国际冰冻圈研究动态和我国冰冻圈研究的现状与展望*

秦大河[1)2)] 效存德[2)3)] 丁永建[2)] 姚檀栋[2)4)] 卞林根[3)]
任贾文[2)] 王宁练[2)] 刘时银[2)] 赵 林[2)]

[1)] (中国气象局,北京 10081) [2)] (中国科学院冰冻圈与环境联合重点实验室,兰州 730000)
[3)] (中国气象科学研究院,北京 100081) [4)] (中国科学院青藏高原研究所,北京 100085)

摘 要

介绍了世界气候研究计划(WCRP)/气候与冰冻圈(CliC)计划所代表的国际冰冻圈研究基本特点与未来趋势;分析了我国冰冻圈独特的区域特点,阐明我国冰冻圈是维系干旱区绿洲经济发展和确保寒区生态系统稳定的重要水源保障,其气候效应、环境效应、资源效应和生态效应正日趋显著并广泛地影响到西部生态与环境安全和水资源持续利用,因而不仅具有科学上的重要性,而且具有国家战略需求上的紧迫性。提出未来我国冰冻圈研究应重点加强冰冻圈过程研究、记录研究、冰冻圈与气候模拟、冰冻圈与水资源以及冰冻圈变化的影响、适应与对策综合评估等 5 个方面的工作,逐步完善并形成我国冰冻圈科学体系。

关键词: 冰冻圈; 中国西部; 水资源; 环境脆弱性; 可持续发展

引 言

冰冻圈是指地球表面水以固态形式存在的部分,包括所有种类的冰、雪和冻结土,如冰川(包括山地冰川、冰帽、极地冰盖、冰架等)、积雪、冻土(多年冻土和季节冻土)、海冰、河冰、湖冰等[1]。研究冰冻圈各组成部分的各种特性、生消过程、演化机理、古环境记录、与其他圈层相互作用以及对人类社会的影响等均属于冰冻圈科学的范畴。冰冻圈由于对气候的高度敏感性和重要的反馈作用而与大气圈、水圈、岩石圈(陆地表层)、生物圈一起被认为是影响气候系统的五大圈层。在全球变暖导致冰冻圈加速萎缩的现实背景下,国际上冰冻圈的研究业已受到前所未有的重视,成为气候系统研究中最活跃的领域之一,也是当前全球变化和可持续发展研究领域关注的热点。

1 国际冰冻圈研究动态

过去的半个世纪,国际冰冻圈研究在如下领域获得了较大进展:大尺度冰川(盖)、积雪、海冰、冻土变化的监测与归因;雪冰下垫面与大气相互作用模拟;冰川/盖与海平面变化的测算与模拟;环北极地区冻土/积雪水文过程与北极系统变化;南北极海冰与气候变化的诊断与模拟;全球变暖现实条件和未来情景下的冰川动力学(包括西南极冰盖和格陵兰冰盖的稳定性)及其影响评估;冰川快速崩解(融化)与大洋传输带停滞以及气候突变的关系、长序列江/河/湖冰变化及其对气候变化的响应、冰芯及其他寒区介质中的气候与环境记录等。

21 世纪初启动了世界气候研究计划(WCRP)新的核心计划——气候与冰冻圈计划(CliC, Climate and Cryosphere),CliC 计划的启动是冰冻圈研究成为国际热点的标志[2]。CliC 确立了国际冰冻圈研究的四大领域:陆地冰冻圈与寒区水文气象、冰川(盖、帽)与海平面变化、海洋冰冻圈与高纬海洋/大气相互作用关系、冰冻圈与全球气候变化的联系。

1.1 陆地冰冻圈

陆地冰冻圈(包括积雪、湖冰、河冰、冰川/盖,季节冻土,多年冻土)在气候系统的不同时间尺度上(日、季、年际、十年际、百年际)均产生重要作用。这些作用主要通过影响地球表面能水循环过程,比如影响辐射平衡过程(如雪冰反照率反馈机制),热调整,水汽,陆地海洋气体和其他物质通量交换,雪冰作为水循环过程中水的储备形式,影响径流(主要在

* 科技部国际合作重点项目(2005DFA20930)资助。
2006-11-30 收到。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

冻土地带)等。其次,以天然气水合物和冻结态有机物形式存在的温室气体(CO_2, CH_4)的变化影响到碳循环,因而也影响到气候系统。

陆地冰冻圈对理解、预测气候系统至关重要,尤其对中、高纬度地区以及高海拔地区。需对冰冻圈关键过程在空间上高覆盖度、时间上高分辨率地进行持续监测。雪冰储量和范围变化会引起能水循环的巨大变化,进而产生一系列经济社会后果。所以,迫切需要就陆地冰冻圈对地面和大气的影响与反馈机制进行研究以提高气候预测能力。

