

近30年来乌鲁木齐河源区空冰斗季节性 积雪对气候变暖的响应^{*}

张鹏¹, 李忠勤^{1,2}, 金爽², 怀保娟²

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

提 要: 利用中国科学院天山冰川观测试验站提供的 1987-2014 年的乌鲁木齐河源区空冰斗的气象观测资料, 同时结合 1987-1993/2006-2007/2014-2015 对空冰斗季节性积雪的观测资料, 分析了该区域积雪厚度、积雪日数的变化特征以及最大积雪深度与气温降水的关系。结果表明: 1) 在积雪稳定期, 气温和降水总体呈增加趋势, 且这种趋势主要发生在春季。2) 稳定期积雪的持续时间有明显的缩短趋势。积雪的最大深度出现在海拔 3865m 处, 这一高度以下, 积雪深度随海拔升高呈现上升趋势, 而这一高度以上的地区则相反。3) 积雪稳定期, 降水对最大积雪深度的影响远远大于气温等其他气象因素。

关键词: 空冰斗流域; 积雪; 气温; 降水; 最大积雪深度; 乌鲁木齐河源区

中图分类号: P468

文献标识码: A

全球气候变暖这一观点, 已经得到越来越多的科学家、学者和政府机构的认同^[1]。联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第一工作组 (WGI) 第五次评估报告 (AR5) 的决策者摘要 (SPM) 中, 从多视角进一步证实和支持了 AR4 关于近百年全球气候变暖毋庸置疑的结论^[2], 同时 AR5 基于最新情景预估近期 (2016-2035 年) 全球平均地表温度可能比 1986-2005 年升高 0.3~0.7℃, 到 21 世纪末 (2081-2100 年) 将升高 0.3~4.8℃^[3]。在全球持续变暖的情况下, 冰冻圈对气候变化有着迅速且巨大的响应和影响^[4]。积雪作为冰冻圈中对气候异常变化最灵敏的地球表面覆盖物, 其对全球变暖的响应势必成为全球变化研究中的热点。

新疆属于干旱半干旱区, 又是我国西北干旱区的主体, 地表水资源匮乏, 季节性积雪水资源丰富^[5], 我国三大稳定积雪区, 新疆占了 1/3^[6]。新疆的稳定积雪主要分布在北疆地区, 其中天山区是新疆乃至中国最主要的积雪区域^[7], 其作为新疆干旱区的“湿岛”, 冬季降雪充沛, 可以视为新疆的固体水库。近 30 年来, 天山山区气温呈现出明显的上升趋势, 对冰冻圈产生了显著的影响^[11-14]。积雪随着气候的变暖将会对干旱区农、牧业和脆弱的生态系统产生严重的影响, 甚至会导致旱涝灾害的频繁发生。因此, 研究清楚干旱区积雪与气候变暖的关系对干旱区脆弱的生态环境演变和经济的可持续发展具有重要的意义^[8]。

对乌鲁木齐河源区冰冻圈变化的定位监测是天山山区冰冻圈监测时间最长, 观测序列最完整的区域。故这一区域可以作为季节性积雪观测的理想区域。上世纪 80 年代已有多位学者对这一区域的季节性积雪及其特征进行了深入的研究, 发现空冰斗内积雪稳定期一般在 8 个月左右, 积累区积雪基本呈东南-西北向的条带状分布^[10]。上世纪 90 年代对这一区域的季节性积雪的研究一度中断, 此后很长一段时间没有开展相应的观测和研究。自 2006 年起中国科学院天山冰川观测试验站恢复了对这一地区季节性积雪的观测^[15]。文中试图通过对近 30 年来空冰斗积雪的变化趋势进行综合分析, 初步探讨其对气候变化的响应, 使积雪水资源能够得到更充分的利用, 为水资源的合理配置做出贡献。

^{*} 收稿日期: 2015-7-1; 修回日期: 2015-8-1。

基金项目: 国家重大科学研究计划项目 (2013CB401801); 国家自然科学基金项目 (41471058; 91425303); 中科院重点部署项目 (KJZD-EW-G03-01) 资助。

