

北半球冰冻圈变化及其对气候环境的影响

◆ 王宁练^{1,2} 刘时银¹ 吴青柏¹ 赵林¹ 李震³ 黄菲⁴
康世昌¹ 赵进平⁴ 周建民³ 罗斯琼¹ 车涛¹

1. 冰冻圈科学国家重点实验室(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所) 兰州 730000;
2. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心 北京 100101;
3. 中国科学院遥感与数字地球研究所 北京 100094;
4. 中国海洋大学 青岛 266100

摘要 冰冻圈是气候系统的重要组成部分,其变化与影响已受到了全社会的普遍关注。本文介绍了北半球冰川、冻土、积雪、海冰近几十年来的时空变化规律,发现夏季在北极中央区出现海冰密集度极低的重要现象,阐明了冰川变化对水资源的影响,明确了积雪、海冰、冻土变化对气候的重要作用,并指出了今后需要进一步研究的问题。

关键词: 冰冻圈 气候变化 水资源 生态 北半球 青藏高原

中图分类号: [P951] 文献标识码: A

文章编号: 1009-2412(2015)02-0009-06

DOI: 10.3969/j.issn.1009-2412.2015.02.002

一、引言

冰冻圈是地球表层水以固态形式存在的圈层,包括冰川(山地冰川、冰帽和极地冰盖)、冻土(季节冻土和多年冻土)、积雪、海冰、河冰、湖冰以及大气中的冰晶等,对气候变化十分敏感。冰冻圈主要通过其变化引起的下垫面性质与反照率变化、相变潜热交换、水分迁移等过程对气候环境产生重要影响。在全球变暖背景下,冰冻圈迅速退缩导致海平面上升、洋流变化、气候异常、冻土碳排放、灾害频发和水

资源安全等一系列重大环境问题,已引起全世界的高度关注。从全球尺度来看,北半球冰冻圈不仅发育广泛、变化大,而且对气候环境变化存在着重要影响(尤其是在季节到年代际时间尺度上)。最新研究表明,全球山地冰川面积(即山地冰川与冰帽面积,不包括南极冰盖和格陵兰冰盖面积)为 726 792 km²(共计 197 654 条冰川)^[1],其中 77.2% 的面积(87.3% 的条数)分布于北半球;全球陆地多年冻土面积为 13.2 × 10⁶—18.1 × 10⁶ km²,其中 97% 以上的面积(即 12.9 × 10⁶—17.7 × 10⁶ km²)分布于北半球^[2];北半球季节冻土多年平均最大面积为 48.1 × 10⁶ km²,占北半球陆地面积的一半,其绝对最大面积可达北半球陆地面积的 80%^[3];全球季节性积雪面积的 98% 分布在北半球,1 月份北半球积雪面积平均可达 45.2 × 10⁶ km²(占北半球陆地面积的近一半),8 月份最小仅为 3.3 × 10⁶ km²^[4,5];北极海冰范围的季节性变化也很大,冬季可达 15 × 10⁶ km²,而夏季为 6 × 10⁶ km²^[5]。我国是中低纬度冰冻圈最为发育的国家,冰川面积为 59 425 km²(主要基于 20 世纪 50—70 年代的航片与地形图资料)^[6],多年冻土区面积为 2.15 × 10⁶ km²^[7],稳定积雪区(年积雪日数 60 天以上)面积为 3.4 × 10⁶ km²^[8]。在我国,冰冻圈变化带来的最为突出的问题是水资源安全、气候异常、灾害加重、生态退化等一系列与国民经济建设密切相关的重大问题。因此,开展冰冻圈变化及其影响研究,不仅具有重要科学意义,而且具有重大现实意义。

收稿日期: 2015-3-10 修回日期: 2015-4-3

研究资助: 全球变化研究国家重大科学研究计划项目(2010CB951400)。

联系作者: 王宁练, 研究员, nlwang@lzb.ac.cn。

二、主要研究进展

1. 近几十年来冰冻圈变化特征

北半球冰冻圈范围广大,其近几十年来的普遍萎缩状态,指示了全球的变暖特征。

(1) 冰川

根据最新国际冰川编目资料并结合遥感资料分析,研究发现1975—2005年间北半球冰川变化最为剧烈的区域为欧洲阿尔卑斯山和北美西部落基山脉,其次为青藏高原边缘地区,其中阿尔卑斯山冰川面积在过去几十年间缩小了约40%,落基山脉冰川面积缩小了30%左右,而青藏高原边缘地区冰川的最大萎缩率为23%。依据2004—2011年Landsat TM/ETM+和ASTER遥感资料,完成了我国第二次冰川编目,并确定了我国目前共有冰川48 571条,总面积约 $5.18 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[19]。通过对藏东南(该区域遥感影像受到云、雪的影响)以外地区两次冰川编目资料的对比,发现近几十年来我国冰川面积缩小了约18%。

