

doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0033

Sun Caiqi, Li Chuanchuan, Chen Yixin, *et al.* A long term monitoring of frost heaving in periglacial environment in the Tianshan Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(2): 272-279. [孙才奇, 李川川, 陈艺鑫, 等. 天山冰缘环境活动层冻融过程定位观测研究[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(2): 272-279.]

天山冰缘环境活动层冻融过程定位观测研究

孙才奇, 李川川, 陈艺鑫, 张 梅, 聂振宇, 刘耕年*

(北京大学 城市与环境学院, 北京 100871)

摘 要: 冻融作用是冰缘环境的一个重要地貌过程, 其活动性直接反映气候变化, 成为冰冻圈过程研究的重要内容。依据天山乌鲁木齐河源 1991—2011 年石环长期定位观测资料, 对天山大陆性冰缘环境中石环发育特点和冻融作用机制进行深入探讨。结果表明: 乌鲁木齐河源区石环冻胀作用在地表 20 cm 内最强, 直径为 3 cm 的定位桩受到的冻胀作用最小, 石环从中心向边缘冻胀作用变弱; 对比石环发育和无石环的地表, 前者冻融作用更强; 海拔对冻胀作用有明显影响, 在布设观测点的海拔 3 500~4 000 m 范围内, 随海拔上升, 冻胀作用增强, 到海拔 3 900 m 达到最大, 显示与当地现代冰川平衡线高度的吻合性。相关性分析表明, 气候因素中夏季水热条件对石环发育作用较大, 其中夏季降水对冻胀作用的影响显著, 一年中地温在 0 °C 波动的天数也是重要的影响因素; 石环活动层定位观测揭示出冰缘地貌对区域气候变化反应敏感, 对近 20 a 温度升高有积极响应。

关键词: 天山; 石环; 冻融作用; 气候变化

中图分类号: P931.4 **文献标识码:** A

0 引言

冻融作用是冰缘环境中的主要地貌过程之一, 在较地势平坦, 地表碎屑丰富处形成构造土等, 石环即是其中之一。自 1990 年起, 研究者对乌鲁木齐河源多处石环展开定位观测, 旨在通过长时期观测的石环冻胀情况, 结合地貌和气象观测资料, 对石环活动过程特点、活动性变化趋势、主要影响因素等进行深入研究, 揭示中纬干旱带高山冰缘环境中活动层的冻融过程及其对全球气候变化的响应。

乌鲁木齐河源(43°06' N, 86°50' E)位于天山中段喀拉乌成山脉北坡, 区内山脊海拔约 4 100~4 300 m, 现代雪线高度海拔 3 950~4 200 m, 森林带上限海拔 2 600~2 900 m, 多年冻土下界海拔 2 900~3 100 m^[1-2]。据海拔 3 540 m 处大西沟气象站资料, 1990—2008 年间年平均气温 -6 °C, 年均降水量 405 mm, 降水主要集中在夏季(6—8

月)。

研究区海拔 3 000 m 以上的冰缘带, 在地形和土质条件合适部位发育了各种类型的构造土, 石环是其中代表性类型, 主要发育在海拔 3 600~3 900 m 之间。20 世纪 80 年代初, 季子修^[3]对本区石环形成的地貌和气候条件进行分析, 从形态、保存完好程度和有无植被发育等情况判断石环产生年代。从 1990 年代开始, 崔之久、熊黑钢、朱诚、刘耕年等在天山乌鲁木齐河源区开展了系统的冰缘地貌观测研究, 包括定位重复测量、坑探、物探、砾向结构及地衣测年、室内分析等, 对石环的形态、分选性、边缘砾石组构及发育的地形条件进行了观测^[4-14]。

1 观测点设置

研究区内分别在空冰斗最内部、空冰斗中部、空冰斗冰坎处、空冰斗外的公路旁、天山乌鲁木齐

收稿日期: 2012-09-09; 修订日期: 2012-12-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971002)资助

作者简介: 孙才奇(1987—), 男, 山东东营人, 2010 年毕业于山东科技大学, 现为北京大学城市与环境学院在读硕士研究生。

E-mail: suncai qi87@sina.com

* 通讯作者: 刘耕年, E-mail: liugn@pku.edu.cn



图 1 观测点位置示意图(底图来自 Google Earth)