作者简介: 张鹏 (1989-), 男, 硕士, 研究方向: 干旱区水资源。Email: bhpeng@163.com

通讯作者: 李忠勤, 研究员, 博士研究生导师, 主要从事冰川与环境方面的研究。Email: lizq@lzb.ac.cn

1 站点与数据来源

乌鲁木齐河源空冰斗小流域位于乌鲁木齐河源1号冰川东北侧($43^{\circ}04' \sim 43^{\circ}08'N$, $86^{\circ}42' \sim 86^{\circ}51'E$), 海拔介于3806~4360m, 斗口朝向东南, 总面积约为 1.62km^2 ^[10, 15, 20](图1)。冰斗底部、中部地区属于阴影区, 积雪覆盖较均匀; 北面和东南坡由于太阳辐射强烈, 积雪较薄。中国科学院天山冰川观测试验站在空冰斗口安置有空冰斗气象观测场, 主要观测气温、降水、湿度等气象要素, 自1982年以来, 对空冰斗的各项气象要素进行连续观测和研究^[19]。

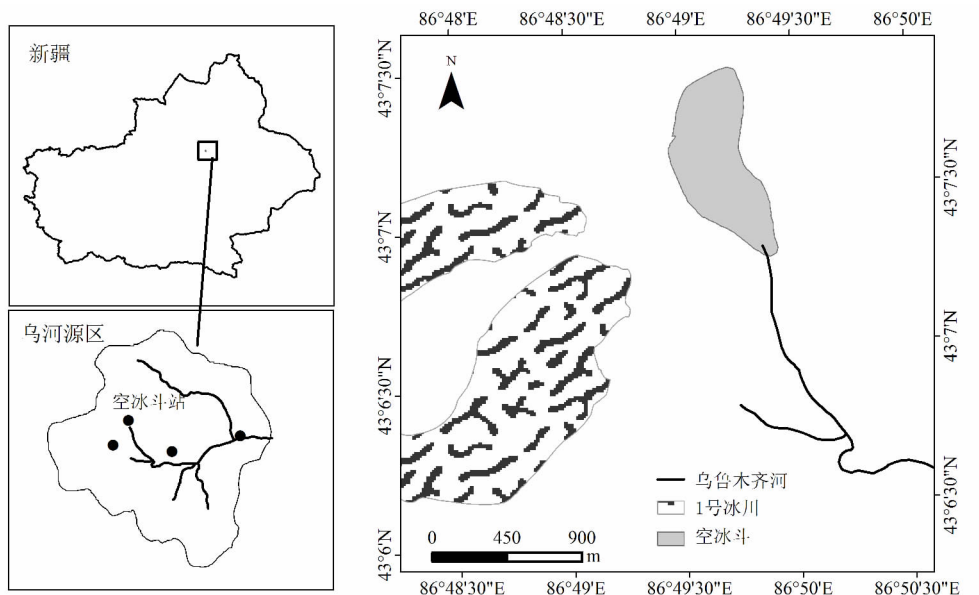


图1 研究区概况图

Figure 1 Location of the Kong - Bingdou basin

中国科学院天山冰川观测实验站(下称天山冰川观测站)曾于1987-1993/2006-2007年对该区域的季节性积雪进行过观测。文中的研究在基于上述两次观测的基础上, 于2014年对流域内积雪进行再次观测。本次观测的时间从2014年降雪发生期(9月份)开始至2015年积雪消融期(3月份)结束。本次研究根据流域内的不同地形要素, 同时在参考前人工作的基础上, 对量雪尺的布设进行了细化, 共布设了5排20根量雪尺(图2)。每根量雪尺高度约为1.2m。表1给出了量雪尺具体布设的平均海拔及其数量的基本情况。本次数据采集的方法主要是人工实地观测, 观测初期到次年2月份, 每月进行4次测量, 共取得积雪数据22组, 从3月份开始, 每天进行1次观测, 共取得积雪数据17组。同时本次研究中所用到的冬、春两季气温和降水的数据, 均来自于天山冰川观测站(表2)。