根据全球不同地区冰川近50年来的观测资料,分析了冰川平衡线高度随纬度的变化情况,结果表明:第一,平衡线高度从热带地区向极地地区呈降低趋势,平衡线高度最高位置分布在南、北纬30°附近,与副热带高压位置相一致;第二,南、北半球平衡线高度分布具有不对称性,在纬度相同的情况下,北半球平衡线高度高于南半球的平衡线高度。北半球冰川平衡线高度近50多年来均呈上升趋势,最大上升速率可达60m/10a。观测研究表明,近20多年来青藏高原冰川平衡线高度上升了160—180 m^[10]。平衡线高度的空间分布与时间变化主要受暖季气温和年降水量空间分布状况及其变化的影响。由于监测冰川数量很少,难以研究冰川平衡线高度的时空变化规律,我们发展了冰川雪线高度(可以反映平衡线高度)的遥感提取方法^[11],并绘制了2010年青藏高原地区雪线高度分布图,揭示出雪线高度在羌塘高原地区最高(可达海拔6000 m),向高原外围方向呈降低趋势。

(2) 冻土

基于1990—2013年北半球约230余个多年冻土活动层厚度观测资料,对北半球活动层厚度的时空变化进行了对比分析。结果表明,北半球活动层厚度存在显著的空间差异,活动层厚度从连续多年冻

土区的几十厘米到不连续多年冻土边缘地带的几米,如北美阿拉斯加活动层厚度平均值仅为45cm,而蒙古高原和青藏高原不连续多年冻土区活动层厚度介于200—300cm。近20多年来,北半球冻土活动层厚度普遍存在加厚趋势,但存在显著的区域差异,并且中高山区和高原地区冻土活动层厚度变化范围较大,如阿拉斯加地区活动层厚度年变化率介于-0.67cm/a到0.69cm/a(约47%场地活动层厚度处于显著增加的趋势),俄罗斯活动层厚度年变化率介于-0.71cm/a到5.9cm/a(超过90%场地活动层厚度呈增加趋势),青藏高原活动层厚度变化介于-7.4cm/a到23.77cm/a(90%场地呈显著增加趋势)^[12,13]。北半球多年冻土地温普遍存在上升趋势,但升温率存在区域差异,如阿拉斯加冻土地温升温率介于0.1—1.0℃/10a,俄罗斯西伯利亚北部地区为0.1—0.7℃/10a,蒙古为0—0.25℃/10a,我国青藏高原地区为0.1—0.6℃/10a^[13-16]。尽管北半球不同地点多年冻土地温的升温率存在差异,但存在着一个普遍的规律,即多年冻土地温的升温率随着地温的降低而增大。

(3) 积雪

遥感是获取空间大范围积雪变化的重要手段。在利用被动微波遥感数据反演积雪深度过程中,当积雪深度小于50cm时,积雪深度可以近似地表示为18.7GHz和36.5GHz的亮温差的线性函数。当积雪深度大于50cm后,随着积雪深度的增加,18.7GHz和36.5GHz的亮温差增加幅度变小,逐渐趋向于饱和,从而会对大于50cm的深雪有低估的问题。因此引入了低频率10.7GHz亮温数据,改进了现有的积雪参数NASA算法,使AMSRE积雪产品的精度提高了16.7%。对北半球1978—2010年时期积雪时空变化的研究表明^[17,18],近30多年来北半球积雪面积整体呈现下降趋势,但在欧亚大陆一些区域略呈增加趋势;北半球冬季雪水当量的总体变化也呈下降趋势,但在欧亚大陆60°N附近存在显著上升的区域。

近30年来青藏高原积雪变化年际波动较大,总体上没有明显的升降趋势^[19,20]。然而,青藏高原不同区域积雪面积的变化差异较大,在藏东南地区积雪减少,而藏西北地区积雪增加;低海拔地区积雪总体增加,高海拔地区变化不大,而其他地区积雪呈现减少趋势;低海拔地区冬季积雪略有增加,而春秋季节减少;高海拔地区秋冬略有增加,春季减少;其他

