sup>[121]</sup>。普里兹湾夏季海-气 CO<sub>2</sub> 分布特征与叶绿素分布情况有良好的相关关系; 但是在普里兹湾外的南极辐散带, 由于绕极深层水(CDW)的向上涌升, 本来是强汇的普里兹湾受到富含 CO<sub>2</sub> 的深层水影响发展成大气 CO<sub>2</sub> 的源区。在整体上, 夏季南大洋海冰区 pCO<sub>2</sub> 的分布特征主要由生物影响, 但在一些局部的海区水文物理过程仍然产生控制作用<sup>[122]</sup>。

在北冰洋考察区, 除东部海域夏季为大气 CO<sub>2</sub> 的弱源区外, 大部分海域都为大气 CO<sub>2</sub> 的汇区或强汇区。北冰洋上层水柱具有较活跃的碳循环过程。在夏季, 北冰洋具有相对活跃的碳循环过程, 它并非生物生产力的“沙漠”, 具有较高的生物泵运转效率, 楚克奇海陆架是一个高效的有机碳“汇”区<sup>[123]</sup>。

#### 4.3.3 大气气溶胶

在考察航线和南北极考察站, 都进行过有关大气气溶胶的考察, 对南极地区气溶胶中的硫酸盐、磷酸盐、硝酸盐的浓度及其来源也进行了研

究<sup>[124-129]</sup>。

北极地区大气气溶胶中海洋气溶胶的质量浓度随海域的变化不大; 气溶胶浓度和大气微量元素入海通量都低于近中国海域; 楚科奇海大气气溶胶中铅(Pb)浓度很大, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的浓度随纬度的增加呈现减少的趋势, 低纬度近海岸地区污染相当严重, 与人类工业污染有关<sup>[129]</sup>。

#### 4.3.4 大气 CH<sub>4</sub> 与 N<sub>2</sub>O 浓度和土壤通量监测

在南极法尔兹半岛不同生态和环境区域采集了近地面气体样品, 并在室内分析了 CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 的浓度; 结果表明: 退潮海藻带、企鹅聚集区、人类科考站区近地面 CH<sub>4</sub> 平均浓度显著高于其他无人区, 是南极地区大气 CH<sub>4</sub> 主要的排放源; 而苔藓、地衣植被区 CH<sub>4</sub> 浓度平均为 1710 nL/L, 低于其他地区(甚至内陆冰盖区), 是南极地区大气 CH<sub>4</sub> 重要的吸收汇; 苔藓、地衣植被区 N<sub>2</sub>O 浓度(321.3 ± 3.1 nL/L), 显著高于全球平均浓度(约 314 nL/L), 在夏季该植被区 N<sub>2</sub>O 浓度呈明显上升趋势。科考站区普遍高于无人区, 是人为排放源; 而企鹅聚集区 N<sub>2</sub>O 在所有采样区域中是最高的, 是南极地区大气 N<sub>2</sub>O 高的排放源<sup>[130]</sup>。1999 与 2000 年夏季对南极菲尔德斯半岛不同地点大气中 N<sub>2</sub>O 浓度进行了监测, 不同地

点大气中  $N_2O$  浓度普遍比 1999 年低, 但整体变化规律相似: 各考察站区  $N_2O$  浓度普遍高于无人区; 企鹅聚集区  $N_2O$  浓度却高于各考察站区, 企鹅及其排泄物、人为源是南极大气中  $N_2O$  主要的源<sup>[131]</sup>。

#### 4.4 气候代用资料的获取和古气候环境研究

南极冰架、南大洋沉积物中和南极大陆上保留着地球上数万年气候的详细记录, 是研究古气候的极好场所。中国学者在这一方面做了不少的工作, 进行了有关建立气候代用资料和古气候的研究<sup>[9, 132~143]</sup>。

##### 4.4.1 冰川学

中国冰川学家利用在国外站工作时取得的冰芯资料研究了东南极洛多姆冰帽地区历史时期的气候变化过程, 氢氧同位素分析表明, 过去 5000 a 间在东南极地区有相对均匀的气候条件。对冰芯及钻孔表面雪样的微量元素分析则表明, 在过去大约 5000 a 来, Na, Mg, Al, Fe 等 14 种微量元素的含量并无明显的增高和降低, 这说明人类活动急剧增加所带来的环境污染还没有对南极地区造成明显的影响。对过去 150 a 以来冰芯氧同位素含量的细致分析表明, 在此期间, 东南极地区的夏季温度经历了由寒冷到温暖的变化。20 世纪 20 年代明显转暖以来, 夏季的温暖变化似乎出现了平均周期为 21~23 a 的准周期变化, 温暖化夏季达到高潮的持续时间大约为 5 a。对东南极地区浅表层雪和积雪的剖面研究及同位素分析, 重建了近 10 a 来的气候记录, 并提出在该地区的冷暖变化存在着 11 a 左右的变化周期<sup>[9, 132~136]</sup>。

通过对南极冰盖表层雪内的物质过程和现代气候及环境记录的研究, 定量地、有机地认识了南极冰盖表层雪内反映现代气候及环境记录物质的分布、沉积和演化过程, 建立了南极冰盖表层雪内的物质的现代过程模式, 探讨其分布、传输和来源的全球意义<sup>[137]</sup>。

近年来对南极冰川学实测资料和由雪坑、冰芯获得的气候代用资料的研究表明: 东南极地区冰盖物质的补充大于消融(正平衡), 冰盖是稳定的; 而在西南极地区冰盖物质的补充小于消融(负平衡), 冰盖是不稳定的。影响目前全球海平面上升的主要因素不是南极冰盖变化, 而是海水增温后的热膨胀效应和北极格陵兰冰盖及高山冰川的消融<sup>[138]</sup>。

通过对南极冰芯资料的分析和解读, 在发现“南极绕极波”信号、恢复南印度洋历史海平面气压、东

南极气候分界线的发现和过去 700 a 南极“穿极指数”的重建的方面有新的进展:

利用 1996 年中国南极考察期间在东南极冰盖 Princess Elizabeth 地区钻取的冰芯 (DT001), 对 1745~1996 年冰芯  $\delta^{18}O$  和海盐气溶胶离子变化进行了分析研究, 研究表明可以用主要化学离子的经验正交函数分析的第一特征向量 (EOF1) 代表海盐气溶胶传输强度, 是南印度洋准稳态低压带平均海面气压 (SLP) 的代用指标;  $\delta^{18}O$  则反映该低压带中海表气温 (SST) 的变化。冰芯近 20 a 的记录反映了 SST 和 SLP 的 4 次连续波列, 分别对应于 NCEP/NCAR 资料再现的 4 次“环南极波” (ACW), 且冰芯中 SST 和 SLP 代用指标间存在的 1~2 a 位相差也与 ACW 中 SST 和 SLP 间的位相差一致。NCEP/NCAR 再分析资料和 DT001 冰芯记录表明 1958~1980 年没有连续和显著的 ACW 信号。因此 ACW 极可能是 1980 年前后气候发生转折后新出现的气候波类型<sup>[139]</sup>。