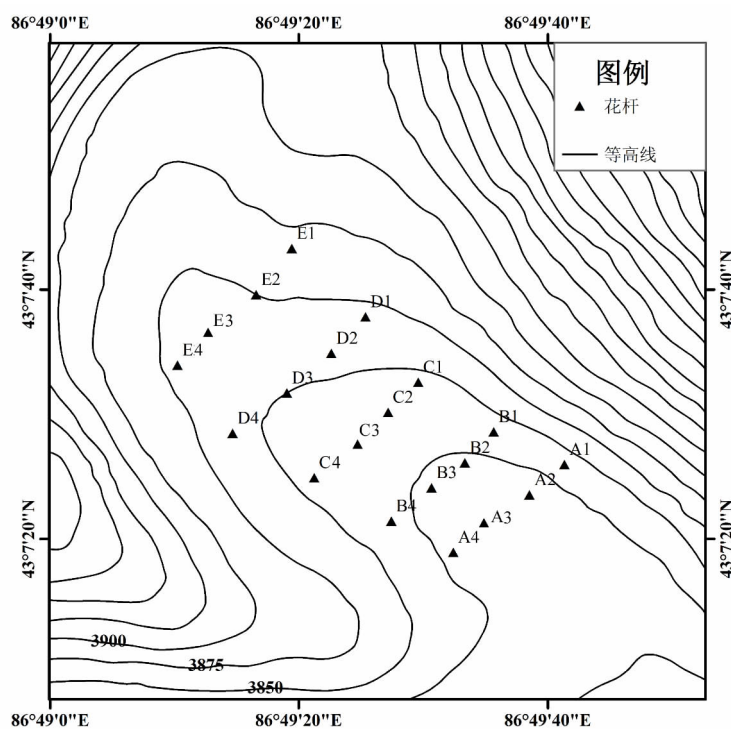


图2 空冰斗积雪观测点分布

Figure 2 Distribution of snow cover of Kong - Bingdou basin

表1 花杆布设的平均海拔及其数量

Table 1 The elevation and number of sampling sites

排数	花杆数目/根			海拔 (m)
	阴坡	半阴坡	阳坡	
A		1	3	3810
B		1	3	3825
C		3	1	3840
D	4			3865
E			4	3875

表2 空冰斗季节性积雪研究所用的数据序列

Table 2 Data of Kong - Bingdou basin used in this work

空冰斗数据项	时间序列(年)	数据来源
冬、春季均温/℃	1987 - 2014	天山冰川观测站
冬、春季降水量/cm	1987 - 2014	天山冰川观测站
积雪深度/cm	1987 - 1993	天山冰川观测站
	2006 - 2007	[文献15]
	2014 - 2015	实测数据
积雪日数/d	1987 - 1993	天山冰川观测站
	2006 - 2007	[文献15]
	2014 - 2015	实测数据

2 结果与分析

2.1 积雪稳定期气温和降水的月平均变化

由于气温和降水是影响积雪变化的主要因素^[6,11,15-18]，这里主要分析该区域多年冬、春季气温和降水的变化过程。图3(a)是1987-1993/2004-2008/2010-2014年冬、春季多年气温的变化过程，可以看出，近30年来，从入冬初期直至深冬，气温的变化都不是很明显且升高幅度不大，约为 $0.07^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ，从次年1月份开始到4月份，气温一直处于升高状态且变化幅度较大，约为 $0.32^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。当我们将1987-1993年和2010-2014年春季气温进行比较时，发现后者比前者高出 1.4°C 。图3(b)是1987-1993/2004-2008/2010-2014年冬春季多年降水的变化过程。从当年10月份到次年3月份，由于处于冷季^[19]（9月到次年4月），降水变化幅度很小，2010-2014年12月份到2月份的降水数据有减少的趋势，但是波动很小，属于正常波动范围。从3月份开始，降水表现出了显著的增加趋势，尤其是4月份以后，降水的幅度明显增大。整体上看，近30年来该区域冬、春季气温和降水呈上升趋势且春季气温升高幅度较大，这一变化与河源区自20世纪80年代以来气温总体呈上升趋势^[20]是一致的。导致春季降水增加的主要原因是由于研究区位于乌鲁木齐河源1号冰川附近，而1号冰川又属于夏季补给型冰川，5-9月是其主要降水发生期，故受其影响较大^[21]。