Fig. 1 Location of the monitoring points

表 1 观测点位置和海拔

Table 1 Location and altitude of the monitoring points

点号	纬度/N	经度/E	海拔/m
C	43°07'10.98"	86°49'30.60"	3 929
B	43°07'23.34"	86°49'06.54"	3 870
A	43°07'35.45"	86°49'16.14"	3 823
D	43°07'03.54"	86°49'29.04"	3 777
E	43°06'48.30"	86°49'23.10"	3 659
F	43°06'53.76"	86°51'32.82"	3 454

河源 1 号冰川末端和 5 号冰川附近布设观测点，依次编号为 A、B、C、D、E、F，位置、海拔见图 1 和表 1。每个观测点均采用 30 根以上定位桩以不同类型、不同位置打入活动层，在每年的同一时间对冻胀高度进行观测记录。其中，A、B、C 观测点在空冰斗内，所处位置均有石环分布；D、E、F 观测点所处位置海拔不同，但没有石环发育，用来进行对比分析。根据定位桩类型又分为不同长度桩、不同直径桩、十字桩、石环外桩、不同海拔桩，依次编号为 1、2、3、4、5。

2 观测结果

2.1 不同深度冻胀表现

在 B、C 两点规模相近的石环中心布置直径 3.5 cm、长度不同(分别为 5 cm、10 cm、15 cm、20 cm、25 cm、30 cm、35 cm、40 cm)的定位桩，以便了解冻胀作用在石环内不同深度的表现，观测期为

1991—2011 年，冻胀高度采用年平均值(图 2，因长度为 5~20 cm 的木桩多数在一年内全部被冻胀出地表，实际冻胀远远大于测量数据，故在图中用灰色部分加问号表示未被测量的冻胀高度)。观测结果为在地表 20 cm 内冻胀作用表现最强，B、C 观测点这种现象均明显。

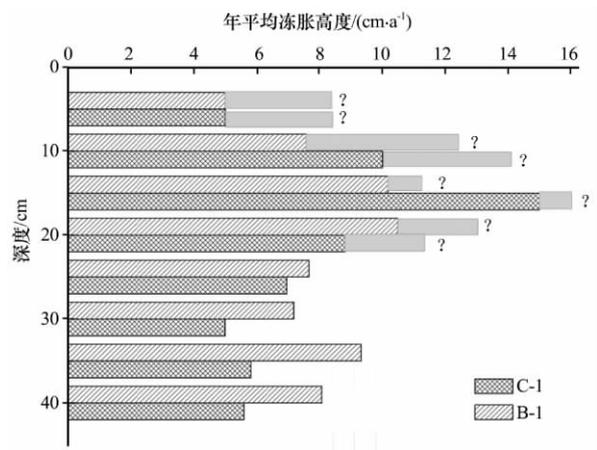


图 2 深度与冻胀作用的关系

Fig. 2 The relationship between buried depth and frost heaving

2.2 不同直径冻胀表现

在 B、C 观测点石环内布置长度为 35 cm、直径不同(分别为 1 cm、2 cm、3 cm、4 cm、5 cm)的定位桩，观察其冻胀作用表现，在一定程度上了解冻胀对不同粒径砾石的影响，观测期为 1991—2011 年，冻胀高度采用年平均值(图 3)。观测发现，在

相同地点、相同深度的情况下，直径为 3 cm 的木桩受到的冻胀作用最小，而随着直径增大或者减小，其冻胀高度都呈阶梯式增加。由于样本量有限，不便于详细解读，但这一现象值得关注。

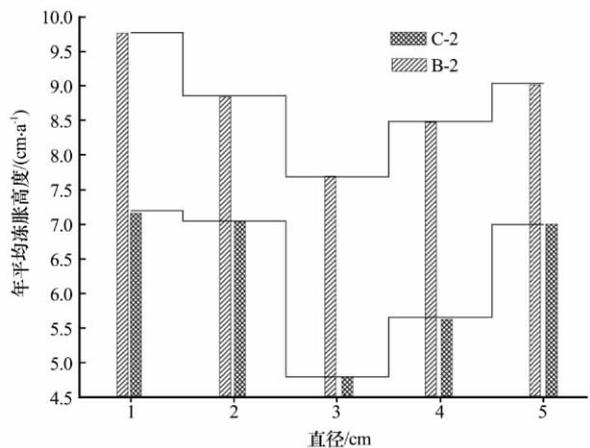


图 3 直径与冻胀作用的关系
Fig. 3 The relationship between the stake diameter and frost heaving