南极 GB65 冰芯 252 a 雪冰化学经验正交函数 (EOF) 的第一特征向量 (EOF1) 反映了南印度洋海平面气压 (SLP) 的变化。  $\delta^{18}O$  则反映了 SST 的变化。由此重建南印度洋 252 a 历史海平面气压。 EOF1 与反映南极涡变化的穿极指数 (TPI) 之间具有高度相关, 并具有 22 a 周期, 证明南印度洋 SLP 变化主要受太阳 Hale 周期影响<sup>[140]</sup>。

Lambert 冰盆两侧冰芯记录的气温和积累率变化反映了过去 50 a 来截然相反的趋势, 东侧气温、积累率均呈上升趋势, 西侧均呈下降趋势, 位于冰盆东、西两侧的 Davis 站和 Mawson 站也记录了这一趋势。 Lambert 冰川流域是东南极最明显的气候分界线<sup>[141, 142]</sup>。

采用 Siple Dome (SD) 和 Law Dome (LD) 两支冰芯雪冰化学 EOF 分析的第一特征向量 (SD EOF1, LD EOF1) 构建了反映南极涡中心东、西向振荡的穿极指数 (SDLD TPI), 重建了过去 700 a 南极“穿极指数”, 把基于台站建立的 TPI 序列 (100 a) 和基于树木年轮建立的 TPI 序列 (250 a) 向前延长到 700 a。 TPI 是一个反映年代际气候变化较好的指数, SDLD TPI 的近代序列与台站建立的 TPI 以及树轮建立的 TPI 之间具有良好对应, 南极涡的东、西向振荡与太阳活动密切相关<sup>[143]</sup>。

##### 4.4.2 地球化学

在 1990 年前, 中国学者先后对东南极大陆罗斯

海南部地区,长城站和中山站地区收集了海相和湖相沉积物样品,进行了地球化学分析<sup>[9]</sup>。特别有意义的是中国学者首创用生物地球化学的方法,通过对沉积物中的有机物质、植物残体含量及其所含 Ca 离子等浓度的变化复原了距今近 4000 a 以来的相对温度变化及年平均降水量,并指出在该地区末次冰盖消退大约在距今 3500 a 以前<sup>[9,144,145]</sup>。

近年来,中国学者创新性地应用生物地球化学、沉积学和古生态学等方法,通过对企鹅粪土等湖泊沉积物中元素的聚类分析,系统研究了企鹅的种群数量变化与环境演变之间的相互关系,结合放射性定年,重建了近 3000 a 来企鹅数量的演变,揭示了企鹅数量与极地气温变化的相关性<sup>[146-148]</sup>,引起了国际学术界的重视。利用古环境研究的新材料——南极无冰区古海蚀龛沉积,讨论了法尔兹半岛全新世以来风化产物与地壳运动、气候演变的关系,其研究结果与湖泊沉积物、海洋沉积物等古环境记录载体的研究结果一致,证明古海蚀龛沉积是研究南极无冰区和冰缘地区古环境演化历史的一种新的地质载体。

#### 4.4.3 地理、地貌、地质

中国地理、地貌学者对东南极和西南极地区的自然环境和冰缘地貌等进行了广泛的研究,讨论了第三纪以来南极古地理与南极冰盖的变化。在第三纪以前漫长的地质时期,南极大陆不是在现在的位置,而是在热带和温带地区,南极冰盖的形成始于 26~29 百万年之前的渐新世。最近 3000 a 以来南极大陆边缘的冰川和冰盖的进退是明显的,东南极戴维斯地区的三道新冰碛反映了大陆冰盖前缘的 3 次进退,与 3000 a 以前、2000 a 以前及 15 世纪到 19 世纪中期的 3 次全球性降温相对应,其变化规律与全球性的规律是一致的。目前南极冰盖仍在退缩,但内陆地区的积雪量在增加,与全球气候变化有密切的关系<sup>[9,152]</sup>。

#### 4.5 高层大气物理研究

极地特殊的地理环境是研究各种高层大气物理的极好场所,目前中国学者已开展了关于极区电离层、极区磁层与电离层耦合、哨声活动及极光等项目的研究<sup>[9,153,154]</sup>。

目前,南极中山站已建设和完善了高空大气综合观测系统,开发了极光全天空图像分析系统等数据处理平台,实现了对南极地区空间环境的连续监测<sup>[10,155]</sup>。在此基础上开展了极隙区、极盖区动力

学过程研究,得到中山站上空极光发生率的统计分布,用地面观测证实了最近卫星探测发现的“15MLT”极光热点,发现了极光发生率在磁中午附近有一新的高峰,首次在南极中山站观测到正午极光现象,揭示了南极极隙区纬度的电离层漂移的主要特征;研究了极光亚暴、午后极光强度与太阳风、行星际磁场的关系;得到了极隙区纬度上地磁 Pc3、Pc5 脉动的发生率、能谱强度、极化等特性,特别是对中山-戴维斯的资料用互谱分析方法得到了地磁脉动的传播规律;通过对南北半球 15 个地磁台站在 7 个典型极光亚暴事件观测数据的对比分析,发现中山站地磁共轭位置主要游移在以 Longyearbyen 为中心的西 Svalbard 群岛附近;探讨了极区对流的起因,极区粒子沉降的加速机制。建立了考虑粒子沉降效应在内的极区电离层磁层耦合模型<sup>[156-161]</sup>。

利用 GPS 闪烁测量仪完成了在中国南极中山站进行电离层闪烁参数的连续观测。开展了极区电离层不均匀体对 GPS 信号影响的理论模拟工作。研究了利用 GPS 数据进行电离和中性大气联合分析的处理方法和技术。建立了考虑能量粒子沉降在内的极区电离层模型。对莫斯科、伊尔库茨克至南极长城站这一世界最长的电路的短波衰落特性进行统计分析,将其与有关的预测值进行比较,并建议对有关预测值进行修改。得到了太阳活动低年极隙区纬度电离层平均特性,发现在中山站的冬季和两分季电离层 F 层存在明显的磁中午异常现象;用电离层垂测手段首次获得了极隙区纬度等离子体对流模式,发现行星际磁场的 By 分量在影响极隙区纬度电离层漂移运动方面起着主导作用;在南极取得了灾变式太阳活动事件近地空间效应多手段观测的系统数据,填补了中国峰年联测极区数据的空白。通过对剧烈太阳活动事件期间极区多手段观测资料的联合分析,对太阳风-磁层-电离层耦合过程取得了一些新的认识<sup>[162-166]</sup>。