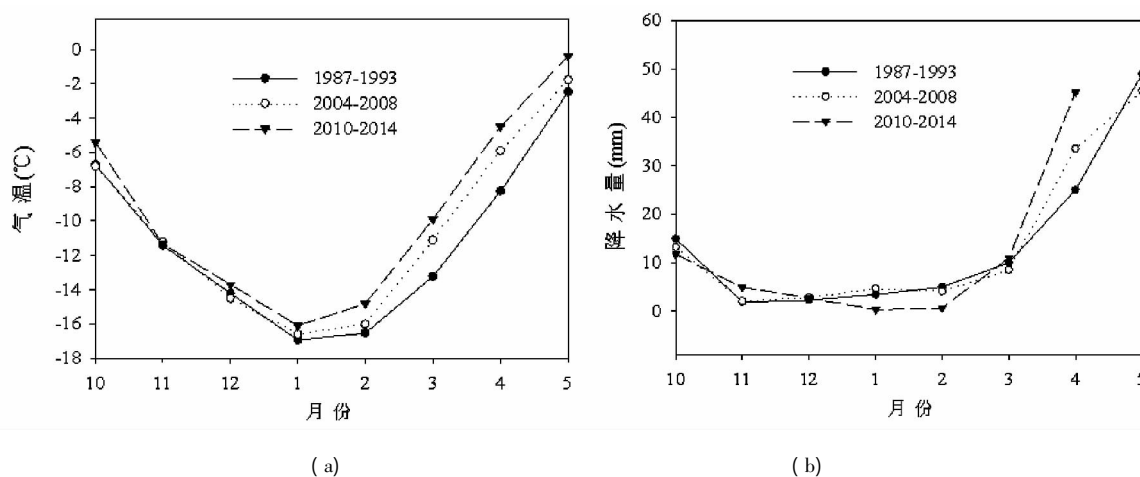


图3 空冰斗冬、春季气温与降水的变化趋势

Figure 3 Temperature and precipitation changes in Kong - Bingdou basin

2.2 积雪时间与积雪深度的变化趋势

为了使观测更为全面系统，本次观测起始于2014年9月（降水期），从10月份以后，降水稀少，最多时不超过5cm，积雪进入稳定期。到2015年3月中旬，流域内积雪表面开始消融，稳定期结束，持续约6个月（168天）。而在上世纪90年代初期研究中，季节性积雪稳定期持续约8个月，最大积雪稳定期为211天，2006年季节性积雪的稳定期约为7个月（183）天（图4）。相比之下，流域内季节性积雪的稳定期持续时间明显缩短，这主要是由于该区域近30年气温升高显著，积雪提前融化导致的。这种变化与新疆近50年来气温不断上升^[23]这一事实相吻合。

在本次观测中，积雪稳定期，流域内的降水极少，气温均在 0°C 以下，去除这两项对积雪深度影响很大

的因素以后,流域内对积雪深度影响较大的因素为太阳辐射和风。在本次观测中,为了使各排花杆深度的平均值更为准确,在计算时剔除了各排引起误差较大的花杆,得到本次积雪深度的变化趋势图(图5a),同时为了便于对比,文中给出了前两次观测同海拔高度的雪深变化趋势图(图5b、图5c),自10月份到次年3月份,A排到E排积雪深度从积雪初期到稳定期结束,分别增加了1.8cm、2.3cm、3.2cm、11.5cm、0.9cm。可以看出(图5a)流域内不同海拔量雪尺测得的积雪深度均呈现出上升趋势,而且D排(海拔3765m)以下,积雪深度随着海拔升高而增加,D排以上反之。这与1987-1993/2006-2007年流域内积雪深度的观测结果相一致。但同时我们也发现,海拔最高的E排的积雪深度小于其他排,海拔较高的D排的积雪深度却是最大的,出现这一情况的原因主要是,D排位于冰斗底部,地势相对较为平坦,且处于阴坡,太阳辐射很小,而E排位于北面坡,太阳辐射强烈,背风倒石堆分布广泛,而且受风的影响因素很大,所以积雪很薄。总的来说,本次观测的积雪深度相对于前两次观测结果,有明显下降的趋势,以D排积雪观测初期和末期数据为例,在上世纪90年代初期,积雪深度分别为29cm、56cm,而本次观测积雪深度分别为22cm、32cm。分别相差7cm、24cm。通过分析得出,近30年内流域内冬季降水减少是导致这一现象的主要原因。同时这与近50年来,南北疆及天山山区的积雪深度呈轻度增长^[24]这一趋势相反,这主要是受到小流域内局地气象和环境因素特殊性的影响。

