

编者按：

冰冻圈是全球气候系统五大圈层之一，在受气候变化影响的诸环境系统中，冰冻圈变化首当其冲，是全球变化最快速、最显著、最具指示性，也是对气候系统影响最直接和最敏感的圈层，被认为是气候系统多圈层相互作用的核心纽带和关键性因素之一。我国是中、低纬度地区冰冻圈最发育的国家，冰川面积达59425 km²，占全球中、低纬度冰川面积的50%以上；多年冻土区面积约220万 km²；稳定季节积雪区面积约420万 km²。近百年来，我国冰冻圈显著萎缩，已对区域气候、水资源、生态与环境产生了重大影响。我国冰冻圈的主体为冰川、冻土和积雪，分布范围广泛，不仅有重要的气候效应，还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。受气候变化的影响，冰冻圈变化的气候效应、环境效应、资源效应和生态效应在我国正日趋显著，冰冻圈的未来变化势必对西部生态与环境安全及水资源持续利用产生广泛而深刻的影响。

鉴于冰冻圈在气候系统中的重要性，世界气候研究计划(WCRP)于2001年开始实施了“气候和冰冻圈(CliC)计划”，其目标就是提高对冰冻圈与气候系统之间相互作用的物理过程与反馈机制的理解；提高模型对冰冻圈过程的描述能力，以减少气候模拟和气候变化预测的不确定性；评估和量化过去和未来气候变化所导致的冰冻圈各分量的变化及其影响等。我国为加强冰冻圈科学研究，建立了“冰冻圈科学国家重点实验室”，并于2007年启动了国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“我国冰冻圈动态过程及其对气候、水文和生态的影响机理与适应对策”。几十年来，我国已经在气候变化与冰冻圈方面开展了大量研究，取得了丰硕成果。因此，本刊开辟了气候变化与冰冻圈专栏，约邀相关专家撰写论文，陆续报道相关成果。

文章编号：1673-1719 (2009) 04-0187-09

冰冻圈变化及其影响研究——现状、趋势及关键问题

秦大河^{1,2}，丁永建¹

(1 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室，兰州 730000；

2 中国气象局，北京 100081)

摘要：通过对冰冻圈研究在中国的重要作用和对冰冻圈科学在国内外研究现状的系统总结和分析，凝练出了目前面临的关键科学问题及未来研究重点。总体来看，国际上更多关注冰冻圈变化对气候、海平面和环境的影响；而作为中、低纬度地区冰冻圈最发育的中国而言，冰冻圈变化对生态、水、环境及气候均具有重要影响。目前需要解决的关键科学问题为不同类型冰川对气候变化的响应机理及水资源影响评估的尺度转化机制、冻土与植被间水热传输过程的准确模拟、冰冻圈物理过程参数化及其与气候模式的耦合。为解决上述关键科学问题，需要开展以下研究：冰冻圈过程及其对气候变化的响应机理研究、冰冻圈变化的影响研究和冰冻圈变化的适应对策研究。

关键词：冰冻圈；气候变化；影响；水资源

中图分类号：P467/P343.6

文献标识码：A

“冰冻圈”是指地球表层由山地冰川、极地冰盖、积雪、冻土、海冰等固态水组成的圈层，由于

其对气候的高度敏感性和重要的反馈作用而倍受关注，从而与大气圈、水圈、岩石圈（陆地表层）、生

收稿日期：2008-09-05；修订日期：2009-03-09

基金项目：国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2007CB411500)资助

作者简介：秦大河(1947—)，男，中国科学院院士，主要从事冰冻圈与气候变化研究 E-mail: qdh@cma.gov.cn

通讯作者：丁永建，E-mail: dyj@lzb.ac.cn

物圈一起被认为是气候系统的五大圈层。我国冰冻圈的主体为冰川、冻土和积雪,分布范围广泛,不仅有重要的气候效应,还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。受气候变化的影响,全球冰冻圈发生了显著变化,冰冻圈变化的气候效应、环境效应、资源效应和生态效应在我国正日趋显著,冰冻圈的未来变化势必对西部生态与环境安全和水资源持续利用产生广泛和深刻的影响。目前,冰冻圈变化及其影响研究受到前所未有的重视,已成为国际气候系统及全球变化研究中最活跃的领域之一,而且,开展冰冻圈内部过程、机理和规律及其与其他圈层相依互馈关系的研究,发展“冰冻圈科学”体系成为冰冻圈及相关学科研究共同努力的方向之一。因此,作为冰冻圈发育大国,我国的冰冻圈研究不仅具有科学上的重要性,而且显示出其在国家战略需求上的紧迫性。