## 5 结 语

无论是国外的极地大气科学考察与研究,还是中国的极地大气科学考察与研究,从一开始都是在全球变化的框架内进行的。IGBP 从 20 世纪 80 年代就强调对地球进行系统研究,设置了 11 个核心计划和 14 个区域性计划,跨学科地进行地球大气圈、陆地圈、水圈、冰雪圈和生物圈自身变化规律及相互

作用的研究。在未来 10 a, 全球变化研究将进入一个全面认识地球系统科学的新阶段。IGBP 打破了原先按学科领域设计的核心计划界限, 重新设计 6 个研究计划, 重点研究地球系统中大气、海洋和陆地等 3 个圈层及其界面、地球系统分析模拟 (GAIM) 和过去全球变化 (PAGES)。在全球变化领域内, 国际地圈生物圈计划 (IGBP) 和国际全球环境变化在人类方面的计划 (IHDP)、世界气候研究计划 (WCRP) 及国际生物多样性计划 (DIVARITAS) 一起组成了地球系统科学联盟, 将碳循环、水资源和食物系统列为当前全球变化和有关全球可持续发展的 3 大关键问题<sup>[167~169]</sup>。

与此一致, 中国的极地大气科学研究将在“八五”和“九五”中国南极考察科学研究“南极与全球气候环境的相互作用和影响研究”及“南极大气和空间物理过程对全球变化的响应研究”的基础上, 继续开展与“世界气候研究计划”(WCRP)、“国际地圈-生物圈计划”(IGBP)和“南极在全球变化中的作用”(GLOCHANT)等国际计划相衔接的“南极地区地球环境监测与关键过程”和“北极海洋和海冰的快速变化与全球增暖”研究。继续在极地监测和探测环境变化, 特别是监测极地大气环境参数变化, 研究极地臭氧和二氧化碳等特征变化规律及其对生态和环境的影响。对极地地区的温室气体及其海-气交换、大气污染物的转化和远程传输等进行研究, 加深对有关全球变化的认识。研究极地气候及环境变化对全球变化影响的时空分布模型, 揭示极地各环境因子对全球变化耦合影响的气候过程; 研究南

北极近代气候变化规律及其对全球气候变化和区域气候变化的响应和反馈。从极地气候变化信息中发现和提取能用于中国旱涝、汛期降水、台风活动、东北低温冷害等重大气候灾害短期气候预测的强预测信号。揭示极地冰雪与大气相互作用的辐射平衡过程、能量平衡过程, 对极地地-气相互作用的物理过程和特征进行综合分析及参数化研究, 进一步认识南北极地区地-气相互作用特征差异对大气环流的影响。通过对南北极地区进行的多学科科学考察、综合分析和集成研究, 围绕极地海-冰-气环境变化和相互作用过程的科学问题, 进一步认识极地在全球变化中的作用, 对中国天气气候环境和国民经济可持续发展的影响, 针对国民经济迫切需要, 为社会可持续发展提供科学背景和依据, 为政府决策者提供参考依据。

目前, 中国在极地大气科学考察和研究、极地对全球变化的响应与反馈作用研究等方面取得的成果仅是初步的, 尚有待于今后作进一步研究。例如, 鉴于在南极和邻近地区近 50 a 来不同地区、不同时段、不同季节和不同测站的温度等气候变化特征有较大差异, 因而在利用 1957 年以前为数不多的测站资料重建整个南极地区温度变化序列、研究温度变化特征时应十分慎重, 而温度变化的区域性和多样性应予以足够的重视。在南、北极地区, 进一步加强国际合作, 继续监测包括近地面温度在内的大气要素的变化, 拓展大气科学研究领域, 积极获取代用资料, 仍是全球变化研究的重要内容之一<sup>[78]</sup>。

## 参考文献

- 1 IGBP. Towards global sustainability. IGBP Science Series, 2001, 4: 27~ 29
- 2 IPCC. Climate change 1995, The Science of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 572pp
- 3 IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 881pp
- 4 Petit R, Jouzel J, Raynaud D, et al. Climate and atmospheric history of the past 420000 years Vostok ice core. Antarctica. Nature, 1999, 399: 429~ 438
- 5 EPICA. Eight Glacial Cycles from an Antarctic Ice Core. Nature, 2004, 429: 623~ 628
- 6 日本国立极地研究所. 南极の科学 3 气象. 古今书院, 1988. 1~ 334
- 7 GARP. The physical basis of climate and climate modeling. GARP Publication Series, 1975, 16. WMO/ICSU
- 8 WMO. Antarctic Ozone Bulletin # 7/2003. (<http://www.wmo.ch/web/arep/o3>)
- 9 陆龙骅, 卞林根, 贾朋群等. 南极气象研究进展 (1981-1990). 见: 周秀骥主编. 南极与全球气候环境相互作用和影响研究进展. 北京: 气象出版社, 1996. 187~ 200
- 10 刘瑞源, 杨惠钱, 钱高林等. 南极中山站高空大气综合观测系统及其应用. 见: 陈立奇主编. 南极地区对全球变化的响应与反馈作用研究. 北京: 海洋出版社, 2004. 249~ 258
- 11 秦大河主编. 1990 年国际横穿南极考察队冰川学考察报告 (1989-1994). 北京: 科学出版社, 1995. 1~ 117
- 12 中国首次北极科学考察队编. 中国首次北极科学考察报告. 北京: 海洋出版社, 2000. 1~ 191