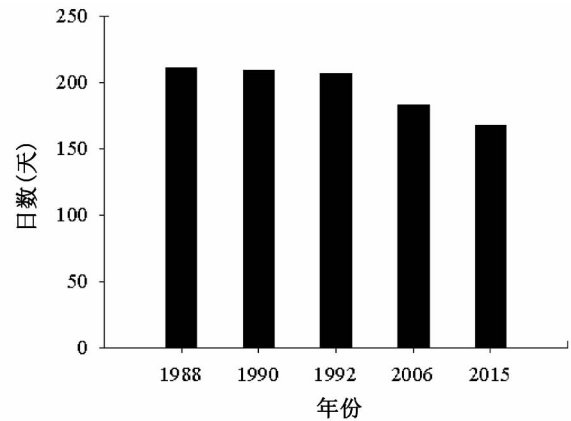


图4 流域内积雪观测年份积雪日数分布图

Figure 4 Change of snow cover days in Kong-Bingdou basin

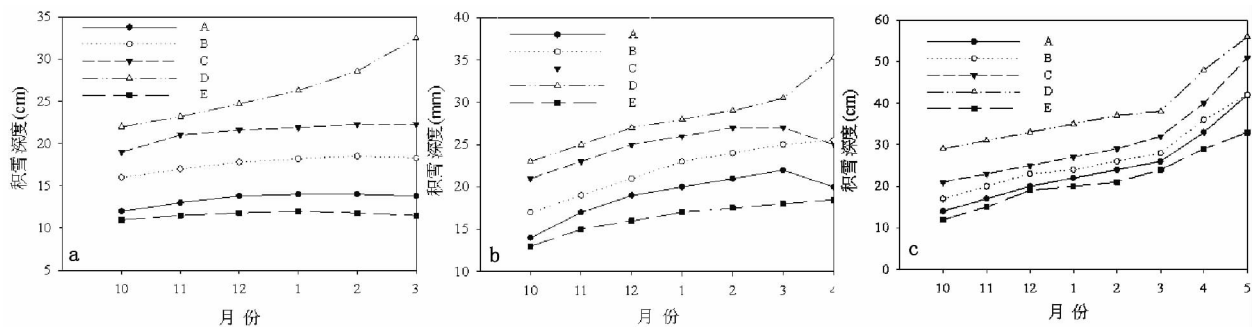


图5 流域内积雪深度随时间的变化趋势

Figure 5 Snow depth change in Kong-Bingdou basin

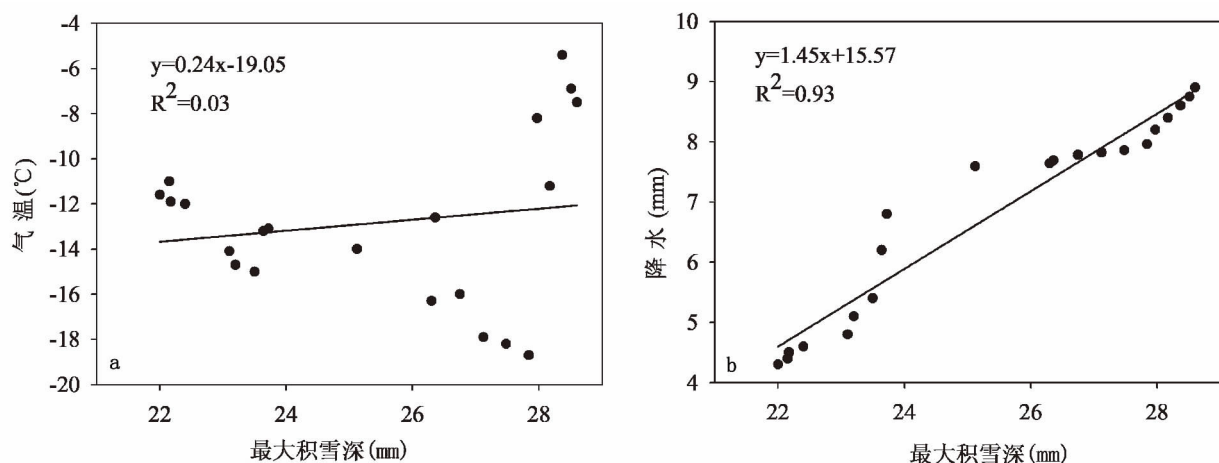


图6 最大积雪深度与降水、气温的相关性分析

Figure 6 Correlations of snow depth with temperature and precipitation

2.3 最大积雪深度和气温、降水的关系

为了进一步探明流域内积雪与气候的关系,文中将最大积雪深度与气温、降水做了相关性的分析(图6),从(图6b)可以看出,在积雪稳定期,最大积雪深度与降水的相关性很好,相关系数超过了0.9,而当我们把最大积雪深度与稳定期气温进行相关分析时(图6a),可以看到,两者的相关性很差,几乎可以说没有相关性,因为相关系数仅为0.03。这说明,在积雪稳定期,对季节性积雪深度影响最大的还是流域内的降水情况,而同一时间内,气温对积雪深度几乎没有影响。

3 讨论

由于仅在上世纪90年代张志忠、杨大庆^[10 22 25 26]对空冰斗积雪进行过较为深入的研究;2006年天山冰川站恢复对空冰斗的积雪观测后,李效收^[15]等又进行过部分研究。新疆气候由暖干向暖湿转化已经成为不争的事实^[27],乌鲁木齐河是新疆维吾尔自治区首府乌鲁木齐市的主要水源,研究河源区的积雪水资源对合理利用水资源有着重要的意义^[15]。在气候变暖的大背景下,流域内积雪与气候之间存在着怎么样的关系?近30年来季节性积雪的变化趋势怎样?文中观测并分析了空冰斗季节性积雪的变化特征及其与气温、降水之间的关系,并得出了相应的结论。但是影响积雪分布的因素除过气温和降水这两种主要因素外,还有太阳辐射强度、下垫面性质等,所以我们仍需要进行长期的、系统的观测,进一步分析和探究流域内积雪与气候之间的耦合关系。

空冰斗季节性积雪在稳定期,由于受到山谷环流的影响,有时会发生风吹雪的现象,而就目前现有的观测条件来说,很难对风吹雪^[28]进行系统的观测和分析。因此在以后的工作中,希望能够运用更多先进的观测技术,弥补和完善本次观测的不足。

4 结论

(1)就整个空冰斗小流域来说,近30年来,冬、春季的气温和降水总体趋势是增加的,冬季气温和降水的增加幅度很小,在正常的波动范围;春季气温和降水增加显著,气温的增加幅度约为 $0.8^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$,降水的增加主要受到乌鲁木齐河源1号冰川降水补给的影响。

(2)在气候变暖的大背景下,季节性积雪的稳定期持续时间约为6个月(168天),这与上世纪90年代初期积雪稳定期持续时间8个月(210天左右)相比,有明显的缩短趋势。这主要是由于气温的升高加速了积雪的提前融化导致的。积雪的最大厚度出现在海拔3865m处,这一高度以下,积雪深度随海拔升高呈现出上升趋势,而这一高度以上的地区则相反,主要是受到小流域内局地气象和环境因素特殊性的影响。