2.3 石环不同位置冻胀表现

A-3 点在 1990 年布设，为 15 根相同直径、相同长度的定位桩，按十字型分布于同一个石环内 (图 4)。为了更好的讨论同一石环内不同位置的冻胀作用，把定位桩又分为中心桩(4、5、6)、内缘桩(3、12、7、13)、外缘桩(2、11、8、14)和边缘桩(1、10、9、15)，年平均冻胀量分别为 4.2 cm、4.13 cm、3.83 cm、3.13 cm。总体看为中心桩 > 内缘桩

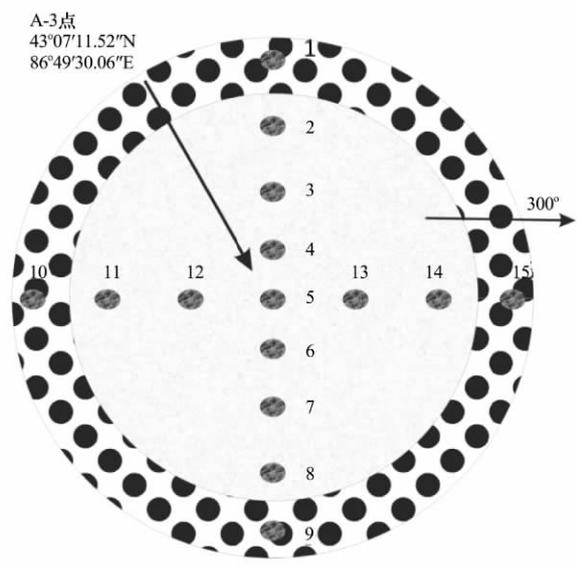


图 4 十字桩位置分布
Fig. 4 The layout of the cross stakes

> 外缘桩 > 边缘桩，石环的中心冻胀作用最强，内缘和外缘次之，边缘最弱。石环内所有位置的定位桩都有冻胀表现，说明石环外围的粗砾来源除了来自石环中心的分选，还有一部分是活动层直接冻胀作用的产物。

2.4 石环内外冻胀表现

在 B、C 两点没有石环发育的地方布置定位桩，以观测石环内外冻胀情况的不同表现。观测结果如图 5 所示，位于石环内的 B-3 和 C-3 十字桩的年均冻胀高度均大于位于石环外部的定位桩 B-4 和 C-4，说明石环发育的地方其冻融作用更加强烈。

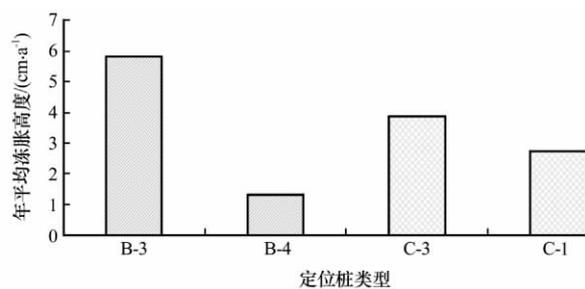


图 5 石环内外定位桩冻胀对比
Fig. 5 The annual mean heights of frost heave stakes inside the sorted circles (B-3 and C-3) and outside the sorted circles (B-4 and C-4)

2.5 不同海拔冻胀表现

研究区内 6 个观测点海拔位置均相差 50 m 或 100 m 左右 (表 1)，在没有石环发育的地方布置定位桩，以观测区域内不同海拔位置对活动层冻胀作用的影响。从表 2 中可以看出，观测点 C-5 年均冻胀高度明显要大很多，差不多是其他点的 2 倍，而其他 5 个点则相差不多，从观测上来看在海拔 3 900 m 左右活动层的冻胀作用明显加大，可能这个海拔位置的气候条件更适合冻胀作用。