- 13 张占海主编. 中国第二次北极科学考察报告. 北京: 海洋出版社, 2004. 1~ 229
- 14 李宪之. 东亚寒潮侵袭的研究. 见: 中国近代科学论著丛刊, 气象学(1919-1949). 北京: 科学出版社, 1955. 35~ 118
- 15 李宪之. 台风的研究. 见: 中国近代科学论著丛刊, 气象学(1919-1949). 北京: 科学出版社, 1955. 119~ 145
- 16 卢鋈. 中国之寒潮. 见: 中国近代科学论著丛刊, 气象学(1919-1949). 北京: 科学出版社, 1955. 147~ 168
- 17 陶诗言. 十年来中国对东亚寒潮的研究. 气象学报, 1959, 30(3): 226~ 230
- 18 吕炯. 海冰与气候. 地理学报, 1954, 29: 83~ 94
- 19 李宪之. 台风生成的综合学说. 气象学报, 1956, 27(2): 87~ 100
- 20 Newton C W, et al. Meteorology of the Southern Hemisphere. Meteorological Monographs, 1972, 13(35): 1~ 330
- 21 国家海洋局海洋环境预报中心. 南极南大洋天气气候研究译文集. 北京: 海洋出版社, 1987. 1~ 202
- 22 符斌斌. 中国长江流域梅雨变动与南极冰雪状况的可能联系. 科学通报, 1981, 26: 484~ 486
- 23 张家诚. 极冰的冷源作用和季风. 气象, 1981, 7: 6~ 8
- 24 彭公炳, 司有元. 南极冰雪与气候的若干联系. 地理科学, 1983, 3(4): 303~ 310
- 25 徐希孺. 微波遥感测定南极洲雪累积率. 地理学报, 1984, 39(2): 194~ 205
- 26 国家南极考察委员会. 南极科学考察论文集(第四集): 大气科学. 北京: 海洋出版社, 1989. 1~ 164
- 27 国家南极考察委员会. 南极科学考察论文集(第五集): 冰川学研究. 北京: 海洋出版社, 1989. 1~ 255
- 28 Chinese Committee on Antarctic Research. Proceedings of the International Symposium of Antarctic Research. Beijing: China Ocean Press, 1989. 1~ 540
- 29 国家南极考察委员会. 中国第一届南大洋考察学术讨论会论文集, 南极科学考察论文集(六). 上海: 上海科学技术出版社, 1989. 1~ 444
- 30 中国科学院地理研究所编. 南极科学考察论文集(一): 南极维斯特福尔德丘陵地区晚第四纪地质和地貌研究. 北京: 科学出版社, 1985. 1~ 231
- 31 周秀骥, 陆龙骅主编. 南极与全球气候环境相互作用和影响的研究. 北京: 气象出版社, 1996. 1~ 402
- 32 国家海洋局极地考察办公室编. 中国南极考察科学研究成果与进展. 北京: 海洋出版社, 1998. 1~ 626
- 33 陈立奇主编. 南极地区对全球变化的响应与反馈作用研究. 北京: 海洋出版社, 2004. 1~ 611
- 34 陈立奇等编著. 北极海洋环境与海气相互作用研究. 北京: 海洋出版社, 2003. 1~ 339
- 35 程彦杰, 陆龙骅, 卞林根等. 东南极格罗夫山地区夏季的天气特征. 极地研究, 1999, 11(4): 292~ 300
- 36 程彦杰, 卞林根, 陆龙骅. 北冰洋浮冰区的气象要素特征. 极地研究, 2000, 12(4): 253~ 262.
- 37 陆龙骅, 卞林根, 程彦杰. 中国南极气象考察与全球变化研究. 地学前缘, 2002, 9(2): 255~ 262
- 38 陆龙骅, 卞林根, 张永萍. 南极长城站地区气象要素的中期振荡特征. 南极研究, 1989, 1(4): 12~ 20
- 39 陆龙骅, 周秀骥, 卞林根等. 1993 年南极臭氧洞期间普里兹湾地区的大气振荡. 科学通报, 1996, 41(7): 636~ 639
- 40 效存德, 秦大河, 卞林根等. 东南极 Lambert 冰盆-Amery 冰架区域雪面相对高程变化的精确监测. 中国科学(D 辑), 2004, 34(7): 675~ 685
- 41 陆龙骅, 卞林根, 贾朋群. 南极和邻近地区温度的时空变化特征. 中国科学(D 辑), 1997, 27(3): 84~ 288
- 42 周秀骥, 陆龙骅, 卞林根等. 南极地区温度、海冰、臭氧的变化特征. 自然科学进展, 1997, 7(4): 460~ 466
- 43 Lu Longhua, Bian Lin'gen. The characteristics of Antarctic climatic change. WMO/TD~ No. 1172. Proceedings of ISCC, Beijing, 2003. 251~ 254
- 44 陆龙骅, 宋正山等. 南极地区天气气候变化及其与全球气候变化关系的研究. 见: 国家海洋局极地考察办公室编. 中国南极考察科学研究成果与进展. 北京: 海洋出版社, 1998. 422~ 438
- 45 马丽娟, 陆龙骅, 卞林根. 南极海冰的时空变化特征. 极地研究, 2004, 16(1): 29~ 37
- 46 王小兰, 范钟秀, 彭公炳等. 北极海冰面积时空分布特征的统计学分析. 海洋学报, 1991, 13(4): 475~ 488
- 47 彭公炳, 李倩, 钱步东. 气候与冰雪覆盖. 北京: 气象出版社, 1992. 1~ 349
- 48 程彦杰, 卞林根, 陆龙骅. 南极海冰涛动与 ENSO 的关系. 应用气象学报, 2002, 13(6): 711~ 717
- 49 程彦杰, 陆龙骅, 卞林根等. 南极半岛地区气温与南极海冰涛动、ENSO 的联系. 极地研究, 2003, 15(2): 121~ 128
- 50 周丽, 徐祥德, 陈联寿等. 两极海冰与青藏陆面物理过程耦合特征. 极地研究, 1999, 11(4): 275~ 284
- 51 李国庆, 谷修函. 南极地区大气环流的流体物理实验. 气象学报, 1997, 55(2): 163~ 173
- 52 李国庆, 谷修函. 南极地区大气环流的流体物理实验(二). 中国科学(D 辑), 1997, 27(2): 187~ 192
- 53 陈隆勋, 缪群, 王子辉. 南极冰对大气环流和东亚季风影响的数值试验. 见: 周秀骥, 陆龙骅主编. 南极与全球气候环境相互作用和影响的研究. 北京: 气象出版社, 1996. 36~ 42
- 54 陈隆勋, 缪群. 南极冰盖和海洋对气候变化影响的数值试验. 见: 周秀骥, 陆龙骅主编. 南极与全球气候环境相互作用和影响的研究. 北京: 气象出版社, 1996. 51~ 58
- 55 宋正山, 纪立人, 杨辉等. 南半球的中期数值预报试验. 见: 周秀骥, 陆龙骅主编. 南极与全球气候环境相互作用和影响的研究. 北京: 气象出版社, 1996. 59~ 67
- 56 宋正山, 杨辉, 张道民. 南极大陆对中期过程的动力和热力作用. 见: 周秀骥, 陆龙骅主编. 南极与全球气候环境相互作用和影响的研究. 北