陆地冰冻圈在气候模式中的影响因子包括陆地雪盖、冻土(包括永久冻土)、湖(河)冰以及冰川。陆地冰冻圈关键问题主要包括:十年至百年尺度上陆地冰冻圈变化的形式、幅度及其变率,以及与之相关的水循环的变化。

1.2 海洋冰冻圈

海冰约占全球海洋表面的 10 %,极大地影响着海洋与大气之间的物质、能量过程,主要改变表面辐射平衡,以及海洋/大气间动能、热能和物质交换。近海冰大气层温度大大低于海冰下伏海水温度。

海冰冻结会析出卤水使得海洋表面混合层加厚,反之,海冰融化产生含盐度较小的水体使混合层进一步分层。通过这些过程,海冰在全球热量平衡、全球热盐环流等方面起着重要作用。气候变化导致的海冰退缩产生全球尺度的气候影响,其反馈过程进一步加大气候变化。

全球气候模拟预测 2050—2060 年间北冰洋可能产生无冰季节。应在良好的冰参数化基础上进一步模拟、论证这种可能性。对北冰洋历史时期和现代海冰范围、厚度、输送速率以及海冰下伏海水特性、陆地淡水输入详细研究和估算,对研究海冰/气候相互作用关系十分重要。

要预测未来十年至百年尺度极地海冰变化,要进一步提高海/冰/气相互作用的理论研究并进行持续不断的观测。尤其对短时间尺度(季节、年、年代际)海冰变化预测在观测的基础上必须达到全面和准确。海洋冰冻圈模拟主要考虑海冰,但冰山和冰架也应考虑。

海洋冰冻圈关键问题主要是:海冰变化规律,极地海冰物质平衡对气候变化的响应及其变率。

1.3 冰冻圈与全球海平面变化

过去 100 年间海平面上升了 10～25 cm,其中海洋热膨胀引起 2～7 cm 的上升量,其余主要归因于陆地冰的融化。对全球海平面变化的诸因子中最大的不确定因子是南北极冰盖[3]。山地冰川目前多数处于退缩状态,因此也对海平面上升起很大作用。因此要研究当前海平面并预测未来,对冰盖/冰川(包括冰架)物质平衡观测研究十分重要。

冰冻圈与全球海平面变化关键问题是:冰川、冰帽和冰盖对十年至百年尺度全球海平面的影响。

1.4 冰冻圈与大气环流、海洋环流

冰冻圈变化引起大气环流的变化,因为它可以改变被冰雪覆盖的地球表面特性,改变了大气边界层以及大气云和辐射场。积雪和冰的覆盖范围的变化改变反照率,进而影响表面加热,提供了气候变化初期的正反馈。但是,云和辐射场由此会产生复杂变化,最终导致大气环流的改变。

海冰、冰川和极地水文循环对海表浮流通量产生影响,因此控制垂直交换,进而影响热盐环流(THC),THC 对气候突变和长期气候变化均有重要作用。

因此,对大气环流和海洋环流而言,对冰冻圈的过程研究、监测、古气候研究以及模式研究均不可或缺。冰冻圈与大气环流、海洋环流关系方面的关键问题就是要回答冰冻圈对大气环流和洋流产生何种影响。

1.5 冰芯及其他寒区介质中的气候环境记录研究

雪冰中气候环境记录具有信息量大(如各种大气环境信息,甚至包括宇宙射线、外太空物质的某些信息都可检测到)、保真度好(由于远离人类活动区且在低温条件下,各种生物、化学等后期扰动非常微弱)、分辨率高(一般在千年时间尺度上分辨率为年,在几十年至上百年时间尺度上可详细研究季节变化)、时间尺度范围大(可从几十年到几百年、几千年、上万年、数十万年、甚至上百万年)等特点,因此,冰芯记录是研究过去全球变化的主要手段之一,已经取得的科学成果革新了一系列有关地球环境演变规律的传统认识[4]。这些冰芯包括格陵兰和南极的深孔冰芯以及中低纬地区高山冰川钻取的浅冰芯。正在进行中的国际横穿南极科学考察计划(I-TASE)[5]和国际冰芯研究伙伴计划(IPICS)寻求更精细化和更大范围冰芯记录的提取。除冰芯之外,寒区其他介质如冻土温度记忆、泥炭、树木年轮、地下冰等都被使用,不同程度地反映了过去气候变化。