表 2 观测点海拔高度与年均冻胀高度的关系
Table 2 The altitude and frost heave height at different points

点号	海拔/m	年均冻胀高度/cm
C-5	3 929	2.75
B-5	3 870	1.32
A-5	3 823	1.21
D-5	3 777	1.38
E-5	3 659	1.42
F-5	3 454	0.95

3 石环活动性分析与环境变化关系的讨论

3.1 活动性与变化趋势分析

空冰斗内有 3 处明显石环带，观测点为 A、B、C，其十字桩观测从 1991 年开始，一直到 2011 年，数据连续性比较强，对其做趋势变化分析。从图 6 中可发现，A 点石环定位桩的年平均冻胀高度从 1991 年到 2011 年总体呈下降的趋势，表明其冻胀作用在减弱，石环活动性在逐渐退化。在野外考察(图 7)中也发现该处石环形态不明显，其上发育有植被。C 点定位桩年平均冻胀高度则呈现上升趋势，表明其石环活动性在加强，野外观察其石环形态明显，分选性很好，没有植被发育；B 点定位桩的年平均冻胀高度在 3 个点中一直处于比较大的态势，且年际间变化幅度较大，野外观察其石环形态明显，分选性比 C 点更好，表明其石环活动性很强，冻胀作用强度高，并且其石环活动性容易受外部条件影响而发生变化。

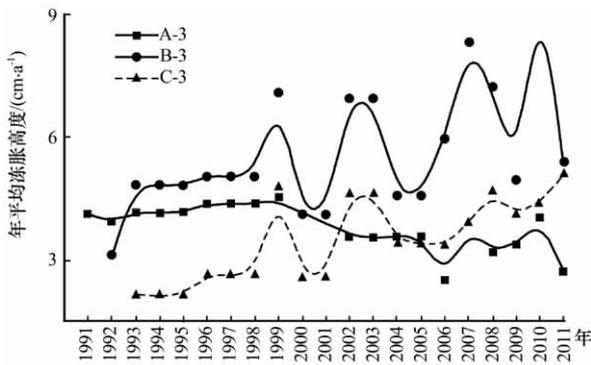


图 6 A、B、C 定位桩年平均冻胀高度变化趋势
Fig. 6 Variations of the annual average frost heave heights

3.2 冻融作用的影响因素分析

定位桩年平均冻胀高度反映的是该区冻胀作用的强弱，年平均冻胀高度越大，说明该区冻融作用

越强烈，而冻融作用的强与弱，则往往与气候直接联系。在此选取夏半年(5—10 月)平均气温、年平均气温、夏半年(5—10 月)降水量、年降水量、气温 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 持续天数、年平均相对湿度、日照时数(数据来自大西沟气象站)、多年冻土活动层厚度^[15]以及 B-3 十字桩年均冻胀高度作为变量来进行相关分析(表 3)。

运用 SPSS 软件对上述变量进行分析(表 4)，可以发现 B-3 桩冻胀高度同夏半年降水量的相关系数在几个因素中是最高的，达到了 0.878；而同时与多年冻土活动层厚度的相关系数也较高，达到了 0.833。而多年冻土的活动层受冻融作用影响，基本上是冻融作用越强，活动层厚度越大。据研究^[15]，多年冻土活动层厚度主要与夏半年水热状况关系密切。同时，河流径流、冰川径流、植被生长发育等^[16-20]均与夏半年水热状况关系密切。因此，可认为研究区内冻融分选作用强烈与否与夏半年水热状况关系最为密切。总的来说，夏半年降水量越大，冻融分选作用越强；而与气温的相关关系并不明朗，理论上应该是地温在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上下波动次数越多，则冻融作用越强，越有利于石环的发育，其原因尚需进一步研究。冻融分选作用是水热交互作用的结果，其影响机制有待进一步研究。

3.3 石环活动性、平衡线、活动层对气候变化的响应

在不同的气候条件下，地貌在一定程度上有其反映方式，通过长期观测研究，利于深入了解气候与地貌的相互反馈机制。根据气象资料，1992 年后天山乌鲁木齐河源一带气温呈上升趋势，年降水量正常波动(图 8)。通过对研究区内石环活动性的常年观测，发现在一定范围内其与气温有着正相关关系。活动层位于多年冻土层以上、具有冬季冻结、夏季融化的特征，与气候变化也有着密切关系。研究区内 1992—2008 年间，最小活动层厚度为 1.25