- 京:气象出版社,1996.76~86
- 57 杨辉,宋正山,张道民.季风区5月南北半球相互作用的数值预报试验.见:周秀骥,陆龙骅主编.南极与全球气候环境相互作用和影响的研究.北京:气象出版社,1996.87~96
- 58 张可苏.南半球环流的特征行星波.见:国家南极考察委员会编.南极科学考察论文集(第四集).北京:海洋出版社,1989.37~44
- 59 吴辉旋.海冰数值模拟.见:周秀骥主编.南极与全球气候环境相互作用和影响研究进展.北京:科学出版社,1995.86~114
- 60 Zhang Z. On modeling ice dynamics of semi-enclosed seasonally ice-covered seas: [PhD thesis]. Report Series in Geophysics, Univ. Helsinki, 2000. 43pp
- 61 Zhang Z, Lepparanta M. Modeling the influence of ice on sea level variation in the Baltic Sea. *Geophysica*, 1995, 31(2): 31~45
- 62 Zhang Z. Comparisons between observed and simulated ice motion in the Northern Baltic Sea. *Geophysica*, 2000, 36(1): 113~128
- 63 卞林根,陆龙骅,张永萍.南极温度的时空特征及其与中国夏季天气的关系. *南极研究*, 1989, 1(3): 8~17
- 64 卞林根,陆龙骅,贾朋群.南极海冰和极涡指数的时空特征及相互关系. *地理学报*, 1996, 51(1): 33~43
- 65 武炳义,黄荣辉.冬季北大西洋涛动极端异常与东亚冬季风. *大气科学*, 1999, 23(6): 641~651
- 66 武炳义,黄荣辉,高登义.冬季北极喀拉海、巴伦支海海冰变化对东亚冬季风的影响. *大气科学*, 1999, 23(3): 267~275
- 67 Thompson D W, Wallace J M. The arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys Res Lett*, 1998, 25: 1297~1300
- 68 Gong D Y, Wang S W. Definition of Antarctic oscillation index. *Geophys Res Lett*, 1999, 26(4): 459~462
- 69 Wu B-Y, Wang J. Impacts of winter Arctic Oscillation on Siberian High, the East Asian winter monsoon. *Adv Atmos Sci*, 2002, 9(2): 297~320
- 70 武炳义,黄荣辉,高登义.与北大西洋接壤的北极海冰与年际气候变化. *科学通报*, 2000, 45(18): 1993~1997
- 71 Wu B-Y, Wang J, Walsh J. Possible feedback of winter sea ice in the Greenland and the Barents Sea on the local atmosphere. *Mon Wea Rev*, 2004: (in press)
- 72 方之芳.北半球副热带高压与北极海冰的相互作用. *科学通报*, 1986, 4: 286~289
- 73 彭公炳,王宝贵.南极海冰对西北太平洋副热带高压的影响及其海洋大气环流背景. *科学通报*, 1989, 34(1): 56~58
- 74 卞林根.南极海冰的时空特征及其与西太平洋台风和副高的相关关系.见:国家南极考察委员会.南极科学考察论文集(第四集).北京:海洋出版社,1989.45~54
- 75 Wu B-Y, Wang J. Winter arctic oscillation, Siberian High and East Asian winter monsoon. *Geophys Res Lett*, 2003, 29(19): 1897
- 76 武炳义,黄荣辉,高登义.北极海冰的厚度和面积变化对大气环流影响的数值模拟研究. *气象学报*, 2001, 59(4): 414~428
- 77 Zhao Ping, Zhang X-D, Zhou Xiujie, et al. Sea-ice Extent Anomaly in the North Pacific and its impact on the East Asian summer monsoon Rainfall. *J Climate*, 2004, (in press)
- 78 陆龙骅,卞林根,程彦杰.南极大气科学考察与研究. *世界科技研究与发展*, 2002, 25(4): 49~56
- 79 卞林根,高登义等.南极地区辐射和大气边界层结构特征的观测研究.见:国家海洋局地考察办公室编.中国南极考察科学研究成果与进展.北京:海洋出版社,1998.497~510
- 80 殷宗昭.南极地区辐射平衡的气候特征.见:国家南极考察委员会.南极科学考察论文集(第四集).北京:海洋出版社,1989.84~92
- 81 卞林根,陆龙骅,贾朋群.南极拉斯曼丘陵辐射平衡分量的观测研究. *南极研究*, 1990, 3(4): 42~51
- 82 陆龙骅,卞林根,贾朋群.南极中山站极夜和极昼期间的辐射特征. *科学通报*, 1992, 37(15): 1388~1393
- 83 卞林根,陆龙骅,迟昌贵等.南极长城站和中山站辐射特征的研究. *应用气象学报*, 1998, 9(2): 160~168
- 84 卞林根,陆龙骅,贾朋群.南极中山站紫外辐射的观测研究. *科学通报*, 1996, 41(9): 805~807
- 85 陆龙骅,卞林根,迟昌贵等.75°N~70°S UV-B辐射经向变化特征的观测研究. *自然科学进展*, 2001, 11(8): 835~839
- 86 卞林根,陆龙骅,程彦杰等.南极冰雪与大气相互作用过程和辐射特征的观测研究.见:陈立奇主编.南极地区对全球变化的响应与反馈作用研究.北京:海洋出版社,2004.207~223
- 87 张善礼,李其德,朱翠莲等.南极大气外太阳辐射的能谱分布. *南极研究*, 1990, 2(3): 57~60
- 88 朱明远,吕华,徐汝梅等.南极生物群落系统分析和UV-B对的生态学效应研究.见:陈立奇主编.南极地区对全球变化的响应与反馈作用研究.北京:海洋出版社,2004.342~354
- 89 陆龙骅,卞林根,迟昌贵等.中国南极站气候特征与全球变化研究.见:陈立奇主编.南极地区对全球变化的响应与反馈作用研究.北京:海洋出版社,2004.243~248
- 90 周秀骥,卞林根,贾朋群等.南极长城站夏季热状况的初步分析. *科学通报*, 1989, 34(17): 1323~1325
- 91 曲绍厚,山内恭.南极瑞穗站上空动量和感热等湍流通量的观测研究. *南极研究*, 1989, 1(4): 1~11
- 92 卞林根,陆龙骅,贾朋群.1987~1988年夏季长城站地区的热力和动力特征. *南极研究*, 1990, 2(1): 73~81
- 93 卞林根,贾朋群,陆龙骅等.南极中山站1990年地表能量通量变化的观测研究. *中国科学(B辑)*, 1992, 11: 1224~1232
- 94 卞林根,陆龙骅,贾朋群.南极冰盖极昼期间近地面湍流特征的实验观测. *中国科学(D辑)*, 1997, 40(4): 432~438
- 95 周明煜,李诗明,吕乃平等.近南极洲海域夏季潜热及感热通量计算.见:周秀骥,陆龙骅主编.南极与全球气候环境相互作用和影响的研究