将冰冻圈视为一个整体,通过多学科交叉、新技术应用、重大计划推动,开展全球尺度的系统性、集

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

成性研究已成为国际趋势。国际科学联盟和世界气象组织联合发起的国际极地年计划(IPY2007—2008),强调通过国际合作、多学科交叉,在极地地区建立完善的观测体系的基础上,增强对极地与全球关系的认知。全球陆地冰空间观测计划(GLIMS)则通过遥感技术对全球冰川变化进行动态监测,评估其影响;国际横穿南极科学考察计划(ITASE)和国际冰芯研究伙伴计划(IPICS)则正在计划更精细化和更大范围的冰芯记录研究。上述计划均突出了研究的区域甚至全球尺度、国际间多学科联合攻关、新的观测与模拟技术的推广应用。

2　我国冰冻圈特点、科学意义与国家需求

我国是中、低纬度地区冰冻圈最发育的国家,冰川面积达 59425 km^2,占全球中、低纬度冰川面积的 50 %以上;多年冻土区面积约 220 $\times10^4$ km^2;稳定积雪区(积雪日数超过 60 d)面积约 420 $\times10^4$ km^2。冰雪和冻土的广泛发育,对我国乃至亚洲众多大江大河都有重要影响。

冰川是我国极其重要的固体水资源,冰储量约为 5600 km^3,折合水量约为 50000 $\times10^8$ m^3,相当于 5 条长江年径流量以固态形式储存于西部高山。通过冰川不断的补给和消融,调节着西部的江河径流,每年平均冰川融水量约为 600 $\times10^8$ m^3。实际上正是由于众多冰川的存在,才使得我国深居内陆腹地的干旱区形成了许多人类赖以生存的绿洲,也使得我国干旱区有别于世界上其他地带性干旱区。这种冰川-绿洲景观及其相关的水文和生态系统稳定和持续存在的核心是冰川,没有冰川就没有绿洲,也就没有在那里千百年来生息的人民。受全球变暖的影响,冰川萎缩成为普遍趋势,预估未来 50 年中国冰川面积将进一步减少 30 %左右。冰川变化的气候效应、资源效应、环境效应和生态效应对西部干旱区可持续发展影响巨大,国家高度关注的诸多西部生态建设与水源保护重大工程(如"三江源"生态与水源保护工程、塔里木河综合治理工程等)均与冰川息息相关。

冻土对我国寒区水文、生态和气候有着重要影响。据估算,近几十年青藏高原多年冻土由于退化每年释放的水量达到 50 $\times10^8$～110 $\times10^8$ m^3,加上冻土每年冻融过程参与到水循环中的水量,其对水文、生态和气候的影响十分显著。正是由于青藏高原多年冻土的存在,才有了广泛发育的沼泽湿地和寒区生态系统。冻土及其水分交换是维持寒区生态系统稳定的关键因素,没有冻土就没有高原特殊的生态系统。长江黄河源区近几十年来生态退化和河流、湖泊、沼泽、湿地等水文环境的显著变化就与土壤冻融循环变化及冻土退化密切相关。季节冻土是冰冻圈各因子中面积最大、季节及年际变化最频繁的因子[6]。我国季节冻土区面积 470 $\times10^4$ km^2,土壤冻融循环的时空变化对大尺度地-气水热交换及大气环流都具有很大的影响。因此,多年冻土区土壤冻融循环及季节冻土时空变化对地-气水热交换、地表水文、生态系统、区域气候、碳循环等有着广泛影响。

积雪作为冰冻圈中最为敏感的要素,其变化对我国经济建设和人们的日常生活影响更为广泛和直接。我国西部冬季积雪对春季径流有重要影响,是干旱区春旱的重要"调节器"。青藏高原冬春季积雪的多寡影响我国气候的波动,与我国长江洪水与伏旱密切相关,今年受到全国关注的川、渝大旱就与青藏高原冬春积雪存在着气候上的内在关联。

我国是受冰冻圈灾害影响最为严重的国家之一。冰湖溃决、冰川洪水、雪灾、雪崩、风吹雪等灾害影响着交通运输、通讯、农牧业、旅游等行业的发展以及人民生命财产的安全。受气候变化的影响,各类冰雪灾害发生的频率、强度、范围等均发生很大改变。

总之,我国以冰川、冻土和积雪为代表的冰冻圈分布面积广,影响区域大,其变化直接影响着干旱区绿洲存亡、湖泊消涨、寒区生态演替、区域气候变化、山区灾害等。冰冻圈对我国西部水文、生态的影响具有牵一发而动全身的作用。鉴于冰冻圈过程及其影响的复杂性,需要从全局出发,深入、综合、集成地开展系统研究,为国家西部发展提供科学积累和支撑、为满足国家需求提供科学依据,是十分必要和紧迫的。

