第26卷 第12期	干旱区资源与环境	Vol. 26 No.
2012 年 12 月	Journal of Arid Land Resources and Environment	Dec. 20

Journal of Arid Land Resources and Environment

12 Dec. 2012

文章编号:1003-7578(2012)12-102-06

# 天山乌鲁木齐河源区空冰斗积雪特征

李效 $\psi^1$ ,张明军<sup>12</sup>,王飞腾<sup>2</sup>,李忠勤<sup>12</sup>,王圣杰<sup>1</sup>,汪宝龙<sup>1</sup> (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冰冻圈科学国家重点实验室/天山冰川站 兰州 730000)

提 要: 根据 2006 年 12 月至 2007 年 4 月天山乌鲁木齐河源区空冰斗季节性积雪的观测资料,分析了该 区域积雪厚度、积雪温度及积雪储水量的变化特征。结果表明:空冰斗积雪在观测初期比较稳定 随着降水量 增加 积雪厚度也随之增加 4 月中旬达到最大值 季节性积雪的持续时间约为 7 个月;积雪厚度最大值一般出 现在海拔 3830m 附近,这一高度以下积雪厚度随海拔升高呈现增加的趋势,而在这一高度以上则呈相反趋势; 积雪温度受气温影响明显,在观测期内随着气温的升高积雪温度也逐渐上升;研究期内积雪储水量高于上世纪 90年代初的同期观测值。

关键词:空冰斗;积雪;降水;储水量;乌鲁木齐河源 中图分类号: P426.63<sup>+</sup>5 文献标识码: A

积雪是冰冻圈的重要组成部分、对气候变化的响应十分敏感[1-7]。伴随着全球范围内的大幅度增温, 积雪作为一种特殊的下垫面 以其高反射率、低导热率以及融雪水文效应对地球能量和辐射平衡以及水分 循环产生深刻的影响<sup>[8]</sup>。积雪融化后所产生的大量水分会改变土壤水文状况,参与地表径流,从而对水 文和水资源调节产生巨大影响<sup>[9-10]</sup>。新疆是西北干旱区的主体,地表水资源匮乏,但季节性积雪水资源 丰富,占全国积雪水资源总量的1/3<sup>111</sup>。在近50a来新疆冬季增温十分显著的背景之下,积雪长期变化表 现为显著的年际波动过程叠加在长期缓慢的增加趋势之上,并且积雪增加趋势与降雪量趋势相一致<sup>[12]</sup>; 山区集中了积雪的大部分,山区的年均积雪厚度是平原地区的3~11倍,西天山、阿尔泰山、塔城的塔尔巴 哈台山、帕米尔山是新疆积雪资源最丰厚的地区<sup>[13]</sup>。

天山作为横亘于新疆中部的"湿岛",冬季降雪丰沛<sup>[14]</sup>,是新疆许多河流的发源地。研究表明,1959~ 2003 年天山山区最大积雪深度具有明显的增加趋势,倾向率为 1.15 cm/10a<sup>[15]</sup>; 2000~2006 年天山山区 积雪面积年际变化略呈上升趋势、冬季上升趋势较明显、春、秋和夏季变化趋势不明显[16]。 乌鲁木齐河源 区天山山区冰冻圈定位监测最为系统的区域 因此也是季节性积雪定位观测的理想区域之一。早在20世 纪80年代末,已有不少学者对河源区的季节性积雪进行了相关研究。杨大庆等<sup>[17]</sup>对乌鲁木齐河源1号 冰川与空冰斗积雪的时空特征进行了初步的分析 发现该区域的稳定积雪期长达6个月 空冰斗内的积雪 厚度基本上呈东南 – 西北向条带状分布。张志忠等<sup>[18]</sup>对空冰斗地区积雪空间分布特征的影响因素进行 了进一步的研究,并阐释了地形对积雪的影响。然而,针对乌鲁木齐河源区空冰斗季节性积雪的观测在 20世纪90年代中断,此后对该区域季节性积雪没有开展过相应的观测研究 20世纪末以来,天山山区气 候普遍呈现出暖湿化的趋势,对冰冻圈产生了显著的影响<sup>[19-21]</sup>。为了进一步认识当前气候背景下该区域 季节性积雪特征 把握积雪水资源的变化规律 合理配置水资源 自 2006 年起中国科学院天山冰川站恢复 了对这一地区季节性积雪的观测。10 月初空冰斗地区开始出现积雪现象 但由于厚度较小 观测比较困 难,故文中选取2006年12月至2007年4月的观测数据,分析冬半年空冰斗积雪厚度、积雪温度及积雪储 水量的变化特征。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41161012 41171057);教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0019);国家重点基础 研究发展计划 (973) 项目(2010CB951003); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2 - EW - 311); 冰冻圈科学 国家重点实验室项目(SKLCS-ZZ-2010-04)资助。