- 究. 北京: 气象出版社, 1996. 121~ 125
- 96 周明煜, 吕乃平, 李诗明等. 50°S 以南海域感热潜热通量的模式计算. 见: 周秀骥, 陆龙骅主编. 南极与全球气候环境相互作用和影响的研究. 北京: 气象出版社, 1996. 126~ 131
- 97 高登义, 郝永祺. 极地海冰气相互作用的观测和模拟研究进展. 见: 周秀骥主编. 南极与全球气候环境的相互作用和影响研究进展. 北京: 科学出版社, 1995. 157~ 166
- 98 张雅斌, 卞林根, 程彦杰等. 北冰洋浮冰和开阔海面上的能量平衡特征. 极地研究, 2000, 12(3): 191~ 202
- 99 卞林根, 陆龙骅, 高志球等. 北冰浮冰上的能量分量的估算. 自然科学进展, 2001, 11(5): 492~ 498
- 100 卞林根, 高志球, 陆龙骅等. 北冰洋夏季开阔洋面和浮冰近地层热通量参数的观测估算. 中国科学, 2003, 33(2): 139~ 147
- 101 曲绍厚, 胡非. 北冰洋海域昼期间海-冰-气间湍流通量交换特征. 自然科学进展, 2000, 10(9): 836~ 841
- 102 曲绍厚, 胡非, 李亚球等. 北冰洋及其邻近海域极昼期间大气边界层结构特征试验研究. 地球物理学报, 2001, 45(1): 6~ 16
- 103 刘宇. 珠峰和北极地区大气边界层观测研究[博士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院, 2003. 1~ 97
- 104 陆龙骅, 卞林根, 贾朋群. 南极中山站的近地面湍流特征参数. 南极研究, 1993, 5(1): 31~ 38
- 105 张永萍, 李兴生, 周秀骥等. 微倾斜地形对南极稳定层结大气地面层的影响. 中国科学(B辑), 1995, 25(11): 1201~ 1209
- 106 朱蓉, 徐大海, 卞林根等. 南极近地层大气热量逆梯度输送现象. 气象学报, 2000, 58(2): 214~ 222
- 107 李洪珍, 陈善敏. 1985 年夏季长城站冰、雪及雨水的化学组成. 见: 国家南极考察委员会编. 南极科学考察论文集(第四集). 北京: 海洋出版社, 1989. 107~ 112
- 108 李洪珍, 卞林根, 陈善敏等. 1985 年 4~ 11 月长城站降水的化学组成. 见: 国家南极考察委员会编. 南极科学考察论文集(第四集). 北京: 海洋出版社, 1989. 126~ 129
- 109 吕位秀, 高登义, 王明星等. 南极昭和基地背景气溶胶的化学成分. 见: 国家南极考察委员会. 南极科学考察论文集(第四集). 北京: 海洋出版社, 1989. 113~ 115
- 110 Gras J L, Adriaaneses A, Butler R, et al. 南极莫森站凝结核密度和大小的变化. 见: 国家南极考察委员会编. 南极科学考察论文集(第四集). 北京: 海洋出版社, 1989. 116~ 125
- 111 高登义, 川口贞男. 春季南极平流层爆发性增温与臭氧变化的关系. 见: 国家南极考察委员会. 南极科学考察论文集(第四集). 北京: 海洋出版社, 1989. 130~ 136
- 112 毛节泰. 南极长城站大气臭氧和 NO<sub>2</sub> 的观测研究. 气象, 1989, 15(12): 1~ 5
- 113 周秀骥, 陆龙骅等. 南极大气臭氧变化特征与机制的研究. 见: 国家海洋局极地考察办公室编. 中国南极考察科学研究成果与进展. 北京: 海洋出版社, 1998. 511~ 519
- 114 郑向东, 周秀骥, 陆龙骅等. 1993 年中山站南极“臭氧洞”的观测研究. 科学通报, 1995, 40(6): 533~ 535
- 115 郑向东, 陆龙骅, 周秀骥. 近六年中山站春季臭氧低值的观测结果分析. 极地研究, 1999, 11(4): 265~ 174
- 116 郭松, 周秀骥, 郑向东等. 南极中山站臭氧洞期间臭氧廓线的观测研究. 极地研究, 1997, 9(1): 78~ 82
- 117 郭松, 周秀骥, 陆龙骅等. 南极中山站 NO<sub>2</sub> 的观测及平流层 NO<sub>2</sub> 与 O<sub>3</sub> 的关系分析. 极地研究, 1997, 9(3): 163~ 168
- 118 陆龙骅, 卞林根, 贾朋群. 南极臭氧的短期气候变化特征. 应用气象学报, 1997, 8(4): 402~ 412
- 119 任传森, 李维亮, 周秀骥. 南极臭氧洞形成机理的模拟研究. 见: 周秀骥, 陆龙骅主编. 南极与全球气候环境相互作用和影响的研究. 北京: 气象出版社, 1996. 341~ 354
- 120 陆龙骅, 卞林根, 程彦杰等. 南北极考察航线地面臭氧的观测. 科学通报, 2001, 46(15): 1311~ 1316
- 121 陈立奇, 高众勇, 王伟强等. 南大洋海冰区 CO<sub>2</sub> 源汇分布及其海气通量的研究. 见: 陈立奇主编. 南极地区对全球变化的响应与反馈作用研究. 北京: 海洋出版社, 2004. 173~ 182
- 122 高众勇, 陈立奇, 杨绪林等. 普里兹湾夏季海-气 CO<sub>2</sub> 分布特征、碳通量及其主要调控因子研究. 见: 陈立奇主编. 南极地区对全球变化的响应与反馈作用研究. 北京: 海洋出版社, 2004. 183~ 188
- 123 王伟强, 杨绪林, 黄宣宝等. 北冰洋考察区海-气二氧化碳分布特征通量研究. 中国科学(D辑), 2003, 33(2): 119~ 126
- 124 陈立奇, 杨绪林, 黄江淮. 南极半岛海域气溶胶中硫、磷、氢的海气交换. 见: 国家南极考察委员会. 中国第一届南大洋考察学术讨论会论文专集, 南极科学考察论文集(六). 上海: 上海科学技术出版社, 1989. 126~ 132
- 125 詹玉芬. 南极半岛西北海域 S11 柱样体中硅藻的分布及其与古气候变迁的关系. 见: 国家南极考察委员会. 中国第一届南大洋考察学术讨论会论文专集. 南极科学考察论文集(六). 上海: 上海科学技术出版社, 1989. 322~ 328
- 126 陈立奇, 杨绪林, 黄江淮. 太平洋上空硫酸盐的分布和来源. 见: 国家南极考察委员会. 中国第一届南大洋考察学术讨论会论文专集, 南极科学考察论文集(六). 上海: 上海科学技术出版社, 1989. 433~ 437
- 127 马慈光, 李民, 张永萍等. 南极长城站大气气溶胶组成研究. 南极研究, 1990, 2(2): 36~ 43
- 128 朱光华, 赵俊琳, 李果等. 南极长城站地区 1987 年夏季大气气溶胶研究. 南极研究, 1990, 2(2): 44~ 50
- 129 孙俊英. 中国首次北极科学考察沿线气溶胶可溶性成分的分析. 冰川冻土, 2002, 24(6): 744~ 749
- 130 孙立广, 赵俊琳, 朱仁斌等. 南极法尔兹半岛 CH<sub>4</sub> 与 N<sub>2</sub>O 浓度和土壤通量监测. 见: 陈立奇主编. 南极地区对全球变化的响应与反馈作用研究. 北京: 海洋出版社, 2004. 309~ 325