1 国际研究现状和发展趋势

1.1 冰冻圈动态变化过程、趋势及其影响研究是国际全球变化研究的焦点之一

冰冻圈对于气候变化的响应极为敏感。受季节性气温变化的影响,积雪和海冰范围的季节性变化很大。卫星遥感监测表明,北半球陆地积雪面积最大为 $45.5 \times 10^6 \text{ km}^2$,最小为 $3.3 \times 10^6 \text{ km}^2$;晚冬时南极的海冰面积为 $17 \times 10^6 \sim 20 \times 10^6 \text{ km}^2$,夏末时仅为 $3 \times 10^6 \sim 4 \times 10^6 \text{ km}^2$,而北极海冰面积在晚冬和夏末则分别为 $14 \times 10^6 \sim 16 \times 10^6 \text{ km}^2$ 和 $7 \times 10^6 \sim 9 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。在世纪和年代际时间尺度上,冰川和冻土对气候变化的响应也非常敏感。随着工业化以来的气候变暖,1850—1970年阿尔卑斯山脉的冰川总量减少了35%,1970—2000年又缩减了15%^[1];1912—2000年非洲乞力马扎罗山冰川面积减少了约80%^[2];1950年以来北半球冬季最大季节冻土面积减少了约7%,我国减少了10%~15%^[3]。

冰冻圈变化已经对全球环境带来了重大影响,国际科学界对此极为关注。如果全球冰川融化,海平面将要比现在高60多m,世界沿海城市和低地将

被淹没。IPCC第四次评估报告的结果为,1993—2003年海平面总上升速率为 $2.7 \sim 3.5 \text{ mm/a}$,其中冰冻圈的贡献率为30%~60%。研究表明,北极冰雪快速消融、大量淡水注入海洋可导致北大西洋热盐环流变慢乃至停滞^[4],对全球气候变化产生重大影响。西伯利亚多年冻土中囚锢的温室气体是每年由于化石燃料燃烧进入到大气中温室气体的75倍,气候的持续变暖和多年冻土退化可能导致这些温室气体的逐渐释放,从而影响全球气候变化^[1]。

1.2 发展包含冰冻圈过程的区域与全球气候模式已是冰冻圈与气候研究的主要趋势之一

雪冰、冻土等冰冻圈要素的变化在气候系统中起着重要作用。雪冰具有极高的反照率,其时空变化显著地影响着全球能量平衡及水循环过程,从而改变区域或全球尺度的气候动力过程,影响气候变化;全球冰量的变化通过改变海洋盐度和温度而触发大洋环流逆转,改变全球气候格局;多年冻土的变化不仅通过改变地气水热交换过程而影响气候系统,同时会通过改变冻土碳库而影响到全球碳循环和气候变化;等等。

早期研究发现喜马拉雅山脉冬春季积雪变化会对印度夏季风产生影响^[5]。随着研究的深入,人们已经认识到欧亚大陆不同区域积雪变化与季风变化之间存在着复杂的关系^[6-7]。相对于迅速变化的积雪和海冰而言,冰川和冰盖的变化较小。尽管如此,当人们将冰盖动力模型与海冰热动力模型与海洋—大气模型相耦合后,已成功地解释了北大西洋地区冰期气候的不稳定性^[8]。鉴于冰冻圈在气候系统中的重要性,以及人们对冰冻圈与气候之间联系机制认知的不足,“世界气候研究计划”(WCRP)于2001年开始实施“气候和冰冻圈(CliC)计划”,其目标就是:1)提高对冰冻圈与气候系统之间相互作用的物理过程与反馈机制的理解;2)提高模型对冰冻圈过程的描述能力,以减少气候模拟和气候变化预测的不确定性;3)评估和量化过去和未来气候变化所导致的冰冻圈各分量的变化及其影响;4)强化冰冻圈的观测与监测,以便开展其变化过程的模拟与诊断研究。

1.3 冰冻圈研究已由过程描述、统计分析向机理分析、数值模拟方向发展

由于冰冻圈变化具有显著的区域和全球影响，加之定点监测研究与大尺度遥感空间监测研究的积累，冰冻圈的自身变化过程、冰冻圈与外部驱动因素之间的关系及其气候、环境效应等的定量研究受到普遍重视。

冰川与气候之间的定量关系模型是评价未来气候变暖情况下冰川变化的关键。国际上关于山地冰川对气候变化响应的数值模拟研究开始于 20 世纪 60 年代，到了 20 世纪末冰川动力模式的发展趋于成熟^[9]。最近，Oerlemans^[10]根据冰川对气候变化响应的动力模型以及全球 169 条冰川近百年来变化的观测结果，估计出 20 世纪前半叶全球升温幅度为 0.5 °C。为了能够根据有限的观测资料对冰川变化进行预测，冰川与气候之间关系的统计模型也有所发展，如法国学者 Letreguilly 等^[11]提出了物质平衡变化对于冰川长度变化影响的一种线性统计模型，Wang 等^[12]建立了一种山地冰川对气候变化响应的平衡态模型，等等。