(3)对研究期内最大积雪深度与冬季气温、降水量进行相关性分析,发现,流域内冬季降水量与积雪深度的相关性较高,而气温与积雪深度几乎没有相关性。这说明在积雪稳定期,流域内降水量是影响积雪深度的主要气象因素。

参考文献

- [1]Santer B D, Painter J, Mears C A, et al. Identifying human influences on atmospheric temperature: Are results robust to uncertainties? [C]// AGU Fall Meeting Abstracts, 2012, 1: 1.
- [2]秦大河. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6.
- [3]巢清尘, 周波涛, 孙颖, 等. IPCC 气候变化自然科学认知的发展[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 7-13.
- [4]何丽烨, 李栋梁. 中国西部积雪类型划分[J]. 气象学报, 2012, 70(6): 1292-1301.
- [5]沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(1): 水文效应[J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 513-527.
- [6]李培基. 中国季节积雪资源的初步评价[J]. 地理学报, 1988, 43(2): 108-119.
- [7]窦燕, 陈曦, 包安明, 等. 2000-2006年中国天山山区积雪时空分布特征研究[J]. 冰川冻土, 2010, 32(1): 28-34.
- [8]高卫东, 魏文寿, 张丽旭. 近30a来天山西部积雪与气候变化-以天山积雪雪崩研究站为例[J]. 冰川冻土, 2005, 27(1): 68-73.
- [9]李培基. 新疆积雪对气候变暖的响应[J]. 气象学报, 2001, 59(4): 491-501.
- [10]张志忠, 杨大庆. 乌鲁木齐河流域季节积雪的基本特征[J]. 冰川冻土, 1992, 14(2): 129-133.
- [11]沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(II): 灾害效应[J]. 冰川冻土, 2013, 35(56): 1355-1370.
- [12]Wang S, Zhang M, Li Z, et al. Glacier area variation and climate change in the Chinese Tianshan Mountains since 1960[J]. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21(2): 263-273.