图 7 石环野外形态
Fig. 7 Photos of the sorted circles

表 3 研究区气象数据与 B-3 石环年均冻胀高度

Table 3 Meteorological data of the research area and annual average height of frost heave at B-3

观测年份	夏半年 平均气温/℃	年平均 气温/℃	夏半年 降水量/mm	年降 水量/mm	气温 ≥ 0 ℃ 持续天数/d	年平均 相对湿度/%	多年冻土 活动层厚度/m	日照时数 /h	B-3 桩 冻胀高度/cm
1992	0.65	-4.94	349.7	409.3	114	56.55	1.25	2449	3.12
1993	0.79	-4.92	430.3	462.8	133	57.28	1.40	2419	4.82
1994	0.83	-5.07	516.0	568.7	114	55.33	—	2451	4.82
1995	1.47	-5.26	391.6	449.1	125	53.09	—	2495	4.82
1996	1.42	-5.65	581.2	632.4	116	58.25	—	2510	5.03
1997	2.47	-4.03	350.2	388.1	142	55.56	—	2627	5.03
1998	2.22	-3.90	536.2	596.7	146	57.46	—	2466	5.03
1999	2.30	-4.07	477.9	529.0	133	53.88	—	2417	7.08
2000	1.59	-5.19	573.9	614.8	127	58.29	—	2469	4.11
2001	2.23	-4.36	413.7	438.6	135	57.42	1.43	2521	4.11
2002	2.36	-3.82	518.0	581.4	133	59.45	1.45	2410	6.93
2003	1.43	-4.85	424.3	459.0	131	60.12	1.42	2398	6.93
2004	1.84	-4.15	392.0	429.2	135	61.43	—	2552	4.56
2005	1.97	-4.76	441.9	499.6	134	66.28	—	2381	4.56
2006	2.48	-3.92	448.2	512.5	145	64.22	1.50	2431	5.95
2007	2.18	-3.76	532.3	603.8	139	59.21	1.60	2385	8.31
2008	2.84	-4.09	483.7	551.8	146	55.32	1.50	—	7.21

表 4 B-3 桩冻胀高度同各气候因素的相关系数矩阵

Table 4 Correlation matrix among climatic factors and height of frost heave at B-3

	夏半年 平均气温	年平均 气温	夏半年 降水量	年降水量	气温 ≥ 0 ℃ 持续天数	年平均 相对湿度	多年冻土 活动层厚度	日照时数	B-3 桩 冻胀高度
夏半年平均气温	1.000								
年平均气温	0.902	1.000							
夏半年降水量	0.672	0.823	1.000						
年降水量	0.654	0.864	0.974	1.000					
气温 ≥ 0 ℃持续天数	0.766	0.676	0.653	0.581	1.000				
年平均相对湿度	0.623	0.542	0.363	0.410	0.710	1.000			
多年冻土活动层厚度	0.751	0.790	0.859	0.817	0.873	0.539	1.000		
日照时数	0.060	-0.182	-0.543	-0.595	-0.146	-0.318	-0.375	1.000	
B-3 桩冻胀高度	0.546	0.635	0.878	0.859	0.595	0.500	0.833	-0.743	1.000

m^[15]，期间处于明显上升趋势，受夏季水热条件影响。冰川对气候变化的反应也非常敏感，天山乌鲁木齐河源 1 号冰川正好位于研究区内，其平衡线高度的年际变化很大，但总体还是有一个升高的趋势，与气温变化正相关，且夏季气温是影响冰川物质平衡变化的主控因子^[21-23]。

关于石环的活动机理有很多不同解释，大部分

都建立在由于冻结而体积膨胀、消融压力减小的几种冻结压力形式之上。这种变化会引起物质的冰冻翻浆作用和分选作用。如果存在非均质颗粒混合物，则形成分选石环、石网和多边形。各种形态的构造土是多成因的，是综合地貌作用过程的产物，而且类似的形态可以由不同的过程产生，同一种过程又可以形成不同的形态。虽然目前对于它的形成