海拔地区秋冬变化不大,而春季减小明显。另外,近50年来青藏高原地区降雪日数呈减少趋势,约为 $-5.8\text{ d}/10\text{a}$ 。

(4) 海冰

直到最近,我国才对北极海冰变化有较系统的观测与研究。应用被动微波辐射卫星同一频段的水平极化和垂直极化的亮温方程,推导出了一个不依赖海冰表面发射率的海冰密集度新算法——Duplicate Polarization(DPR)算法^[21]。基于这种遥感反演算法得到的海冰资料和北极考察现场观测,发现了夏季在北极中央区海冰密集度呈大幅度下降的现象。这种现象发生在 83°N 以北的密集冰区,海冰大范围开裂,出现大面积的开阔水域,海气热交换显著变化。北极波弗特高压位置的西移是这种现象的主要原因,即波弗特高压位置的西移导致穿极流与波弗特涡流的分界线南移,海冰没有得到有效补偿。同时,这种现象也与海冰厚度和范围减小有密切关系。由于北极海冰还在不断减退,预计未来这种极低密集度的海冰区域会频繁发生,其产生的气候效应和对北极海冰的反馈作用是不可低估的。

对1979—2012年期间北极海冰范围变化的研究发现,其减退趋势非常显著,并存在明显的年代际转型,转折点分别出现在1997年和2007年^[22]。1979—1996年时期北极海冰范围以年际振荡为主,线性减少趋势较弱;1997—2007年时期以线性减少趋势为主,年际振荡的振幅相对较小;2007年以来又呈现年际振荡状态,但海冰范围的季节变化很大。

2. 冰冻圈变化对气候环境的影响

(1) 冰川变化对水资源的影响

山地冰川面积一般较小,因此其变化对区域(或空间大尺度)气候的影响很小,它主要是响应气候的变化。冰川变化对我国西北内陆河流域水资源状况存在重要的影响。全球变暖导致了冰川的加速萎缩与消融,而伴随着冰川的加速消融,原冰层中的杂质物质(黑碳、粉尘等,即吸光性物质)会存留在冰川表面并形成积累,致使冰面反照率降低、吸收更多的太阳辐射,这又进一步地增强了冰川的消融过程。根据青藏高原中部扎当冰川2010年和2011年夏季实测资料推算^[23],受吸光性物质的影响,使得冰面反照率减小27%,净辐射量增加 70 Wm^{-2} ,冰面年消融量增加15%。模拟研究还表明,对于受吸光性物质影响更大的天山乌鲁木齐河源1号冰川,若忽略吸光性物质的辐射强迫效应,模拟的2012年冰川末端消

融量为 2.7 m ,而实际消融量为 3.5 m ,即消融量增加了30%。基于野外观测资料,建立了冰川融水的计算模块,并将其耦合在VIC模型(Variable Infiltration Capacity Model)中,对阿克苏河流域径流过去变化进行了模拟,发现改进后模型的模拟效果较改进前模型的模拟效果有明显的提高,并揭示出近30多年来阿克苏河支流之一的昆马力克河径流增加的主要原因,即是由气温上升造成的冰川融水增加所引起的^[24]。利用模型对冰川规模较大的叶尔羌河流域和冰川规模较小的北大河流域未来融水径流状况进行了预测^[25],结果表明前者在2011—2050年间的冰川径流将相对于1961—2006年间的均值增加13%—35%,而北大河流域未来40年冰川径流将先增加后减少。

(2) 冻土变化对气候、生态的影响

为了说明冻土对气候的影响,我们在建立考虑冻土水热变化的陆面过程模型的基础上,将不同陆面过程模型与气候模式相耦合以检验其对气候的模拟效果,并模拟冻土的有、无是否会造成气候模拟结果之间的显著差异。选择对积雪和冻土刻画较粗的BATS陆面过程模型和对积雪与冻土刻画较细的CLM3.5陆面过程模型,分别与RegCM4模式相耦合,模拟了青藏高原的气候状况。结果表明,利用CLM3.5模拟的月降水量更加接近观测值^[26]。应用CLM3.5及RegCM4模式,对青藏高原区域进行了有、无冻融过程的模拟实验,结果表明:①冻融过程使地气系统之间能量交换加强;②高原地区冻融过程对高低空形势有一定影响;③冻融过程是土壤温度、近地面气温季节变化的“缓冲器”。利用全球模式对有、无冻融过程的模拟实验表明:①冻融过程对北半球气候有显著的影响,土壤的冻结过程将减缓西伯利亚、北美及青藏高原地区冬季土壤的降温,夏季土壤的消融也减缓了这些地区土壤温度的升高;②冻融过程导致土壤温度冬季增加、夏季降低,土壤含水量夏季增加、冬季降低,冬季青藏高原地区及西伯利亚地区升温明显,北美地区次之,夏季西伯利亚地区降温最为明显,其次是北美地区,最后是青藏高原地区;③冻融过程明显地改变了地表与大气之间的能水交换,土壤消融时需要吸收更多的能量,土壤热通量明显增加,同时也导致地面温度降低,感热减小明显,潜热增加,反之亦然。由此可见,冻融过程会对气候变化产生重要的影响。