3　我国冰冻圈研究现状

我国冰冻圈研究始于 20 世纪 50 年代末,在中国科学院、中国气象局、国家海洋局及高校有关单位的共同努力下,在冰川、积雪、冻土、极地冰盖、冰缘地貌和区域气候模式等方面取得了很大进展。

3.1　中国冰川编目

20 世纪 70 年代,在国际水文学会(IAHS)、联合国环境署(UNEP)和联合国教科文组织(UNESCO)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

推动下,由国际雪冰委员会(ICSI)主持开展了全球范围的冰川编目工作。这是一项十分浩瀚、基础性很强的系统工程。我国科学家历时 23 年,于 2002 年全面完成了中国的冰川编目,是 4 个冰川发育大国中唯一按国际冰川编目规范完成冰川目录编制的国家[7]。通过对 342000 张航空像片、200 余幅卫星像片、2000 余幅大比例尺地形图的判读和数据处理,13 次大规模野外调查,查明中国西部共有冰川 46377 条,总面积 59425 km^2,冰储量 5600 km^3;出版冰川目录 12 卷 23 册,其中每条冰川 34 项指标;建立了中国冰川目录信息系统;研制了冰川测厚雷达,并在近 30 条冰川上进行了试验和应用,建立的冰川厚度估算公式在周边国家冰川资源调查中广泛应用;利用该成果,两次参与中国西部水资源评估,得出中国冰川年融水量 616×10^8 m^3。

通过冰川编目,首次查明了我国各流域、山脉、省(区)的冰川准确数量;发现了面积大于 100 km^2 的 33 条巨大冰川,其总面积和冰储量分别为 6167.38 km^2 和 1475.27 km^3,分别占中国冰川相应总量的 10.4 % 和 26.3 %;对中国冰川水资源总量及其各流域的数量分布有了全新的认识;《中国冰川目录》及其相应成果所揭示的冰川变化的气候信息和冰川变化的地域规律性,是预测未来气候变化下冰川变化的科学依据;对小冰期以来的冰川变化及其对气候响应的区域差异性有了更加系统的认识,对西部山区的冰川灾害有了较系统的认识。上述成果进一步完善了我国区域冰川学研究内容。国际组织、国内外科学研究机构和生产部门以该成果为基本资料,为水资源评估与规划、水利设施和水利工程的设计,以及冰川旅游资源开发等方面提供科学依据,取得了显著的社会效益和 50 亿元以上的经济效益。

3.2 青藏高原高分辨率冰芯记录研究

通过在青藏高原及帕米尔高原、天山中部、阿尔泰山、祁连山、横断山等地区的多年监测研究,建立了降水稳定同位素与气温的定量关系;阐明了不同地区不同水汽来源对降水中稳定同位素比率的影响,首次在青藏高原确立了"大气水线"[8]。这不仅对研究水循环过程有重要意义,同时也为冰芯记录的解释奠定了定量基础。

在青藏高原北部、南部和中部以及帕米尔高原的冰川上,通过钻取冰芯并对冰芯样品进行多种内容测试分析(稳定同位素、雪冰化学、痕量重金属、生物有机酸、放射性物质浓度总量、微粒浓度等),高分辨率地揭示了这些地区末次间冰期以来的气候环境变化过程及重大环境事件[9-14]:10 多万年时间尺度上 5 次大的气候事件与南极、北极冰芯记录具有相似特征,但青藏高原冰芯记录的气候变化频率和变幅比较大,说明青藏高原对气候变化的敏感性更强;高分辨率揭示了冰芯记录与印度季风夏季降水变化的关系,建立了长序列季风降水替代指标;揭示冰芯记录中的气候信息与 ENSO 事件的关系;首次建立了中低纬度近 2000 年来大气甲烷浓度变化序列;开拓了冰川极端低温环境下的微生物研究;同时在人类活动对于环境的影响等方面,也均取得显著进展。

3.3 南极冰川学研究

在南极冰盖中山站—A 冰穹 1200 km^2 断面考察的基础上,通过冰芯、雪坑等样品的实验分析,恢复了数百年来以年为分辨率的气候环境变化记录;对海岸和内陆气溶胶样品的对比研究,为雪冰气候环境记录的解释提供了依据;分析相邻区域研究结果并结合大气和海洋环流,明确了气候变化区域差异及其原因;综合现场冰盖表面积累速率、冰盖厚度、运动速度等观测资料,应用冰川动力学原理,计算并评估了区域冰盖物质平衡及其对海平面变化的影响[15-17]。