流域尺度冰川径流变化的模拟研究是冰川水文水资源研究的核心内容，也是国际关注的焦点。基于概念模型及水量平衡模型等手段对阿尔卑斯山脉和中亚天山地区冰川变化的影响分析表明，随着冰川进一步萎缩，冰川径流趋于减少^[13-14]。最近，对于区域或流域尺度上冰川响应及未来情景的模拟研究也提出了一些新的研究思路，如几何模型^[15]、网格化冰川物质平衡模型、基于“尺度转换”的敏感性分析方法等^[16-17]。应用相关模型对中亚天山、喜马拉雅山等地区的研究发现，冰川覆盖率越大，冰川径流对河川径流的影响越明显，且冰川变化对河流水资源的影响也越大。

土层中的水、冰、汽三相态共存和相互转化是导致冻土与融土本质差异的关键。Berg 等^[18]构建的一维水热耦合模型 FROSTB 最初是为冻土工程实践中计算土层冻胀和融沉随时间变化而设计的，后来被应用于冻融过程中水分迁移以及多年冻土对气候变化的响应模拟，模拟结果也得到了实测数据的检验。但 FROSTB 模型模拟过程中完全没有考虑地气

间的水热交换过程（陆面过程），一种相对可行的方法就是利用实测的地面气象要素和冻土水分、温度变化过程，用优化方法反推冻土地表参数^[19]。由 Flerchinger 设计的 SHAW（Simultaneous Heat and Water）模型可以较好地模拟冻融过程中通过植被、雪盖和土层的一维水、热通量动态过程^[20]。

1.4 冰冻圈变化的水文、生态、环境和社会经济影响研究受到各方关注，多学科综合研究已成为冰冻圈科学研究的总趋势

最近，不同的研究和评估结果^[21-22]不约而同地指出，中亚、南亚和青藏高原未来 50 a 冰川融化可能影响那里的径流变化、洪水灾害和淡水资源的供给，可能是对人类进步和粮食安全最严重的威胁之一，涉及到 20 多亿人口。如果今后 100 a 内夏季（4—9 月）平均气温上升 3 °C，阿尔卑斯山脉约 80% 的冰川将融化。这对人口密集的阿尔卑斯山脉地区来说，冰川快速融化对水文和旅游的影响巨大。这些出自国际权威机构的研究结果表明，冰冻圈变化已开始威胁人类社会经济的发展。

将冰冻圈视为一个整体，通过多学科交叉、新技术应用、重大项目实施，开展全球尺度的系统性、集成性研究已成为国际趋势。这些在与冰冻圈有关的众多国际计划上均有所体现，如 WCRP/CliC 计划中主要关注陆地冰冻圈与寒区水文气象、冰川与海平面变化、海洋冰冻圈与高纬海洋 / 大气相互作用、冰冻圈与全球气候变化等的联系；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；中国与日本联合，在国际上倡议成立的亚洲 CliC（Asia CliC）计划，旨在研究亚洲冰冻圈的动态变化及其对区域水资源、环境以及人类发展的影响；等等。

从国际学科发展来看，WCRP/CliC 计划启动之初（2000 年）首次提出了“冰冻圈科学”的概念，将冰川、冰盖、冻土、海冰、积雪等纳入到统一圈层

系统,进行集成研究,这是冰冻圈研究成为国际全球变化研究前沿和热点之一的重要标志。冰冻圈科学概念近年来受到各国科学家的高度重视。目前来看,冰冻圈科学还处在起步阶段,总而言之,冰冻圈科学主要研究冰冻圈各组成部分的内在机理与过程以及与其他圈层之间的相互作用。

2 国内研究进展及发展趋势

我国对冰冻圈的研究始于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。近年来的最新研究进展及发展趋势主要表现在以下4个方面。

2.1 完成了我国西部冰川资源本底清查,初步揭示了我国冰冻圈的近期变化特征

我国从1979年开始冰川编目,历时24 a,通过大量的野外调查和基于20世纪60—70年代的航片与地形图等资料,查明了冰川的总数量和冰储量以及各个山区冰川分布情况;明确了冰川的基本特征,提出了我国冰川的分类系统;建立了中国冰川目录信息系统;通过自行研制的冰川测厚雷达的应用,建立了冰川厚度的估算公式,并在中国周边国家冰川资源调查中广泛应用^[23]。

以冰川编目资料为基础,开展了大量的冰川变化研究^[24-26],结果表明:小冰期以来我国冰川变化幅度从海洋性冰川区向大陆性冰川区呈减小的趋势,20世纪90年代以来约82%的冰川处于退缩或消失状态,其面积缩小比例为2%~18%。

李培基^[27]利用多种资料分析了中国西部积雪空间分布、季节变化以及年际波动特征。结果表明,1970年代后期多雪,1980年代初期少雪,1980年代中期积雪偏多。积雪年际波动与ENSO事件联系紧密,多雪年大多发生在ENSO年内,而少雪年都发生在反ENSO年。最新研究结果表明,在全球变暖背景下,我国西部积雪并没有减少,反而略有增加^[28]。