高寒草甸是青藏高原多年冻土最重要的生态系

统类型,与多年冻土息息相关。通过土壤和植被调查、冻土地温的定位观测、增温实验以及生态模拟的综合研究^[27-31],结果表明:①高寒植被显著影响着局地冻土时空分布和变化格局,青藏高原高寒草甸之下的多年冻土对气候变暖响应最快且最敏感,而降水导致了高寒草甸对冻土变化的响应存在着空间上以及冻土退化阶段上的差异;②青藏高原多年冻土区土壤水分和植被类型显著影响了不同生态系统下部浅层土壤有机碳的空间分布差异,同时不同高寒生态系统下的土壤有机碳组成、矿化速率、酶活性也不同,导致了高寒生态系统土壤有机碳排放潜力的空间差异,高寒草甸土壤碳排放对多年冻土退化具有敏感而快速的响应;③青藏高原多年冻土区高寒草甸 CH₄总的表现为大气的源,CO₂源汇效应存在空间差异,并随着气温升高,CO₂排放强度增大近一倍,同时气温升高显著地引起了多年冻土退化,植被碳略有减少,土壤有机碳较大幅度减少;④估算出青藏高原多年冻土区土壤0—2m有机碳储量为25.4—26.5Pg C。

(3) 积雪、海冰与气候相互作用

积雪反照率与一般地表反照率的巨大差异,使得积雪范围的变化引起的地表反照率变化成为积雪—气候相互作用的主要纽带之一。北半球积雪范围大(1月份时可达北半球陆地面积的近一半),其变化的影响也大。在全球变暖的情况下,一般越向高纬度地区其气温的上升幅度相对较大。例如,对近40年来北半球不同纬度带年平均气温上升速率的计算结果表明,其上升速率从赤道地区的0.19℃/10a逐渐增加到极地地区的0.62℃/10a。然而,近40年来1月份气温上升速率最大值却出现在50°—60°N的纬度带上。通过分析北半球1月份积雪面积及其变化随纬度的变化状况,发现45°—65°N纬度带不仅积雪面积大而且变化也大。进一步对近40年来北半球不同纬度带1月份积雪面积变化趋势进行分析,发现45°—65°N纬度带积雪面积呈减少趋势,尤其是50°—55°N纬度带积雪面积减少尤为显著。一般情况下,积雪面积的减少,将导致地面吸收太阳辐射增加,从而也会导致气温的迅速升高。因此,50°—55°N纬度带积雪面积的迅速减少是该纬度带1月份气温上升速率较大的关键因素。

东亚冬季冷空气活动存在两个主模态,即冷空气偏北活动型和偏南活动型。前一年夏秋时期,东西伯利亚海—波弗特海海冰异常减少(增加)会引起

随后冬季东亚冷空气的偏北(偏南)活动型,而冬季东亚冷空气的偏北(偏南)活动又会引起随后春季北极东半球海冰的异常增加(减少),而白令海和鄂霍次克海的海冰异常变化是伴随东亚冬季气温变化产生的^[32-34]。研究还表明,东亚冷空气活动的偏北和偏南型模态还与北半球中高纬度的积雪分布有关,偏北型冷空气活动与欧亚大陆中纬度地区积雪的增多有密切联系,而东亚冷空气活动偏南型则主要与亚洲大陆中高纬度积雪南北跷跷板型的分布有关。当高纬度积雪偏多而中纬度积雪偏少时,东亚冷空气路径偏南,从而会影响到我国南方地区的天气与气候。另外,东亚冷空气的偏南型还与跨极的穿极波列信号有关。