作者简介: 李效收(1986 – ), 男, 硕士生, 主要从事气候与冰川研究。 E – mail: lixiaoshou007@163. com

通讯作者: 张明军,男,教授,博导,主要从事气候与冰川研究。E-mail: mjzhang2004@163.com

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2011-12-8; 修回日期: 2012-1-2。

## 1 站点与数据

乌鲁木齐河源区空冰斗(43°07′~43°08′N; 86°49′~86°50′E),位于天山乌鲁木齐河源1号 冰川东北侧,空谷最长延长深度为1.55km,总面 积为1.62km²,斗口朝向东南,海拔为3820~ 4360m<sup>[22]</sup>。空冰斗地区1986~2001年平均降 水量为488mm,较1958~1985年的426mm高出 了12.7%,自1985年以来,有明显的由暖干向 暖湿变化的特征<sup>[23]</sup>。中国科学院天山冰川站曾 于1987~1993年对该区域的季节性积雪进行过 观测,期间共布设8排共42根量雪尺。2006 年,天山冰川站恢复了这一观测项目,共布设5 排,15根量雪尺(图1)。积雪厚度由雪尺测得, 温度由热敏电阻温度计测得,积雪密度用 Snowfork 雪特性分析仪测得,储水量根据积雪厚度与 密度等数据计算得来,即



图 1 空冰斗积雪观测点分布 Fig. 1 The distribution of the observation sites

for snow cover in the Empty Cirque basin



式中: S 为储水量(m<sup>3</sup>) A 为积雪面积(m<sup>2</sup>)  $\rho_i$  为第 i 层积雪的密度(kg•m<sup>-3</sup>)  $h_i$  为第 i 层积雪的厚 度(m)。





# 2 结果与分析

#### 2.1 季节性积雪的时间变化

图 2 反映了研究期内空冰斗积雪厚度的变化与同期的气象状况。从图 2a 中可以看出,该区域内不同 雪尺测得的积雪厚度自 12 月至次年的4 月普遍呈上升趋势。以 D 排雪尺为例,测得的积雪厚度观测初期 的平均为 26.7 cm *A* 月最后一次观测值平均为 35.3 cm。此外,从图 2b 可以看出,研究区降水量总体上是 增加的,且以固态降水为主,积雪厚度的变化曲线与降水量存在明显的相似性;但是 3 ~4 月降水量持续增 加积雪厚度并未呈现出完全一致的趋势,在海拔较低的 A 排与 C 排甚至出现了一定程度的降低,这说明 积雪主要受温度与降水等因子的控制,但是纬度、海拔高度和下垫面等自然条件可能也会对其产生影响<sup>[24~26]]</sup>。在新疆近50a来气温呈上升趋势<sup>[27]</sup>的背景下,季节性积雪稳定期随之发生了变化,2007年4月11日空冰斗积雪表层开始融化,季节性积雪持续约7个月,稳定期与20世纪90年代早期研究<sup>[18]</sup>相比较短。

#### 2.2 季节性积雪的空间变化

不同排雪尺按照海拔高度的差异布设(图3) 因此可以通过不同排雪尺的积雪厚度对空冰斗积雪的 空间变化进行分析。空冰斗的季节性积雪厚度最大值出现在 3830 m 附近(D 排雪尺处),这一高度以下 随着海拔的升高积雪厚度呈现出增加的趋势,而在这一高度以上积雪厚度则随着海拔的升高开始减少。 A 排雪尺和 E 排雪尺自 12 月至次年4 月所测得的积雪厚度较小,这是由于 A 排位于海拔相对较低的东南 坡脚 E 排大致位于冰斗的北面山坡,两地接受的太阳辐射相对较多。D 排雪尺位于空冰斗的中部地区, 属阴影区域且地表坡度比较缓和,所以此处的积雪厚度相对较大。由于空冰斗斗口朝向东南,所以可认为 积雪由东南向西北呈规律性分布,这与杨大庆等人<sup>[17]</sup>认为积雪厚度基本上呈东南-西北向条带状分布规 律是一致的。