伴随着过去近半个世纪气候的变暖和人为活动

影响的增强,青藏高原多年冻土的退化迹象明显。主要表现为多年冻土下界上升、地温升高、活动层加厚、冻土不衔接化加剧、融区增加和扩展等。高原周边地区季节冻结深度减薄最显著的地区在高原腹地和高原东北区,减薄约20 cm;西北和东南区减薄5~6 cm,占其总冻结深度的8%~10%^[29]。

2.2 开展了冰冻圈与气候相互作用研究,对我国冰冻圈的气候效应有了定性认识

我国是中低纬度地区冰冻圈最发育的国家,冰冻圈变化对我国及周边地区气候存在重要影响。近些年来,我国学者对青藏高原积雪以及欧亚积雪变化对大气环流、季风和降水等的影响做了大量研究。结果表明,青藏高原积雪变化对大气环流的反馈作用显著,对印度气压场和热带东风急流强弱存在显著影响,高原积雪多(少)会造成夏季风弱(强),进而影响到我国长江流域涝(旱)^[6]。最近,郑益群等^[30]利用SVD等方法对青藏高原积雪和中国区域降水的关系作了诊断分析,并采用区域气候模式(RegCM2)对高原积雪的气候效应做了模拟。欧亚积雪变化与夏季风的强度呈负相关关系,与中国南部和北部地区的夏季降水呈非常显著的正相关,与湖南汛期(4—9月)降水以及江苏梅雨呈负相关关系。值得注意的是,最近的研究^[31-32]表明,青藏高原以及欧亚大陆积雪不同的时空分布格局对亚洲季风系统等的存在差异。

青藏高原冻土地区的土壤结构、性质及其与大气之间的关系不同于其他地区。在现有的全球和区域气候模式中,冻土过程参数化的描述较粗,水、热参数缺乏,尤其是对东亚大气环流和中国、东亚地区的天气气候有较大影响的青藏高原地区冻融过程的描述还很粗糙,这在很大程度上制约了陆面模式中对冻融过程的参数化。因此,对不同土壤成分下的冻土内水热传导参数的测定显得更加重要和迫切。

2.3 近期开展了倍受关注的冰冻圈变化对水文、生态与环境影响问题的研究,揭示了冰冻圈变化所带来的各种影响的严重性与重要性

冰川是我国西北干旱区的重要水资源,出山口

径流的变化与流域内冰川面积大小及其变化密切相关。冰川对河流的调节作用主要表现在夏季稳定和足量的冰川融水补给。在年际和年代际尺度上,流域内冰川规模和冰川覆盖率等决定了冰川径流的年际和年代际波动。研究^[33]表明,当流域冰川覆盖率超过 5% 时,冰川融水就会对河川径流产生显著影响。在近期气候明显向暖湿变化的天山南坡地区,出山径流增加量中的 1/3 以上来自冰川退缩增加的冰川融水^[34]。1960—1990 年代我国冰川储量减少了 450~590 km³^[25],已对中国西部干旱区水资源产生了很大影响,估计自 20 世纪 90 年代以来因冰储量减少而导致的冰川融水径流增加值超过 5.5%。值得注意的是,冰川的加速萎缩最终将会造成河川径流的迅速减少。山区积雪和冻土对径流变化也有重要影响,积雪和冻土对径流年内过程影响可使河流年内分配发生改变^[35]。

我国冻土面积分布广阔,冻土内水分状况及冻土作为不透水层,其变化对寒区水文过程存在重要影响。气候变化对活动层内地下水位和冻融面的作用直接影响冻土区水文过程^[36]。冻土在冻结形成过程中贮存了大量固态水,提高了土壤蓄水量^[37],同时抑制了土壤蒸发和冻结层上水及冻结层上水流的形成^[38-39]。青藏高原多年冻土区 10 m 深度以内土层的平均重量含水量为 18.1%。估计由于冻土变化平均每年从青藏高原多年冻土中由地下冰转化成的液态水资源将达到 $50 \times 10^8 \sim 110 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[40],相当于黄河兰州站年径流量的 1/6~1/3,而西线南水北调预期的调水量为 $170 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右,可见由气候变暖引发的冻土水文效应是巨大的。

冻土变化对生态和环境存在巨大的影响。多年冻土区生态、环境与多年冻土相辅相成的共生关系已经得到了广泛的认识^[39]。通过对青康公路沿线、青藏公路南段和唐古拉山南麓两道河—聂荣高地等地区冻土退化对植被的影响研究发现,伴随着多年冻土退化,高原植被的退化将呈沼泽—沼泽草甸—草甸—草原—荒漠草原—荒漠这样一个渐变转化的过程^[41-43]。从 20 世纪 90 年代中后期开始,长江黄河源区的生态环境问题已成为广泛关注的热点。近期研究^[44-45]表明,青藏高原冻土、典型高