上文曾指出,北极中央区在夏季出现极低的海冰密集度的现象。通过数值试验,将北极中央区从极点 to 85°N 区域的海冰密集度依次减少50%和0,以研究北极中央区海冰密集度减小对大气环流异常的影响。研究发现,在北极中央区海冰大量减少之后,其海平面气压场第一模态仍然是经典的AO分布,位于太平洋扇区的中心强度减弱,而位于大西洋扇区的强度增强;从时间变化来看,AO正位相发生频率略有增加,冬春季节AO变化振幅有减小趋势,而秋季AO振幅有增强趋势,特别是极端AO事件的频率和强度都有不同程度的加大。北极中央区海冰密集度的减少,对中国冬季南方低温冻雨天气频发有重要影响,可能通过一种新的穿极遥相关波列影响北极涛动的不对称结构和西太副热带高压加强,进而可影响到冬季欧亚中纬度地区的极端低温和降雪天气过程。

北极海冰近年来在夏季的快速消融,使北冰洋中储存的热量更多,秋季结冰期推迟,而冬季由于北冰洋大部分地区均为冰封,只有北大西洋北部的巴伦支海的海冰有显著的年际年代际变化,因此夏季海冰融化对大气的异常加热主要发生在太平洋扇区,而冬季的海冰异常加热则主要位于大西洋扇区的巴伦支海。数值试验结果表明,北极上空大气环流对海冰消融产生的异常加热响应在冬季和夏季完全不同,对于冬季巴伦支海地区由于海冰消融而产生的对大气的加热容易产生负AO的大气环流异常响应,而夏季东西伯利亚海到楚科奇海太平洋扇区一带的海冰融化导致的大气环流异常则呈现出类似于正AO分布型,使得西太副高加强,进而对东亚沿岸气候产生重要影响。该发现澄清了以往不同研究中发现大气对北极海冰强迫的异常响应有时为正

AO 响应、有时为负 AO 响应的原因。

三、未来研究展望

冰冻圈的变化与影响已引起了学术界和各国政府的高度关注。关于冰冻圈变化与影响的研究已是趋于全球视野下的研究,基于目前的认识程度,以下问题在近期内值得深入研究。

(1) 冰冻圈与气候相互作用问题。积雪、海冰、冻土变化对气候的影响是显著的,目前的许多研究都是将他们各自独立地与气候变化相关联。然而,积雪、海冰、冻土基本都是暖季(暖期)消退、冬季(冷期)发展的变化过程(即它们消融吸热、冻结释热以及消融过程中的水分释放存在时间上的可比性),在区域分布上尽管海冰与陆地多年冻土不一致,但它们都受到积雪过程的影响。因此,在开展冰冻圈与气候相互作用研究时,有必要将积雪、海冰、冻土作为一个系统,研究其与气候间的相互作用过程。

(2) 冰冻圈变化与水资源问题。我国西北干旱区地表水资源主要形成于高寒山区,尽管目前关于冰川变化对水资源的影响有一定的认识,然而对山区冰川、积雪、冻土构成的冰冻圈系统及其变化在水资源形成与水循环中的作用还缺乏系统认识,这一方面的研究对西部开发、丝绸之路建设中面临的水资源可利用问题具有重要的意义。

(3) 多年冻土退化与碳循环问题。尽管全球多年冻土地区面积仅占全球陆地面积的 9% 左右,但其储存的有机碳量占全球土壤总有机碳量的 25%—50%。随着气候的进一步变暖,冻土退化的加重,其源汇效应将会发生变化,并进而导致大气温室气体含量变化与气候变化。这种反馈效应以及多年冻土地区的碳源、汇效应的转折点是值得深入研究的重要问题。

(4) 冰川消融退缩与海平面上升问题。新的世界山地冰川编目结果表明,入海冰川(即末端伸入海水的冰川)面积占全球山地冰川(包括冰帽)面积的 39%。入海冰川的一个重要特征是其物质损耗过程除消融外,还有末端崩解入海部分。以前关于山地冰川消融对海平面变化的贡献,主要是基于山地冰川面积计算的冰川消融量来估算的。由于存在大量末端崩解的入海冰川,因此以前关于冰川消融对海平面上升的贡献量很可能是低估了。另外,随着全球变暖的进一步加剧,加之极地地区的升温幅度偏大,极地冰盖消融对海平面的影响将会变得越来越