图 4 2007 年 4 月 11 日空冰斗积雪空间分布 Fig. 4 Snow cover depth distribution in the Empty Cirque basin 0n April 11th 2007

为了进一步研究空冰斗积雪厚度的变化,对该区 2007 年 4 月 11 日积雪空间分布进行了分析(图 4), 虽然最大积雪厚度出现在 C1 雪尺位置,但 D 排雪尺处的平均积雪厚度仍然为最大值。气温的升高对积

雪融化起到积极作用,此时海 拔相对较低的山谷地区日最 高气温在 0℃以上,积雪表层 开始有融化现象。如图 4 所 示位于山谷底部积雪厚度机 对较小,气温升高对积雪的大面积融化,有加。而后随着积 雪的大面积融化,在山谷最子 的下,气温升高高气温 的在 0℃以下,气温升。高高机器 有明显的融化现象,积雪厚度 相对于山谷较大。 2.3 积雪温度的变化



Fig. 5 The snow cover temperature changes from January 13th to April 11th in 2007

图 5 是 A2、B2、C2、D2、

E2 雪尺处的观测所得出积雪温度变化曲线图。从图 5 可以看出 积雪温度受气温影响明显,在观测期间

随着气温的升高积雪温度也逐渐上升。1 月中旬,除 B2 处雪尺测得的积雪温度随厚度增加而下降外,其 余雪尺处测得的积雪温度在0~5 cm 之间随厚度增加而下降,而在 5 cm 以下随厚度增加而上升,温度梯度 (即雪层内温度随单位厚度的变化量)在0~5 cm 之间为负值 5 cm 以下为正值。2 月中旬和4 月中旬所 有雪尺测得的积雪温度随厚度的增加而下降,呈现出很好一致性。以 D2 排雪尺为例,1 月中旬温度梯度 为  $-0.42 \, \mathbb{C} \cdot \text{cm}^{-1}(0~5 \text{cm}) \ 0.34 \, \mathbb{C} \cdot \text{cm}^{-1}(5~20 \text{cm}),$ 表明积雪温度随厚度增加先下降而后上升。2 月中旬和4 月中旬的温度梯度分别为  $-0.6 \, \mathbb{C} \cdot \text{cm}^{-1}(0~5 \text{cm}) \ -0.02 \, \mathbb{C} \cdot \text{cm}^{-1}(5~20 \text{cm})$ 和  $-0.12 \, \mathbb{C}$ · cm  $^{-1}(0~5 \text{cm}) \ -0.21 \, \mathbb{C} \cdot \text{cm}^{-1}(5~20 \text{cm})$ ,这表明积雪温度随厚度增加而下降。

导致上述积雪温度变化的原因是由于冬季气温迅速下降,而地面温度下降相对较慢,地面温度略高于 空气温度,雪层底部的温度主要受到地面温度的影响,致使雪层底部的温度升高。随着消融期的到来,气 温、积雪温度和地面温度都会升高,气温的上升速度远远超过地面温度的上升速度,积雪粒层的温度梯度 变小,并且温度梯度变为负数,所有雪尺处测得的积雪温度随着厚度增加而下降。当表面积雪开始融化 时,整个积雪层的温度梯度转变为接近于等温的状况。

2.4 积雪储水量变化

积雪在观测初期相对稳定,仅有少量的降雪补 给 积雪的储水量也相对稳定(图6)。随着降雪量 的增加,积雪的压实、堆积使得积雪密度增大,储水 量上升趋势明显。2007年4月11日积雪开始有融 化现象,所以停止了对积雪储水量的观测工作,此次 观测结果表明储水量的变化范围为4312~13861m<sup>3</sup>。 据张志忠等<sup>[29,30]</sup>的观测资料计算,1990~1993年的 平均储水量变化范围为1951~12147m<sup>3</sup>。

研究期内储水量高于上世纪90年代初的记录, 这可能是该区域降水量增加<sup>[28]</sup>的表现之一。积雪 的储水量达到最大值是在4月中旬,空冰斗地区在5 月份开始形成地表径流<sup>[23]</sup>,地表径流形成约比储水 量达到最大值滞后半个月,可见积雪融水转化为地 表径流需要一定时间。