寒草甸生态和源区水文过程之间具有十分密切的相互关系。

总之,我国在冰冻圈变化与水文、生态与环境相互作用方面已开展了大量研究工作。很显然,目前的研究还较为分散和单一,冰冻圈变化对水文、生态和环境影响的物理过程及互馈机制方面的研究还很不够,缺乏对冰冻圈变化效应的深入、系统的认识。在气候变暖背景下,未来 50 a 我国冰冻圈将发生巨大变化^[46-48],这必将对我国乃至邻国的水资源、生态与环境产生重大影响。

需要指出的是,冰冻圈变化产生的冰雪冻土灾害及冻土中温室气体循环也是冰冻圈影响研究的重要课题,2008 年初中国南方发生的低温雨雪冰冻灾害、2009 年初川藏公路雪崩灾害及北方大面积春旱(与积雪有关)等,均与冰冻圈变化有关,这些均是未来研究值得关注的内容。

2.4 围绕国际科学前沿和国家需求,进行冰冻圈科学研究的系统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

概括地说,我国冰冻圈研究紧扣国际前沿和趋势,结合中国国情和实际需求,正蓄势待发向冰冻圈科学化方向发展。主要表现为: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;在冰冻圈与气候方面,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一定程度的重视,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学者对冰冻圈变化的综合认识得到很大提高^[49-51]。我国冰冻圈研究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已积累了由简单、分散向深入、综合层面突破的良好基础,在现有研究基础上,强化对冰冻圈变化影响的研究是我国科学家所面临的十分迫切的课题。

3 关键科学问题和未来研究重点

3.1 关键科学问题

通过上述分析,针对冰冻圈国内外科学发展趋势,结合国家发展实际需求,需要在以下3个关键问题上有所突破。

(1) 不同类型冰川对气候变化的响应机理及水资源影响评估的尺度转化机制。冰川对气候变化的响应过程十分复杂。简言之,冰川对气候变化的响应过程是通过动力波的传递实现的,动力波传递到冰川末端就会导致冰川的进退。要准确认识冰川变化对水文的影响,必须通过构建基于冰川动力过程的气候响应模型,确定冰川对气候变化响应的时滞关系,从而辨析气候—冰川—水文之间的定量联系。冰川对气候变化的响应过程随冰川性质、类型和规模的不同而有很大的差异,为了解空间规律,需要针对不同的冰川类型,选择不同规模的冰川开展典型研究,为在不同流域和区域尺度上评估冰川变化对水资源的影响提供参数甄选基础。另一方面,如何将单个冰川获得的冰川—气候关系转化到流域乃至区域尺度的冰川作用区,用于计算不同尺度的冰川融水量,是评估冰川变化对水资源影响的关键所在。为此,需要将在单个冰川上获得的冰川对气候变化的响应关系,通过冰川几何形态、冰川在流域的分布特征、关键气候驱动因素等关系的转化,应用到流域尺度冰川融水量及其变化的计算中,从而为流域(或区域)尺度冰川变化对水资源的影响提供科学手段。

(2) 冻土与植被间水热传输过程的准确模拟。冻土变化对生态系统的影响表现在两个时间尺度上:一是冻土活动层水热状况的改变直接影响土壤水热传输过程、水分赋存条件,进而影响到生态系统的稳定性。这种影响的时间尺度较短,表现在季节到数十年内。二是多年冻土体的变化,如在气候变暖的影响下,冻土厚度减薄、面积减少、南北界线位移、岛状冻土消失等,伴随着冻土的变化,冻土中释放出的大量冻结水通过土壤和大气直接改变地气间水热循环,改变地表水热收支平衡,影响到生态系统的长期稳定。这种影响的时间尺度从十几年到

百年甚至更长。可见,要更好理解冻土变化对生态系统的影响,既要考虑活动层水热传输过程的影响,也要考虑冻土自身变化导致的水循环过程的改变对生态系统的影响。因此,需要在定位监测基础上构建将大气、土壤(活动层)、多年冻土有机联系的水热耦合模型,定量描述冻土变化过程中土壤与植被水热传输与交换机理,只有能够较好地模拟冻土变化后的水热传输过程,才能更好地理解其对生态系统影响的时间尺度和空间范围。

(3) 冰冻圈物理过程参数化及其与气候模式的耦合。冰冻圈作为气候系统的一个重要组成部分,其变化将对气候系统的其他圈层产生重要的反馈作用。在冰冻圈诸要素之中,积雪和冻土对我国气候变化的影响最大。然而,在气候变化的模拟和预测研究中,只是单独考虑积雪或冻土过程对气候变化的反馈作用,还没有完整地考虑积雪和冻土自身的物理过程及其与气候模式的耦合。因此,如何在全球和区域气候模式中同时考虑积雪和冻土物理过程是揭示冰冻圈对我国气候变化的影响机制、提高区域气候预测能力的关键问题,也是国际WCRP/ChC计划所关注的核心问题。