通过冰芯记录与其他资料的综合研究,揭示了南半球高纬地区大气环流某些重要特征:研究表明南极涡受太阳磁周期驱动而在东、西两半球间呈规律性振荡,认为澳大利亚南部年代际干旱主要因南极涡偏离东半球一侧所致,据此预测南澳当前持续干旱即将结束而将进入一个相对湿润期,成果被授予"WMO 青年科学家研究奖";从高分辨率冰芯提取代用指标研究"南极绕极波(ACW)",确认南大洋不存在持续 ACW,对因器测资料短而难于判断 ACW 是短期还是长期气候波这一难题给出明确答案[18-20]。

3.4 中国冰冻圈演变综合评估

从自然、人文和社会等多学科入手,就中国冰冻圈特征、演变、未来变化趋势及环境演化对中国西部发展的影响和对策等问题进行综合分析与评估,凝练出具有前瞻性和战略性的咨询建议,为国家西部大开发战略决策提供科学依据。其成果包括:主持完成了中国气候与环境演变和中国西部环境演变评估工作,评估了西部冰冻圈演变历史和现状,预测了中国冰冻圈的发展趋势,提出了适应与减缓措施。提出了西北气候可能正由暖干向暖湿转型的科学推断。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

预测未来 50 年我国冰川面积将减少 27.2 %,3 种主要类型冰川平衡线高度将分别上升 23 m,168 m 和 138 m。冻土温度将显著升高,退化加速:青藏高原 80 %～90 %的岛状冻土将退化,季节融化深度增加;冻土下界抬升 150～250 m,亚稳定和稳定冻土温度将升高 0.5～0.7 ℃。积雪年际变率显著增大,春季积雪提前消失,春旱加剧,融雪对河川径流的调节作用大大减小。雪冰灾害范围和发生频率增加,引起的经济损失成倍增长。未来 50 年,气候变化以及冰冻圈释放水分的增加对西部绿洲有不同程度影响,但不会带来灾难性后果。

预估了气候变化、冰冻圈和其他圈层变化以及人类活动情景下,对西部农牧林业、水资源、能源、交通、人体健康、生态建设和产业结构的可能影响,提出了适应与减缓措施,对我国西部生态、环境与经济社会诸多方面具有重大的现实意义和深远的战略意义。这方面的内容发表于《中国气候与环境演变》(1 套 2 册)、《中国西部环境演变评估》(1 套 4 册)和《中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估》等论著中。

3.5　中国天山公路风吹雪研究

我国严重风吹雪灾害主要分布在西北、青藏高原及边缘山区、内蒙古和东北山区及平原,对交通和工农牧业危害严重;我国山区和高原上有一些国道干线为战备路,冬半年因雪阻不通车,因此,解决风吹雪难题也是国防战备需要。

“中国天山公路风吹雪研究和大型创新防治工程”项目以新疆 218 国道艾肯达坂道路雪害防治研究为突破口,历时 30 年,研制和采用国际先进仪器,坚持野外观测和风洞及现场模拟实验,深入分析山区风雪流形成及防治,远较平地复杂与困难的原因,加强基础理论研究,狠抓防治雪害的关键技术,通过模拟计算,提出了得到国际同领域权威人士肯定的新理论与新技术,攻克了道路风吹雪的形成机理这一国际公认难题。研究在 3 个方面有创新性认识:①提出山区风雪流形成的物理过程和要素,建立不同吹雪状态与起动风速、聚积点高度随时间的关系及风速廓线方程,给出有、无降雪天气条件下吹雪输送计算公式和查算图;②查明风雪流吹蚀、堆积、转换机理及条件,贴地气层分离位置和大小及涡旋尺度、强度与地形、风速关系,建立各种地形、路基积雪和不易积雪地型式与规格,提出不同地形、路基风雪流场结构与相应的防雪技术;③计算得出下导风吹刮宽度、侧导板尾部雪堤方向、开挖储雪场等公式及设计规范,提出了造价低、路面无雪、吹刮宽度更大的透风式下导风工程设计方案。该项目提出了合理的吹雪防治对策,为避免绕道而节约运输成本 10 亿元以上。

此外,对我国冻土演化历史、分布状况、活动层变化规律的深入研究,使冻土变化及其影响研究迎来了良好的发展机遇。在大量考察和研究的基础上,提出了我国冻土区划和冻土类型的划分体系,初步开展了江河源区冻土活动层变化对地表植被和河流水循环过程的影响研究。