图 6 2006 年 12 月 - 2007 年 4 月积雪储水量变化 Fig. 6 Variation of water store form December 2006 to April 2007

### 3 讨论

由于观测资料的限制,国内对高山地区季节性积雪的研究并不多见,而针对乌鲁木齐河源空冰斗地区 季节性积雪的研究仅局限在 20 世纪 90 年代。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。张志忠、杨大庆<sup>[17,18,29,30]</sup>曾对空冰斗 地区季节性积雪做出了深入研究,分析了季节性积雪的形成条件、分布规律、物理特性以及气象因子和雪 密度之间的关系。50a 来新疆暖湿化显著,积雪对气候变化的响应十分敏感,空冰斗地区的季节性积雪又 将如何变化,与气候之间的关系如何?为了承接前人的工作,我们开展了相应的研究,但是积雪的分布还 受到多种因素的影响,如下垫面的性质、局部的山区环流、太阳辐射的多寡等,而空冰斗地形十分复杂,因 此在未来仍需要长期的观测,用以进一步研究该地区季节性积雪与气候之间的耦合关系。

储水量是衡量积雪水资源的常用指标之一,对其进行定量评估对优化水资源配置尤为重要,然而相关 的实测研究却十分匮乏,文中尝试从储水量的角度丰富了对于这一领域的认识。积雪密度是计算积雪储 水量的关键数据,该数据的准确性直接影响到储水量计算的精确性,在测量积雪密度时,我们一改传统的 称重法,采用目前国内外普遍推广的 Snowfork 雪特征分析仪进行测量。

此外 积雪大面积融化后,并不是所有的融雪水都能够转化为地表径流,还有一部分融雪水下渗保留 在土壤中 积雪的储水量并不等于地表径流量,所以对转化为地表径流的融雪水的评估工作是比较困难 的。尽管如此,为了能够更合理有效的利用水资源,相关的观测与模拟工作仍有待进一步开展。

# 4 结论

采用 2006 年 12 月至 2007 年 4 月乌鲁木齐河源区空冰斗季节性积雪的观测资料,对该区域季节性积 雪特征进行定量化分析,得出以下结论:

(1)积雪在观测初期比较稳定 随着降水量的增加,积雪厚度也随之增加 A 月中旬达到最大值,季节 性积雪的持续时间约7 个月,与早期研究相比较短。

(2) 积雪厚度最大值出现在海拔 3830m 附近 这一高度以下的地区积雪厚度随海拔的升高呈现出增 大的趋势 ,而在这一高度以上地区则相反。

(3) 积雪温度受气温影响明显 在观测期间随着气温的升高 积雪温度也逐渐上升。但是冬季地面温度略高于空气温度 ,雪层底部的温度主要受到地面温度的影响 ,致使雪层底部的温度升高 ,积雪温度随积雪厚度的增加先下降后上升。随着融雪季节的到来 ,气温的上升速度远远超过地面温度的上升速度 积雪温度随积雪厚度的增加而下降。

(4)研究期内测得的储水量高于 20 世纪 90 年代初的同期观测值,这可能是该区域降水量增加的表现之一。春季地表径流的形成时间约比储水量达到最大值的时间滞后半个月。

#### 参考文献

- [1] Cruz R V, Harasawa H, Lal M, et al. Asia [M]. Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, et al. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007:471-506.
- [2] Chen Yaning, Xu Changchun, Chen Yapeng, et al. Response of snow cover to climate change in the periphery mountains of Tarim river basin, China, over the past four decades [J]. Annals of Glaciology, 2008, 49: 66 - 172.
- [3] Flanner M G, Zender C S, Hess P G, et al. Springtime warming and reduced snow cover from carbonaceous particles [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, 9: 2481 – 2497.
- [4]Schirme M, Lehning, M, Schweizer J, et al. Statistical forecasting of regional avalanche danger using simulated snow cover data [J]. Journal of Glaciology, 2009, 193(55): 761 – 768.
- [5] Bogdan Gadek Jan Leszkiewicz J. Influence of snow cover on ground surface temperature in the zone of sporadic permafrost, Tatra Mountains, Poland and Slovakia [J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 60(3): 205-211.
- [6] Golubev V N, Petrushina M N, Frolov D M. Winter regime of temperature and precipitation as a factor of snow cover distribution and its stratigraphy[J]. Annals of Glaciology, 2008, 49: 179 – 186.
- [7] Yang Jianping, Ding Yongjian, Liu Shiyin, et al. Variations of snow cover in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers in China between 1960 and 1999 [J]. Journal of Glaciology, 2007, 182(53): 420-426.