3.2 未来研究重点

为解决上述3个关键科学问题,需要将未来研究集中在冰冻圈变化机理、冰冻圈变化的影响和适应对策3个方面。

(1) 冰冻圈过程及其对气候变化的响应机理研究。需要在下面几个层次上开展研究:一是以不同类型监测冰川为对象,通过冰川动力学模型与气候变化信息的相互联系,深入分析冰川变化与气候变化之间的定量关系;二是针对冻土、积雪与生态系统和气候相互作用的特点,将冻土、积雪对气候变化响应机理的研究与其变化对生态和气候的影响研究紧密结合,以实际观测为基础,以数值模型为手段,模拟冻土与积雪变化过程,剖析冻土与积雪对气候变化的响应机理,为深入研究冰冻圈变化对水资源、生态和气候的影响奠定基础。

(2) 冰冻圈变化的影响研究。把冰冻圈变化的影响聚焦在水资源、生态和气候3个方面,根据有限目

标、突出重点的原则，冰冻圈变化的水文水资源效应主要以干旱区内陆河典型流域为对象，与上述的典型冰川研究紧密结合，同时对普遍关注的喜马拉雅山区冰川变化的水资源影响进行宏观评价；冰冻圈变化的生态效应研究主要以长江黄河源区冻土和积雪与生态关系研究为重点，通过一维和区域水热传输过程的模拟，分析冻土变化的水循环过程及其对生态系统的影响；冰冻圈变化的气候效应研究主要考虑冰冻圈变化的区域影响，以积雪和冻土变化对气候的影响为重点，研究冰冻圈变化对我国气候影响的内在机制。

(3) 冰冻圈变化的适应对策研究。在上述研究的基础上，结合已有的研究积累，通过补缺充实，对过去 50 a 我国冰冻圈变化进行宏观研究，了解我国冰冻圈变化的区域特征。以宏观认识为依据，针对冰冻圈变化的特点，综合考虑自然、社会、经济和人文因素，通过典型实例剖析，提出适合我国冰冻圈作用区特点的科学评价指标，以科学指标为依据、以模型分析为基础、以 GIS 和决策支持系统为手段，在综合研究、集成分析的基础上，通过构建我国冰冻圈变化的脆弱性评价体系，提出应对我国冰冻圈变化的适应性途径，进而提出应对我国冰冻圈变化的科学对策。 ■

致谢：在本文撰写过程中，任贾文、刘时银、王宁练、武炳义、叶柏生、王根绪、效存德、赵林、李忠勤、秦翔、陈仁生、杨建平和徐中民等参与多次讨论，提供材料并提出建议，由于人员较多，在作者署名上没有一一列出，在此一并致谢！青藏高原冰冻圈观测研究站和天山冰川与环境观测试验站提供资料支持，特致谢忱！

参考文献

- [1] Zimov S A, Schuur E A G, Chapin III F S. Permafrost and the global carbon budget [J]. *Science*, 2006, 312: 1612 - 1613
- [2] Cullen N J, Molg T, Kaser G, *et al.* Kilimanjaro glaciers: recent areal extent from satellite data and new interpretation of observed 20th century retreat rates [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33, L16502, doi:10.1029/2006GL027084
- [3] 秦大河. 未来 50 — 100 年全球气候继续变暖 [J]. *决策与信息*, 2004, 12: 4 - 5
- [4] Stouffer R J, Seidov D, Haupt B J. Climate response to external sources of freshwater: North Atlantic versus the Southern Ocean [J]. *Journal of Climate*, 2007, 20 (3): 436 - 448
- [5] Dey B, Kumar B O S R U. An apparent relationship between Eurasian spring snow cover and the advance period of the Indian summer monsoon [J]. *J Appl Meteor*, 1982, 21: 1929 - 1932
- [6] 张顺利, 陶诗言. 青藏高原积雪对亚洲夏季风影响的诊断及数值研究 [J]. *大气科学*, 2001, 25: 372 - 390
- [7] Fasullo J. A stratified diagnosis of the Indian monsoon—Eurasia snow cover relationship [J]. *Journal of Climate*, 2004, 17: 1110 - 1122
- [8] Schmittner A, Yoshimori M, Weaver A J. Instability of glacial climate in a model of the ocean - atmosphere - cryosphere system [J]. *Science*, 2002, 295: 1489 - 1493
- [9] van de Wal R S W, Oerlemans J. Response of valley glaciers to climate change and kinematic waves: a study with a numerical ice-flow model [J]. *Journal of Glaciology*, 1995, 41 (137): 142 - 152
- [10] Oerlemans J. Extracting a climate signal from 169 glacier records [J]. *Science*, 2005, 308: 675 - 677
- [11] Letreguilly A, Reynaud L. Past and forecast fluctuations of Glacier Blanc (French Alps) [J]. *Annals of Glaciology*, 1989, 13: 159 - 163
- [12] Wang Ninglian, Yao Tandong. Study of the steady-state response of a glacier to climate change [J]. *Cryosphere*, 1996, 2: 67 - 74
- [13] Hagg W, Braun L N, Kuhn M, *et al.* Modelling of hydrological response to climate change in glacierized Central Asian catchments [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 332 (1/2): 40 - 53
- [14] Hagg W, Braun L N. The influence of glacier retreat on water yield from high mountain areas: comparison of Alps and Central Asia [M]// de Jong C, Ranzani R, Collins D. *Climate and Hydrology in Mountain Areas*. 2005: 263 - 275
- [15] Raper S C B, Braithwaite R J. Low sea level rise projections from mountain glaciers and icecaps under global warming [J]. *Nature*, 2006, 439: 311 - 313
- [16] Gregory J M, Oerlemans J. Simulated future sea level rise due to glacier melt based on regionally and seasonally resolved temperature changes [J]. *Nature*, 1998, 391: 474 - 476
- [17] van de Wal R S W, Wild M. Modelling the response of glaciers to climate change by applying volume-area scaling in combination with a high resolution GCM [J]. *Climate Dynamics*, 2001, 18: 359 - 366