4　未来展望

纵观国际冰冻圈研究趋势和我国冰冻圈自身特点,我国冰冻圈研究总体发展战略是:①瞄准冰冻圈与气候研究的国际前沿,加强野外观测、卫星遥感、实验分析与模拟研究的有机结合,通过多学科联合攻关,建立与冰冻圈科学研究相关的新理论、新原理、新技术和新方法;②积极拓展新的研究内容与研究领域,完善我国对冰冻圈科学的系统性研究;③坚持为国家目标服务的宗旨,围绕我国西部水资源和重大生态环境问题开展综合研究,为西部脆弱环境下的水资源合理利用和生态安全建设提供科学支撑。为此,未来我国冰冻圈研究的主要内容包括:

1) 冰冻圈过程研究:建立冰冻圈过程动态监测体系,揭示冰冻圈变化的微观过程、宏观特征及时空差异;开展寒区陆面过程研究,探讨寒区陆面过程对地-气水热交换的影响及其对亚洲季风环流及中国夏季降水的影响;通过雪冰物理和动力学研究,模拟不同冰体的动力学特征,为冰冻圈与气候模拟研究和冰冻圈灾害防治奠定基础。

2) 冰冻圈环境记录研究:通过冰芯记录形成过程研究,确定雪冰中各种指标的环境意义并建立定量化模型,为冰芯记录的解释奠定基础;在中低纬度(如青藏高原和其他山系)和南、北极地区开展冰芯记录研究,建立不同时间尺度的气候环境变化序列,揭示区域和全球的气候变化规律和机制;开展寒区深孔地温梯度与气候变化及寒区其他介质(如泥炭、冰川沉积物、地下冰、地衣、树轮等)中的气候环境信息研究。

3) 冰冻圈与气候模拟:运用综合诊断分析手段,研究青藏高原冰川、欧亚大陆积雪以及南北极海冰与大气环流相互作用关系[21-24];建立冰冻圈各类

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

子模型(如冰川对气候响应的动力学模型、积雪与气候之间的关系模型、冻土与积雪及气候之间的关系模型等),为提高中国区域气候预测准确率提供科学依据;建立雪冰/冻土陆面过程参数化方案,改进和发展区域气候模式;开展冰冻圈对我国气候影响的模拟研究。

4) 冰冻圈与水资源:以干旱区内陆河为重点,构建基于冰川融水、冻土水文、融雪过程及降水径流等要素相互耦合的山区流域水文模型,开展流域水资源转化及水资源效应研究[25];以青藏高原为研究区,逐步建立和完善由典型流域尺度到高原尺度的冰川、冻土和积雪水文模型,并集成耦合冰川-冻土-积雪水文模型,开展冻土、冰川、积雪水循环过程及其在寒区水、土、气、生中的影响及作用研究,综合评估冰冻圈变化对水循环和水资源的影响。

5) 冰冻圈变化的影响、适应与对策综合评估:构建冰冻圈对生态、社会与经济影响的评估指标体系,发展冰冻圈影响评价理论方法;以冰冻圈变化适应模式与模拟方法研究为基础,建立考虑冰冻圈变化各种情景和满足不同生态安全和经济发展水平需要的适应性评价模型,研究我国冰冻圈变化适应与减缓对策的社会与经济效应;开展冰湖溃决、冰雪灾、风吹雪、雪崩等冰冻圈灾害形成机制与预测方法研究;构建以实际应用为目标的冰冻圈决策支持系统,综合分析气候-冰冻圈-水文-生态-社会经济相互联系和影响的科学机制,为提出冰冻圈变化的综合适应与减缓对策服务。

围绕国际科学前沿和国家需求,进行冰冻圈科学研究的综合集成并形成冰冻圈科学体系是我国未来冰冻圈研究的主要趋势。我国冰冻圈研究正在紧扣国际前沿和趋势,结合中国国情和实际,形成冰冻圈科学理论体系。主要表现在:在研究手段上,强化了遥感、地理信息系统、地球定位系统、野外自动监测系统、室内计算机模拟等在冰冻圈研究中的应用;在机理研究方面更加关注不同模型的建立和应用;在青藏高原及高亚洲其他山地冰芯气候环境记录研究方面更加强调综合集成,而不仅限于“一孔之见”;在南极地区冰川研究方面,在继续关注表层雪冰过程研究的同时,积极开展了深孔冰芯气候环境记录和区域物质平衡研究,拓展对于全球变化的认识水平;在冰冻圈气候模式方面,在区域气候模式中已关注到冰川、积雪和冻土下垫面的气候效应。与此同时,冰冻圈变化的影响研究也得到了高度重视,对冰川变化的水文与水资源效应、冻土变化的水文与生态效应、冰冻圈变化的环境效应等已成为我国冰冻圈研究的重点内容;在冰冻圈变化适应对策研究方面,以综合评估为重点的研究成果也使我国冰冻圈变化的综合认识提高到新的水平。总之,我国冰冻圈无论在过程和机理研究方面,还是在其对气候、水资源、生态和环境影响研究方面均与国际上由冰冻圈单要素研究向冰冻圈科学体系化研究发展的趋势相一致。