重要。值得注意的是,全球经济发达地区基本都分布在沿海地区,因此评估全球冰川与冰盖对海平面变化的影响具有重要的现实意义。

(5) 冰冻圈灾害与工程建设、经济发展问题。随着全球变暖,大气中水汽含量增加,大范围强降雪的几率也会增大,这对交通运输、电力供应等会造成很大的影响,牧区受雪灾的影响程度也会增加;随着全球变暖,多年冻土地区冻融灾害也会变得严重,道路、桥梁、管线、输电线路和建筑物等工程建设将会受到影响;随着全球变暖,冰湖扩张,其潜在溃决灾害的风险也会加大。这些都需要开展相应的评估,并建立监测预警系统或防灾排险方案,减少灾害带来的损失。

(6) 冰冻圈变化与地缘政治问题。冰冻圈这一地理要素的快速萎缩消退,将会对国家政治行为产生深刻的影响,其引起的主要地缘政治问题包括:① 北极海冰消融与航道问题,一旦北极海冰融化贯通,将会大大缩短欧亚大陆间的航路,也为北极地区的资源开发(包括海底天然气水合物,即可燃冰等)与运输带来极大的便利;② 冰川融化引起海平面上升,将会使低地国家与小岛国家面临困境;③ 冰川萎缩、可利用水资源短缺,将会给中亚干旱区和南亚地区冰川补给比例较大的国际河流流经国家之间的水资源开发、利用与协调发展方面带来一些新的问题。

参考文献

- [1] Pfeffer W T, Arendt A A, Bliss A, et al. The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers. *Journal of Glaciology*, 2014, 60(221): 537—552
- [2] Gruber S. Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation. *The Cryosphere*, 2012, 6(1): 221—233
- [3] Zhang T, Barry R G, Knowles K, et al. Distribution of seasonally and perennially frozen ground in the Northern Hemisphere [C]. In: Phillips M, Springman S M, Arenson L U (eds), *Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost*, 21—25 July 2003, Zurich, Switzerland. The Netherlands: A. A. Balkema, Lisse, 2003: 1289—1294
- [4] Armstrong R L, Brodzik M J. Recent Northern Hemisphere snow extent: A comparison of data derived from visible and microwave satellite sensors. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(19): 3673—3676
- [5] IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 317—382
- [6] 施雅风. 简明中国冰川目录[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2005: 7—32
- [7] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 37—62
- [8] Che T, Li X, Jin R, et al. Snow depth derived from passive microwave remote sensing data in China. *Annals of Glaciology*, 2008, 49