- 131 孙立广, 朱仁斌, 尹雪斌等. 1999 年和 2000 年夏季南极菲尔德斯半岛 NO<sub>2</sub> 浓度对比. 极地研究, 2001, 13(2): 83~ 90
- 132 秦大河, 王文梯. 东南极洲 Wilkes Land 地区冰盖浅表层内的历史气候记录. 科学通报, 1989, 34(6): 659~ 664
- 133 姚檀栋, Petit J R, Lonius C. 南极冰盖边缘冰岩芯微粒分析及气候意义. 中国科学(B 辑), 1989, 11: 1205~ 1211
- 134 韩建康. 冰岩芯揭示的南极洲洛多姆冰帽顶部一个半世纪以来的夏季冷暖变化. 见: 国家南极考察委员会. 中国第一届南大洋学术讨论会论文集, 南极科学考察论文集(六). 上海: 上海科学技术出版社, 1989. 62~ 68
- 135 任贾文. 南极长城站附近地区冰川的温度状况. 南极研究, 1990, 2(2): 22~ 27
- 136 张文敬, 山内恭. 南极瑞穗高原 1987~ 1988 年度表面物质平衡及其变化. 南极研究, 1990, 2(3): 1~ 10
- 137 秦大河. 南极冰盖表层雪内的物质过程和现代气候及环境记录. 北京: 科学出版社, 1995. 1~ 202
- 138 秦大河, 任贾文主编. 南极冰川学. 北京: 科学出版社, 2000. 1~ 239
- 139 效存德, 程彦杰, 任贾文等. 冰芯记录的南印度洋南极绕极波近期信号. 科学通报, 2004(印刷中)
- 140 Xiao Cunde, Paul Mayewski, Qin Dahan, et al. Sea level pressure change of the Southern Indian Ocean inferred from glaciochemical records in Princess Elizabeth Land, Antarctica. J Geophys Res (Atmosphere), 2004, 109 (in press)
- 141 秦大河, 张明军, 李忠勤等. 东南极冰盖伊丽莎白公主地冰芯气候环境记录研究. 见: 陈立奇主编. 南极地区对全球变化的响应与反馈作用研究. 北京: 海洋出版社, 2004. 373~ 392
- 142 Xiao Cunde, Allison Ian, Ren Jiawen, et al. Meteorological and glaciological evidences for different climatic variations on the eastern and western sides of Lambert Glacier basin, Antarctica. Annals of Glaciology, 2004, 29 (in press)
- 143 Xiao Cunde, Karl Kreutz, Paul Mayewski, et al. A 700 year Trans-polar Index as reconstructed by Antarctic ice core proxy of sea level pressure. (in review)
- 144 赵俊琳. 南极乔治王岛菲尔德斯半岛地区环境演化特征. 科学通报, 1989, 34(16): 1240~ 1242
- 145 赵俊琳. 南极长城站地区现代环境地球化学特征与自然环境演化. 北京: 科学出版社, 1991. 1~ 178
- 146 Sun L G, Xie Z Q, Zhao J L. Palaeoecology-A 3,000-year record of penguin populations. Nature, 2000, 407 (6806): 858~ 858
- 147 孙立广, 谢周清, 赵俊琳. 南极阿德雷德湖沉积: 企鹅粪土层识别. 极地研究, 2000, 12(2): 105~ 112
- 148 孙立广, 赵俊琳, 谢周清. 南极湖泊沉积的企鹅数量演变记录. 见: 陈立奇主编. 南极地区对全球变化的响应与反馈作用研究. 北京: 海洋出版社, 2004. 291~ 308
- 149 孙立广, 刘晓东, 尹雪斌等. 南极无冰区古海蚀龛沉积—古环境研究的新材料. 极地研究, 2001, 13(4): 245~ 252
- 150 孙立广, 刘晓东, 谢周清等. 南极菲尔德斯半岛古海蚀龛沉积的古环境记录. 极地研究, 2002, 14(3): 163~ 173
- 151 孙立广, 赵俊琳, 刘晓东等. 法尔兹半岛全新世以来风化产物与地壳运动、气候演变的关系—以古海蚀龛沉积研究为例. 见: 陈立奇主编. 南极地区对全球变化的响应与反馈作用研究. 北京: 海洋出版社, 2004. 326~ 341
- 152 张青松. 南极维纳斯福德丘陵与菲尔德斯半岛冰缘地貌比较研究. 南极研究, 1990, 2(1): 1~ 9
- 153 奚迪龙. 极光吸收的日变化与季节变化. 南极研究, 1988, 1(2): 54~ 58
- 154 董爱英, 徐文耀. 南极长城站哨声活动特征. 南极研究, 1990, 2(1): 82~ 88
- 155 杨惠根, 刘瑞源, 黄德宏等. 极光全天空视频图象分析系统. 地球物理学报, 1997, 40(5): 606~ 615
- 156 Yang Huigen, Liu Ruiyuan, Sato N. Intensity correction in all-sky auroral image projection transform. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(8): 700~ 703
- 157 刘瑞源, 杨惠根, 胡红桥等. 南极高纬度、极盖区动力学观测和模型研究. 见: 陈立奇主编. 南极地区对全球变化的响应与反馈作用研究. 北京: 海洋出版社, 2004. 259~ 275
- 158 洪明华, 胡红桥, 刘瑞源等. 亚暴期间高纬黄昏-子夜扇区极光弧增亮与衰减及其与 IMF 的关系. 地球物理学报, 2001, 44(1): 12~ 23
- 159 洪明华, 王宪民, Chua D 等. 极光亚暴对太阳风压强激波的响应. 科学通报, 2001, 46(13): 1113~ 1117
- 160 Yang H, Liu Ruiyuan, Sato Natsuo. Study on Pixel Intensity Correction in Projection Transformation of an All-sky Auroral Image. Proceeding of the NIPR Symposium on Upper Atmosphere Physics, 1998, 11: 55~ 60
- 161 Yang H, Sato N, Makita K, et al. Synoptic observations of auroras along the postnoon oval: A survey with all-sky TV observations at Zhongshan, Antarctica. J Atmosph Solar-Terrestrial Physics, 2000, 62: 787~ 797
- 162 甄卫民, 曹冲, 刘瑞源等. 极区扰动电离层的观测与模式研究. 见: 陈立奇主编. 南极地区对全球变化的响应与反馈作用研究. 北京: 海洋出版社, 2004. 276~ 290
- 163 贺龙松, 刘瑞源, 刘顺林等. 太阳活动低年南极中山站电离层 F 层的平均特性. 地球物理学报, 2000, 43(3): 289~ 296
- 164 贺龙松, Nishino M, 张北辰等. X 射线耀斑引起的日侧电离层吸收事件的研究. 科学通报, 2000, 45(17): 1822~ 1825
- 165 刘瑞源, 钱松林, 贺龙松. 南极中山站数字式测高仪的初步观测结果. 地球物理学进展, 1997, 12(4): 109~ 118
- 166 刘瑞源, 朱源泉. 南极中山站电离层漂移特性及其对行星际磁场的响应. 地球物理学报, 1999, 42(1): 30~ 40
- 167 刘东生. 全球变化和可持续发展科学. 地学前缘, 2002, 9(1): 1~ 9
- 168 林海. 中国全球变化研究的回顾与展望. 地学前缘, 2002, 9(1): 19~ 24
- 169 陈宜瑜等. 全球变化研究与展望. 地学前缘, 2002, 9(1): 11~ 18