正因为我国冰冻圈在区域气候系统和我国脆弱环境中扮演着重要角色,因此,冰冻圈科学研究具有广阔的应用前景:首先,冰冻圈研究可为系统评估水资源、生态环境的影响提供科学依据。当前,世界范围内冰冻圈萎缩成为普遍现象,各方面的影响逐步显现。冰川变化是我国西部水资源和灾害的重要因子,对未来西部水资源可持续利用、灾害防治影响深远,广泛分布的雪盖和冻土变化是高海拔和高纬地区地表土壤墒情变化的关键决定因素,对地表植被、土壤水分、地下水系统的影响极为重要。深入开展这些方面的研究不仅有利于改善西部地区人类生存环境,也有利于经济社会的发展。其次,冰冻圈研究可为认识全球气候变化机制、提高气候模式的预测能力提供理论基础,为国家长远发展战略的制定提供依据。现今高度耦合的气候模式对于冰冻圈系统关键过程的处理相对简单,因而对于区域(乃至全球)气候变化特征的模拟能力仍有待提高。造成这种事实的根源在于对冰冻圈系统内部及其与其他圈层间的相互作用过程和变化机理认识仍需进一步强化。目前对于全球尺度气候变化机制面临诸多挑战,如“热盐环流”、冰盖变化的长期动态、气候的快速突变,雪盖变化与季风演化等。提高对于这些现象的认识水平,有助于发展和完善我国具有自主知识产权的包含冰冻圈子系统的气候系统模式,提高中国气候变化预测水平,进而有助于国家长远发展战略的制定。

冰冻圈介质(尤其冰芯)可为全球变化研究提供丰富的、高分辨率的气候环境记录,深化全球变化的认识水平。冰冻圈变化是气候变化的敏感指示器,储存于冰冻圈内的气候环境信息十分丰富,如积雪、河湖海冰、山地冰川与极地冰盖的范围与冰量变化、冰层内物理化学生物等浓度、冰缘地貌、泥炭沉积、地下冰、钻孔温度等均能反映不同时间尺度上的气候变化。我国科学家对青藏高原数处冰芯的多年研

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

究,为集成分析西部气候环境变化及其区域差异提供了基础;正在实施的南极 Dome A 计划,可能钻取到时间尺度超过 100 万年的冰芯记录,有望进一步提升对第四纪气候变迁及驱动机制的认识水平。

5 结　语

我国是 WCRP/ CliC 计划的主要发起国之一,并在国际上率先成立了 WCRP/ CliC 国家委员会。目前,中国 CliC 国家委员会下设 9 个专业工作组,分别是冰川/ 冻土工作组、寒区水文工作组、气候与寒区海洋/ 陆地生态工作组、海冰/ 海洋/ 大气相互作用工作组、冰冻圈遥感探测与数据库工作组、冰冻圈变化与气候预测工作组、寒区经济社会可持续发展组、冰冻圈变化对寒区工程影响评价工作组、影响/ 减缓/ 适应综合评估工作组。该委员会凝聚了我国冰冻圈研究队伍的中坚力量。

我国冰冻圈研究的队伍相对较小,分布比较集中,应在长期学科积累基础上,系统构建野外监测平台,发展冰冻圈数值模式,在冰冻圈科学研究以及科研体制方面开拓创新。在 WCRP/ CliC 中国委员会以及广大冰冻圈科技工作者的努力下,相信可大大提高我国冰冻圈研究水平。

致　谢:感谢中国科学院冰冻圈与环境联合重点实验室学委会委员以及冯仁国、黄铁青等同志提出宝贵意见,感谢孙俊英、张东启、邬光剑、秦翔和陈拓等同志提供有益资料。

参 考 文 献

[1] 施雅风. 中国冰川与环境 ——现在、过去和未来. 北京:科学出版社, 2000.

[2] http: //clic. npolar. no.

[3] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

[4] EPICA community members. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*, 2004, 429: 623-628.

[5] http: //www2. umaine. edu/ USITASE.

[6] Zhao L, Ping C, Yang D, et al. Changes of climate and seasonally frozen ground over the past 30 years in Qinghai-Xizang Plateau, China. *Global and Planetary Change*, 2004, 43: 19-31.

[7] 施雅风, 刘潮海, 王宗太,等. 中国冰川编目. 上海: 上海科学普及出版社, 2005.

[8] 田立德. 青藏高原降水中稳定同位素及稳定同位素水文循环研究. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,1999.