- (1): 145—154
- [9] 刘时银,姚晓军,郭万钦,等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状. *地理学报*, 2015, 70(1): 3—16
- [10] 王宁练,贺建桥,蒲健辰,等. 近50年来祁连山七一冰川平衡线高度变化研究. *科学通报*, 2010, 55(32): 3107—3115
- [11] Guo Z, Wang N, Kehrwald N M, et al. Temporal and spatial changes in Western Himalayan firn line altitudes from 1998 to 2009. *Global and Planetary Change*, 2014, 118: 97—105
- [12] Yang M, Nelson F E, Shiklomanov N I, et al. Permafrost degradation and its environmental effects on the Tibetan Plateau: A review of recent research. *Earth-Science Reviews*, 2010, 103(1): 31—44
- [13] Zhao L, Wu Q, Marchenko S S, et al. Thermal state of permafrost and active layer in central Asia during the International Polar Year. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2010, 21: 198—207
- [14] Wu Q, Zhang T, Liu Y. Thermal state of the active layer and permafrost along the Qinghai-Xizang (Tibet) Railway from 2006 to 2010. *The Cryosphere*, 2012, 6: 607—612
- [15] Xie C, Zhao L, Wu T, et al. Changes in the Thermal and hydraulic regime within the active layer in the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Mountain Science*, 2012, 9(4): 483—491
- [16] Pang Q, Zhao L, Li S, et al. Active layer thickness variations on the Qinghai-Tibet Plateau under the scenarios of climate change. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(3): 849—857
- [17] Li Z, Liu J, Tian B. Spatial and temporal series analysis of snow cover extent and snow water equivalent for satellite passive microwave data in the northern hemisphere (1978—2010) [C]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2012: 4871—4874
- [18] Liu J, Li Z. Temporal Series Analysis of Snow Water Equivalent of Satellite Passive Microwave Data in Northern Seasonal Snow Classes (1978—2010) [C]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2013: 3606—3609
- [19] Tang Z, Wang J, Li H. Monitoring snow cover changes and their relationships with temperature over the Tibetan Plateau using MODIS data [C]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2013: 1178—1181
- [20] Li H, Tang Z, Wang J, et al. Synthesis method for simulating snow distribution utilizing remotely sensed data for the Tibetan Plateau. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, 8(1): 084696-1-16
- [21] Zhang S, Zhao J, Frey K, et al. Dual-polarized ratio algorithm for retrieving Arctic sea ice concentration from passive microwave brightness temperature. *Journal of Oceanography*, 2013, 69(2): 215—227
- [22] 黄菲,狄慧,胡蓓蓓,等. 北极海冰的年代际转型及极端低温变化特征. *气候变化研究快报*, 2014, 3(2): 39—45
- [23] Qu B, Ming J, Kang S, et al. The decreasing albedo of Zhadang glacier on western Nyainqentanglha and the role of light-absorbing impurities. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(2): 11117—11128
- [24] Zhao Q, Ye B, Ding Y, et al. Simulation and analysis of river runoff in typical cold regions. *Sciences in cold and arid regions*, 2011, 3(6): 498—508
- [25] Zhang S, Gao X, Zhang X, et al. Projection of glacier runoff in Yarkant River basin and Beida River basin, Western China. *Hydrological Processes*, 2012, 26(18): 2773—2781
- [26] Wang X, Yang M, Wan G, et al. Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau climate simulation using the regional climate model RegCM3. *Climate Research*, 2013, 57(3): 173—186
- [27] 赵拥华,赵林,杜二计,等. 青藏高原多年冻土区沼泽草甸土壤甲烷产生速率研究. *冰川冻土*, 2011, 33(5): 999—1005
- [28] 赵拥华,赵林,杜二计,等. 唐古拉地区高寒草甸生态系统CO₂通量特征研究. *高原气象*, 2011, 30(2): 525—531
- [29] Wu X, Zhao L, Chen M, et al. Soil organic carbon and its relationship to vegetation communities and soil properties in permafrost areas of the central western Qinghai-Tibet Plateau, China. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2012, 23(2): 162—169
- [30] Wu X, Fang H, Zhao L, et al. Mineralisation and changes in the fractions of soil organic matter in soils of the permafrost region, Qinghai-Tibet Plateau, China. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2014, 25(1): 35—44
- [31] Hu G, Fang H, Liu G, et al. Soil carbon and nitrogen in the active layers of the permafrost regions in the Three Rivers' Headstream. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(12): 5113—5122
- [32] 樊婷婷,黄菲,苏洁. 北半球中高纬度大气主模态的季节演变及其与北极海冰变化的联系. *中国海洋大学学报*, 2012, 42(7—8): 19—25
- [33] 黄菲,高聪辉. 东亚冬季气温的年度变化特征及其与海温和海冰异常的关系. *中国海洋大学学报*, 2012, 42(9): 7—14
- [34] Wei J, Su J. Mechanism of an abrupt decrease in sea-ice cover in the Pacific sector of the Arctic during the late 1980s. *Atmosphere-Ocean*, 2014, 52(5): 434—445

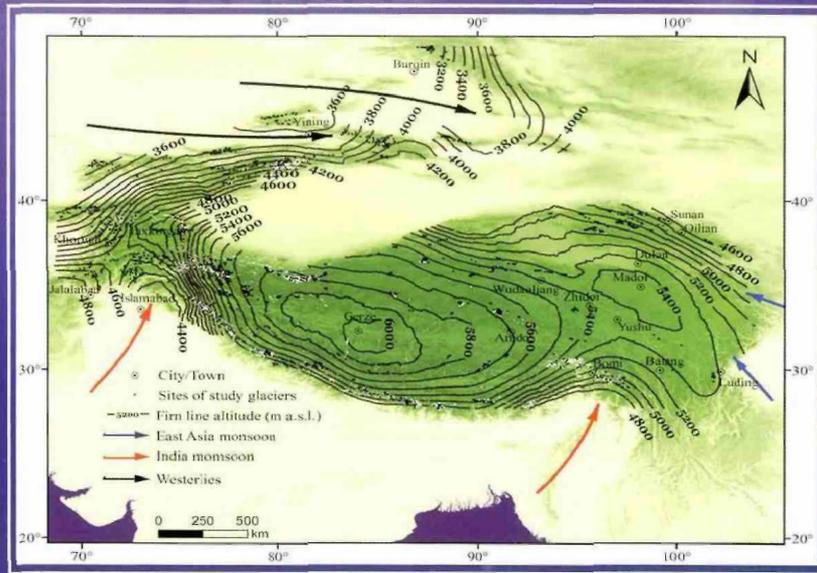
Recent Progress in the Study of the Change of Cryosphere in the Northern Hemisphere and Its Impacts on Climate and Environment