- [18] Berg R L, Guymon G L, Johnson T C. Mathematical Model to Correlate Frost Heave of Pavements with Laboratory Prediction [R]. USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1980: 80 - 100
- [19] Yang K, Koike T, Ye B, *et al.* Inverse analysis of the role of soil vertical heterogeneity in controlling surface soil state and energy partition [J]. *J Geophys Res*, 2005, 110, D08101, doi:10.1029/2004JD005500
- [20] Flerchinger N. The Simultaneous Heat and Water (SHAW) Model: Technical Documentation [R]. USDA-ARS-NWRC, Technical Report NWRC 2000-09, 2000: 37
- [21] World Bank. World Development Indicators 2003 [CD]. Washington DC: World Bank, 2005
- [22] UNDP. Human Development Report 2006 [R]. New York: UNDP, 2006: 165 - 166
- [23] 施雅风, 刘潮海, 王宗太, 等. 简明中国冰川编目[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2005
- [24] Liu Shiyin, Sun Wenxin, Shen Yongping, *et al.* Glacier changes since the Little Ice Age maximum in the western Qilian Shan, Northwest China, and consequences of glacier runoff for water supply [J]. *Journal of Glaciology*, 2003, 49 (164): 117 - 124
- [25] 姚檀栋, 刘时银, 蒲健辰, 等. 高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响[J]. *中国科学 (D 辑)*, 2004, 34 (6): 535 - 543
- [26] Ding Yongjian, Liu Shiyin, Li Jing, *et al.* The retreat of glaciers in response to recent climate warming in western China [J]. *Annals of Glaciology*, 2006, 43: 97 - 105
- [27] 李培基. 中国西部积雪的变化特征 [J]. *地理学报*, 1993, 48 (6): 503 - 515
- [28] Qin D, Liu S, Liu P. Snow cover distribution, variability, and response to climate change in western China [J]. *Climatic Change*, 2005, 19: 1820 - 1833
- [29] Zhao Lin, Ping Chien-Lu, Yang Daqing, *et al.* Changes of climate and seasonally frozen ground over the past 30 years in Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau, China [J]. *Global and Planetary Change*, 2004, 43:19 - 31
- [30] 郑益群, 钱永甫, 苗曼倩. 青藏高原积雪对中国夏季风气候的影响 [J]. *大气科学*, 2000, 24 (6): 761 - 773
- [31] 谢志辉, 罗勇. 青藏高原雪盖变化对我国气候的影响 [J]. *应用气象学报*, 1999, 10 (增刊): 122 - 131
- [32] 陈海山, 孙照渤, 阎锦忠. 欧亚大陆冬季积雪异常与东亚冬季风及中国冬季气温的关系 [J]. *南京气象学院学报*, 1999, 22 (40): 609 - 615
- [33] Ye Baisheng, Ding Yongjian, Liu Fengjing, *et al.* Responses of various sized alpine glaciers and runoff to climate change [J]. *Journal of Glaciology*, 2003, 49 (164): 1 - 7
- [34] 刘时银, 丁永建, 张勇, 等. 塔里木河流域冰川变化及其对水资源影响 [J]. *地理学报*, 2006, 61 (5): 482 - 490
- [35] 康尔泗, 杨针娘, 赖祖铭, 等. 冰雪融水径流和山区河川径流 [M]// 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
- [36] 杨针娘, 杨志怀, 梁凤仙, 等. 祁连山冰沟流域冻土水文过程 [J]. *冰川冻土*, 1993, 15 (2): 235 - 241
- [37] 常学向, 王金叶, 金博文, 等. 祁连山林区季节性冻土冻融规律及其水文功能研究 [J]. *西北林学院学报*, 2001, 16 (增刊): 26 - 29
- [38] 刘海昆, 黄树祥, 王慧. 论冻土对土壤水分动态的影响 [J]. *黑龙江水利科技*, 2002, 3: 87
- [39] 王金叶, 康尔泗, 金博文. 黑河上游林区冻土的水文功能 [J]. *西北林学院学报*, 2001, 16 (增刊): 30 - 34
- [40] 丁永建, 潘家华. 气候与环境变化对生态和社会经济影响的利弊分析 [M]// 秦大河, 陈宜瑜, 李学勇. 中国气候与环境演变 (下卷). 北京: 科学出版社, 2005
- [41] 王绍令, 林清, 赵林. 青康公路 (国道 215 线) 沿线的多年冻土 [J]. *干旱区地理*, 1999, 22: 42 - 49
- [42] 王绍令, 赵秀峰. 青藏公路南段岛状冻土区内冻土环境变化 [J]. *冰川冻土*, 1997, 19: 231 - 239
- [43] 袁九毅, 闫水玉, 赵秀峰, 等. 唐古拉山南麓多年冻土退化与嵩草草甸变化的关系 [J]. *冰川冻土*, 1997, 19 (1): 47 - 51
- [44] 王根绪, 李元寿, 王一博. 青藏高原冻土区冻土与植被的关系及其对高寒生态系统的影响 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 2006, 36 (8): 743 - 754
- [45] 杨建平, 丁永建, 陈仁升, 等. 近 50 a 长江黄河源区生态与环境变化综合研究 [M]. 北京: 气象出版社, 2006
- [46] 李新, 程国栋, 陈贤章, 等. GIS 支持下的高海拔冻土对气候变化的响应模型 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 1998, 42 (1): 72 - 79
- [47] 施雅风, 刘时银. 中国冰川对 21 世纪全球变暖响应的预估 [J]. *科学通报*, 2000, 45 (4): 434 - 438
- [48] 南卓铜, 李述训, 程国栋. 未来 50、100 年青藏高原冻土变化情景预估 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 2004, 34 (6): 528 - 534
- [49] 秦大河. 中国西部环境演变评估 [M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [50] 秦大河, 陈宜瑜, 李学勇, 等. 中国气候与环境演变 [M]. 北京: 科学出版社, 2005
- [51] 施雅风. 中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估 [M]. 北京: 气象出版社, 2003