[8]高荣,韦志刚,董文杰,等.20世纪后期青藏高原积雪和冻土变化及其与气候变化的关系[J].高原气象,2003,22(2):191-196.

[9]曾群柱,张顺英,金德洪.祁连山积雪卫星监测与河西地区河流融雪径流特征分析[J].冰川冻土,1985,7(1):295-304.

[10]丁贤荣. 高山增水效应及其水资源意义[J]. 山地学报, 2003, 21(6):681-685.

[11]李培基. 中国季节积雪资源初步评价[J]. 地理学报, 1988, 43(2): 108-119.

[12]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.

[13] 崔彩霞,杨青,王胜利. 1960-2003年新疆山区与平原积雪长期变化的对比分析[J].冰川冻土,2005,27(4):486-490.

[14]徐俊荣,仇家琪.天山地区 30 年来冬季降雪波动研究[J].冰川冻土,1996,18(增刊):123-128.

[15] 杨青,崔彩霞,孙除荣,等. 1959-2003年中国天山积雪的变化[J]. 气候变化研究进展,2007,3(2):80-84.

- [16] 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.
- [17] 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.
- [18]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.
- [19] Wang Shengjie, Zhang Mingjun, Li Zhongqin, 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.
- [20]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.
- [21]李忠勤,沈永平,王飞腾,等.冰川消融对气候变化的响应-以乌鲁木齐河源1号冰川为例[J].冰川冻土,2007,29(3):333-342.
- [22] 白重瑗,大畑哲夫,木通口敬二.天山乌鲁木齐河源冰川与空冰斗辐射气候的计算结果[J].冰川冻土,1989,11(4):336-349.
- [23] 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.
- [24] Cohen J, Rind D. The effect of snow cover on the climate [J]. Journal of Climate , 1991, 4:689-706.
- [25] 陈兴芳, 宋文玲. 欧亚和青藏高原冬春季积雪与我国夏季降水关系的分析与预测应用[J]. 高原气象, 2000, 19(2): 214-223.
- [26]郭其蕴,王继琴.青藏高原的积雪及其对东亚季风的影响[J].高原气象,1986,5(2):116-123.
- [27] 邓振镛,张强,尹宪志,等. 干旱灾害对干旱气候变化的响应[J]. 冰川冻土,2007,29(1):114-118.
- [28] 康尔泗, Ohmura A. 天山冰川作用流域能量、水量和物质平衡及径流模型[J]. 中国科学(B辑), 1994, 24(9): 983 991.

[29]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//中国科学院寒区旱区环境与工程研究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.

[30]张志忠. 1992 - 1993 年度乌鲁木齐河源区季节性积雪的观测结果//中国科学院寒区旱区环境与工程研究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年报,1993:59 - 61.

# Characteristics of snow cover at the Empty Cirque basin in the headwaters of Urumqi River , Tianshan Mountains

LI Xiaoshou<sup>1</sup> , ZHANG Mingjun<sup>1,2</sup> , WANG Feiteng<sup>2</sup> , LI Zhongqin<sup>1,2</sup> , WANG Shengjie<sup>1</sup> , WANG Baolong<sup>1</sup>

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

**Abstract**: Based on observed data of seasonal snow cover at the Empty Cirque basin in the headwaters of Urumqi River from December 2006 to April 2007, Tianshan Mountains, we analyzed the variation characteristic about depth, temperature, water store of snow cover. The results are as follows: The snow cover was stable in the preliminary stage. With the precipitation decreasing, the depth of snow cover was increasing. Its maximum value was in the mid April 2007 and it lasted about 7 months. The maximum depth of the snow cover appeared in elevation 3830 m. With the elevation increasing, the depth of the snow cover was increasing above the elevation while decreasing below the elevation. The snow cover temperature was impacted by the temperature significantly, and it was increasing gradually with the temperature increasing during the observed period. At the same time the water store was higher than that of 1990s.

Key words: Empty Cirque basin; snow cover; precipitation; water store; the headwaters of Urumqi River