Wang Ninglian^{1,2}, Liu Shiyin¹, Wu Qingbai¹, Zhao Lin¹, Li Zhen³, Huang Fei⁴, Kang Shichang¹, Zhao Jinping⁴, Zhou Jianmin³, Luo Siqiong¹, Che Tao¹

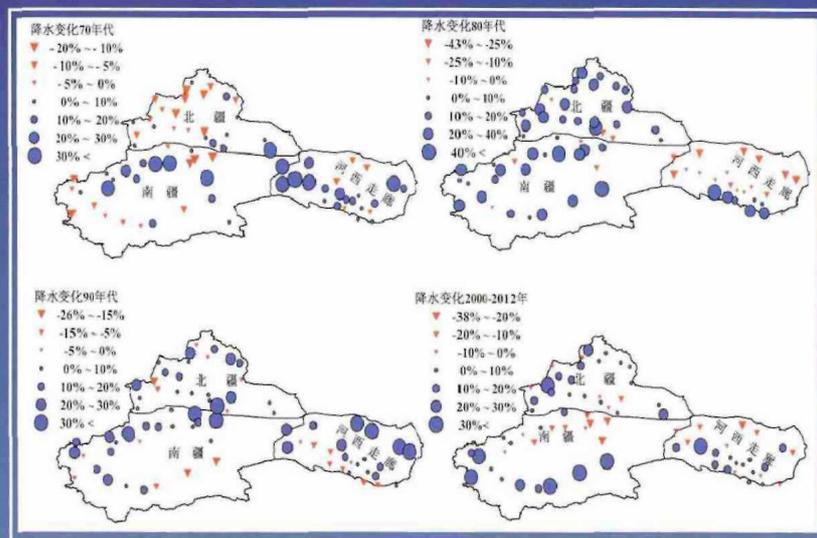
1. State Key Laboratory of Cryosphere Science, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000
2. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101
3. Institute of Remote sensing and Digital Earth, CAS, Beijing 100094
4. Ocean University of China, Qingdao 266100

The Cryosphere is one of the major components of the climate system, its change and impacts have been paid much attention in recent years. This paper reveals the spatial and temporal change of cryosphere in the Northern Hemisphere over the past several decades, finds that the very low sea ice concentration occurred in the central Arctic Sea in summertime, states the influence of glacier change on water resources, identifies the interactions between snow, sea ice, permafrost and climate, and points out some questions which need to be studied in the future.

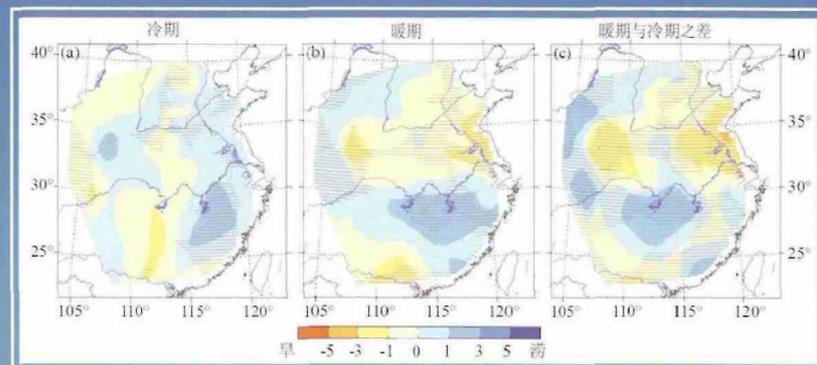
Keywords: cryosphere; climate change; water resources; ecology; Northern Hemisphere; Tibetan Plateau



2010 年高亚洲冰川雪线高度分布 (详见本期 “北半球冰冻圈变化及其对气候环境的影响” 一文)



西北干旱区 1960-2010 年不同年代降水量变化趋势 (详见本期 “气候变化对西北干旱区水循环影响机理与水资源安全研究” 一文)



过去 2000 年冷、暖期间的中国东部旱涝分布格局及其差异 (详见本期 “过去 2000 年全球典型暖期的形成机制及其影响研究” 一文)