- [13]李忠勤,沈永平,王飞腾,等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川消融对气候变化的响应[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(3): 132–137.
- [14]张明军,王圣杰,李忠勤,等. 近50年气候变化背景下中国冰川面积状况分析[J]. 地理学报, 2011, 66(9): 1155–1165.
- [15]李效收,张明军,王飞腾,等. 天山乌鲁木齐河源区空冰斗积雪特征[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(12): 102–107.
- [16]窦燕,陈曦. 基于站点的中国天山山区积雪要素变化研究[J]. 地球科学进展, 2011, 26(4): 441–448.
- [17]李培基. 1951–1997年中国西北地区积雪水资源的变化[J]. 中国科学(D辑), 1996, 29(增刊1): 63–69.
- [18]于灵雪,张树文,卜坤,等. 雪数据集研究综述[J]. 地理科学, 2013, 33(7): 878–883.
- [19]韩添丁,李忠勤,叶柏生. 乌鲁木齐河源空冰斗径流增大的原因分析[J]. 冰川冻土, 2003, 25(4): 389–393.
- [20]焦克勤,叶柏生,韩添丁,等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川径流对气候变化的响应分析[J]. 冰川冻土, 2011, 33(3): 606–611.
- [21]李忠勤. 天山乌鲁木齐河源1号冰川近期研究与应用[M]. 北京: 气象出版社, 2011: 1–3.
- [22]杨大庆,王纯足,张寅生,等. 乌鲁木齐河源高山区季节积雪的分布及其密度变化[J]. 地理研究, 1992, 11(4): 86–96.
- [23]普宗朝,张山清,李景林,等. 近50a新疆 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 持续日数和积温时空变化[J]. 干旱区研究, 2013, 30(5): 781–788.
- [24]胡列群,李帅,梁群超. 新疆区域近50年积雪变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 793–800.
- [25]张志忠,杨大庆. 乌鲁木齐河流域季节积雪观测结果的一些说明//中国科学院旱区与旱区研究工程所天山冰川观测试验站年报(第10卷)[R]. 兰州: 天山冰川观测试验站, 1991: 37–40.
- [26]张志忠. 1992–1993年度乌鲁木齐河源区季节性积雪观测的结果//中国科学院旱区与旱区研究工程所天山冰川观测试验站年报(第12卷)[R]. 兰州: 天山冰川观测试验站, 1993: 59–66.
- [27]韩添丁,叶柏生,丁永建,等. 乌鲁木齐河流域径流增加的事实分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(5): 655–659.
- [28]王中隆. 中国积雪, 风吹雪和雪崩研究[J]. 冰川冻土, 1988, 10(3): 273–278.

The response of seasonal snow accumulation to the global warming in Kong – Bingdou basin during the past 30 years

ZHANG Peng¹, LI Zhongqin^{1,2}, JIN Shuang², HUAI Baojuan²

(1. College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences/Tianshan Glaciological Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Based on data of Kong – Bingdou meteorological station in Urumqi River basin for the period of 1987 – 2014 and the seasonal snow cover data of 1987 – 1993/2006 – 2007/2014 – 2015 of the Kong – Bingdou observations, we analyzed the relationships between the thickness of snow in the region, the number of days of snow cover variation and the temperature and precipitation. The results showed that: 1) In the snow stable periods, temperature and precipitation increased generally, and this trends occurred mainly in the spring. 2) The stable snow cover duration was decreasing significantly. The maximum depth of snow occurred at an altitude of 3865m; below the altitude, the snow depth showed rising trend with elevation rise, and above the altitude 3865m, it was opposite. 3) In the snow stable period, the impact of precipitation on maximum snow depth was far greater than other meteorological factors such as temperature.

Key words: Kong – Bingdou basin; snow accumulation; temperature; precipitation; maximum snow depth; headwater of Urumqi River basin