[9] Yao Tandong, Xiang Shurong, Zhang Xiaojun, et al. Microorganisms in the Malan ice core and their relation to climatic and environmental changes. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20: B1004.

[10] Yao Tandong, Yang Meixue. ENSO events recorded in Tibetan ice cores. *Developments in Paleoenvironmental Research*, 2004, 9: 163-180.

[11] Yao Tandong, Duan Keqin, Xu Baiqing, et al. Temperature and methane changes over the past 1000 years recorded in Dasuopu glacier (central Himalaya) ice core. *Annals of Glaciology*, 2002, 35: 379-383.

[12] 姚檀栋, 徐柏青, 蒲建辰. 青藏高原古里雅冰芯纪录的轨道、亚轨迹时间尺度的气候变化. 中国科学(D 辑), 2001, 31(增刊): 287-299.

[13] Xu Baiqing, Yao Tandong, Lu Anxin, et al. Variations of near-surface atmospheric CO_2 and H_2O concentrations during summer on Muztagata. *Science in China (Series D)*, 2006, doi: 10.1007/ s11430-004-5095-3.

[14] 徐柏青, 姚檀栋, 王宁练, 等. 融化-再凝结冰芯包裹气体提取装置:中国, ZL200420042219. X. 2004.

[15] Ren Jiawen, Sun Junying, Qin Dahe. Priliminary results of ionic concentrations in snow-pits along the Zhongshan-Dome A traverse route, Antarctica. *Annals of Glaciology*, 2004, 39: 155-160.

[16] Ren Jiawen, Ian Allison, Qin Dahe, et al. Mass balance of the Lambert Glacier basin in East Antarctica. *Science in China (Series D)*, 2002, 45(9): 842-850.

[17] 秦大河, 任贾文. 南极冰川学. 北京:科学出版社, 2001.

[18] Xiao Cunde, Cheng Yanjie, Ren Jiawen, et al. Signals of Antarctic circum-polar wave over the Southern Indian Ocean as recorded in an Antarctica ice core. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50 (4): 347-355.

[19] Xiao Cunde, Paul A Mayewski, Qin Dahe, et al. Sea level pressure change of the Southern Indian Ocean inferred from a glaciochemical record in Princess Elizabeth Land, east Antarctica. *Journal of Geophysical Research (Atmosphere)*, 2004, 109: D16101.

[20] Xiao Cunde, Ian Allison, 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, 39: 188-194.

[21] Bian L, Gao Z, Lu L, et al. Observational estimation of heat budgets on drifting ice and open water over the Arctic Ocean. *Science in China (Series D)*, 2003, 46(6): 580-591.

[22] Wu B, Wang J, Walsh J. Dipole anomaly in the winter Arctic atmosphere and its association with sea ice motion. *J Climate*, 2006, 19(2): 210-225.

[23] Wu B, Zhang R, D'Arrigo R. Distinct modes of the East Asian winter monsoon. *Mon Wea Rev*, 2006, 134: 2165-2179.

[24] Wu B. Weakening of Indian summer monsoon and tropospheric temperature variations. *Adv Atmos Sci*, 2005, 22(1): 21-29.

[25] Ding Y, Ye B, Liu S, et al. Monitoring of frozen soil hydrology in macro-scale in Qinghai-Xizang plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(12): 1143-1149.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Progress on Cryospheric Studies by International and Chinese Communities and Perspectives

Qin Dahe[1)2)] Xiao Cunde[2)3)] Ding Yongjian[2)] Yao Tandong[2)4)] Bian Lingen[3)]
Ren Jiawen[2)] Wang Ninglian[2)] Liu Shiyin[2)] Zhao Lin[2)]

[1)] (*China Meteorological Administration, Beijing* 100081)

[2)] (*Joint Key Laboratory of Cryosphere and Environment, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000)

[3)] (*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing* 100081)

[4)] (*Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100081)

Abstract

The recent program of WCRP/CliC, which represents the current tendency of the international studies on cryopshere, is introduced. Cryopshere is an important water resource in China for maintaining the socioeconomic development in the arid and oasis regions, it also plays an important role in stabilizing the ecological system over the cold regions of western China such as Qinghai-Xizang Plateau. With the global warming, the effects of the climate, environment, ecology and water resource by cryospheric decay are becoming more negative and stronger. These effects threat the security of the sustainable development in western China. It suggests that future cryospheric studies in China should focus on the following 5 projects: Processes monitoring, paleo-climate and paleo-environment records, cryospheric and climatic modeling, relations of cryospheric change and water resources, and impacts assessment and adaptation strategy under various scenarios of cryospheric changes.

Key words: cryosphere; western China; water resource; environmental vulnerability; sustainable development

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net