## RECENT TWO DECADES PROGRESSES IN STUDY ON ATMOSPHERIC SCIENCES OF THE POLAR REGIONS

Lu Longhua   Bian Lin'gen   Xiao Cunde   Wu Bingyi   Lu Changgui

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing, 100081*)

### Abstract

The Arctic, Antarctic and Tibetan Plateau regions are the most sensitive areas in the global climate change, and are also the key regions for the global change research. The field investigations in the Antarctic and Arctic regions started in China in the early 1980s and 1990s, respectively. Among the multi-discipline studies, atmospheric science investigations were the important aspects. Up to now, twenty national Antarctic research expeditions and three Arctic expeditions were carried out. Meteorological observations have been continuing at the two year-round stations (Great Wall and Zhongshan) in the Antarctica, and at one station (Yellow River) in the Arctic. These observations include routine ground meteorology, atmospheric ozone by the Brewer, near-surface atmospheric physics, upper-atmospheric physics, atmospheric chemistry and glacio-chemistry. Lots of data were collected and they are valuable for the research with respect of global change. It is concluded that air temperature, ozone and sea ice displayed various spatial and temporal changes. Antarctic Peninsular shows an obvious warming while no obvious trend happened over the East Antarctica, and even a slight cooling for the last decade. Meteorological observations at Great Wall Station and Zhongshan Station verified these trends. Based on EOF analysis of data on Antarctic sea ice concentration (SIC) for the period from 1968 to 1997, it was found two key regions of SIC change displaying a seesaw-form variations. One located in the outer belt of the Ross Sea and the other in Billingshuse Sea close to the Antarctic Peninsula. Sea ice changes, especially over the two key ocean areas, links to the Antarctic Oscillation. Observations of boundary layer parameters for the different underlying surfaces (lands, snow cover, sea ice, ocean surface and vegetation), and these parameters were used for the study of ocean-ice-atmosphere interactions.

Impacts of polar atmospheric circulation on the climate and weather patterns in East Asia and China were investigated. Using paleoclimate proxy such as ice core, lake sediment and geological debris, historical sea level pressure variability in the Southern Indian Ocean was reconstructed, series of Trans-polar Index was extended, and the historical penguin population for the last two millenniums was recovered. Observations of ozone, atmospheric chemistry, aurora and ionosphere at three year-round stations, as well as along vessel voyage routes, were fulfilled and valuable data were obtained. Strengthening of the international cooperation in polar atmospheric sciences studies including ground monitoring, upper atmospheric physics/chemistry observation and proxy data retrieval will be the essential strategy in improving Chinese progresses at these aspects.

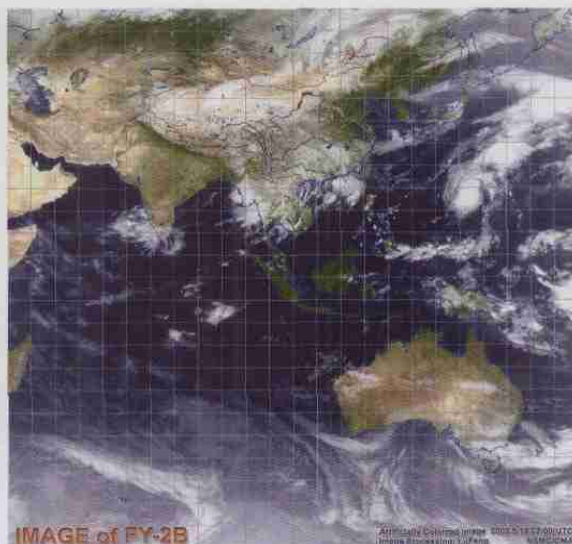
**Key words:** Arctic, Antarctica, Atmospheric sciences, Global change, Climate system, Field investigation.

## 方宗义等：中国气象卫星和卫星气象研究的回顾和发展



图1 FY-1C卫星获取的北半球可见光图像  
Fig.1 Visibl image of FY-1C

图2 FY-2B卫星获取的多通道合成图像  
Fig.2 FY-2B multi-channel synthetic image



## 陆龙骅等：近20年来中国极地大气科学研究进展

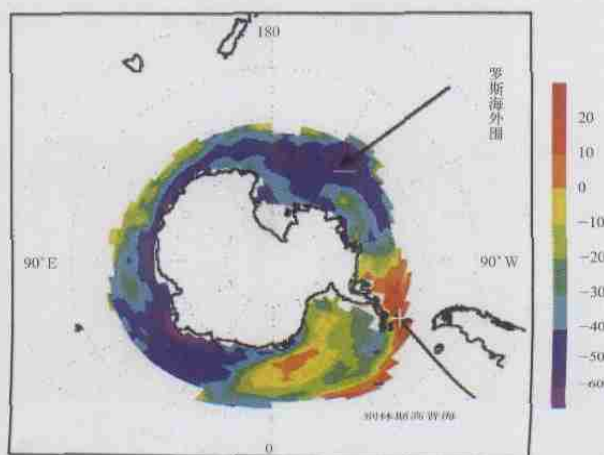


图2 南极海冰涛动(南极海冰密集度EOF第一特征向量)  
Fig.2 The Antarctic sea ice oscillation(first component of EOF)