Cryospheric Changes and Their Impacts: Present, Trends and Key Issues

Qin Dahe^{1,2}, Ding Yongjian¹

(1 State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, Lanzhou 730000, China; 2 China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: On the basis of analyses of the importance of cryospheric researches in China and the current status of cryospheric sciences over the world, this paper addresses some key issues and main contents that must be handled at present. Generally, the impacts of cryospheric changes on climate, sea level and physical environments receive worldwide concerns, whereas in China, cryospheric changes are of great importance in ecology, fresh water, physical environments and climate since China has a most developed cryosphere among countries in mid- and low-latitudes. The key issues that should be currently addressed are: i) fluctuation mechanisms of different types of glaciers in responses to climate changes and the scale-conversion in water resources assessments of glaciers; ii) modeling of water and heat exchanges between frozen soil and vegetation; iii) parameterization of physical processes in the cryosphere as well as their coupling with climate models. Towards full solution of these key issues, works in following three aspects should be highlighted, i.e. cryospheric processes and their responses to climate changes, influences of cryospheric changes, and adaptation strategies for cryospheric changes.

Key words: cryosphere; climate change; impact; water resources

消息

中国社会科学院 - 中国气象局气候变化经济学模拟联合实验室成立

2009年6月17日上午,在中国气象局举行了“中国社会科学院 - 中国气象局气候变化经济学模拟联合实验室”成立揭牌仪式。中国气象局沈晓农副局长主持了揭牌仪式,中国社会科学院王伟光副院长、中国气象局郑国光局长、国务院发展研究中心刘世锦副主任出席了仪式并致贺词,国家发展和改革委员会和中国科学院有关领导出席了揭牌仪式。

长期以来,中国气象局和中国社会科学院在气候变化领域一直开展务实合作,具有良好的合作基础。联合实验室的成立,标志着中国气象局与中国社会科学院双方专业优势的进一步结合,这将极大地促进自然科学和社会科学在气候变化领域的交叉和融合,为中国气象局与中国社会科学院更好地服务于国内应对气候变化政策的制定和实

施,全力支持我国在参与国际气候谈判中维护合理的发展权益提供了有利条件。

未来,中国气象局和中国社会科学院将依托联合实验室这个平台,强强联手、优势互补,充分发挥中国气象局在气候变化观测、气候系统模式研发等方面的科研基础优势和中国社会科学院在社会经济领域的研究优势,将实验室打造成我国乃至世界气候变化经济学研究领域的旗舰,在气候变化的适应以及减缓方面开展有特色的研究,不断取得基础性、战略性和前瞻性重大创新性成果,进一步提高我国气候变化科学研究领域的整体水平和综合素质,进一步提升我国应对全球气候变化的科技支撑能力,为我国充分参与全球气候变化国际事务和开展国内工作提供有力的支持和保障。

中国气象局国家气候中心办公室 供稿