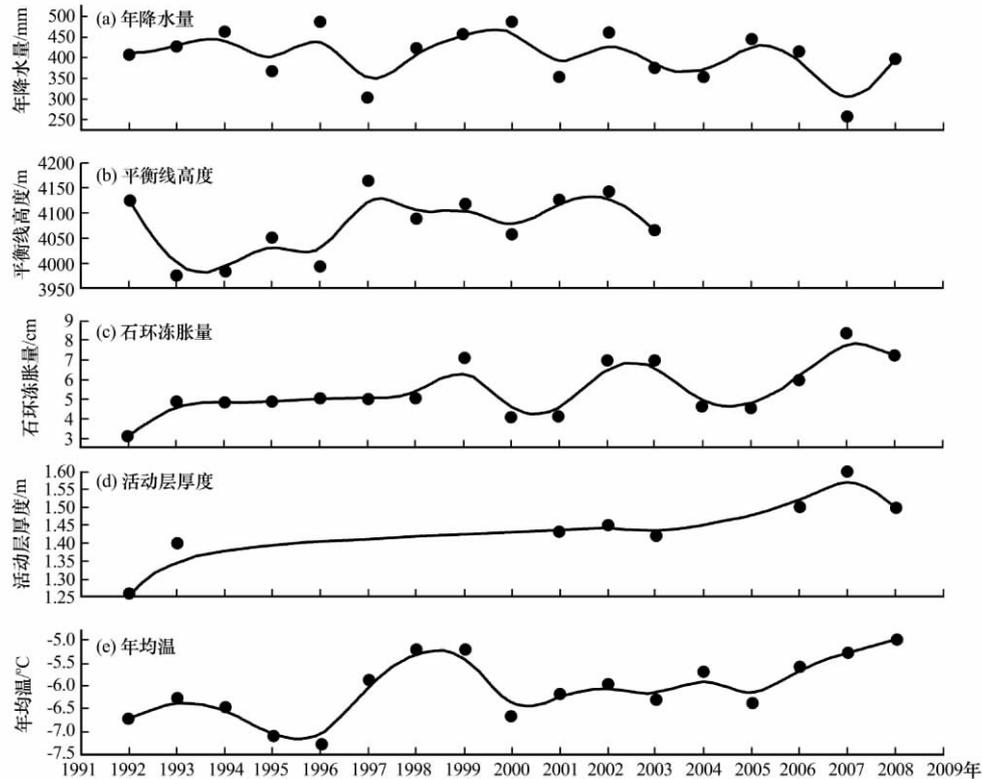


图 8 石环冻胀、平衡线高度、活动层厚度变化与气候条件的关系^[15, 22]

Fig. 8 Variations of annual precipitation, ELA, frost heave of sorted circles, thickness of active layer and annual mean temperature^[15, 22]

过程没有确切的定论, 但是无论如何, 冻融作用是最重要的形成因子。另外流水作用, 热力膨胀和收缩作用也很重要^[24-34]。

4 结论

石环为特征冰缘地貌, 以活动或遗留的形式出现, 其规模大小和活性是区域地貌、土质和气候条件的综合反映。多年冻土区活动层的定位观测是冰冻圈过程研究的重要内容, 观测数据可为冰冻圈变化趋势分析提供依据。本文依据在天山乌鲁木齐河源多年冻土区活动层石环的长期定位观测数据探讨了石环活动特征及其对气候变化的响应。结论如下:

(1) 观测结果总体反映石环冻胀作用在地表 20 cm 内最大; 不同直径(直径 1~5 cm)的测桩中 3 cm 木桩冻胀上升量最小; 在石环的不同部位也显示出冻胀作用的差异性, 中心冻胀作用最强, 越靠近边缘越弱; 在相同的观测条件下, 有石环发育的地表冻融作用比没有石环发育的地表更加强烈; 海拔高度对冻胀作用有影响, 总体表现为随海拔增高冻胀作用增强, 海拔 3 900 m 左右的冻胀作用最

大。

(2) 自 1900 年以来的观测结果表明, 空冰斗内石环的活动性表现出最内部(海拔 3 930 m)石环活动性越来越强, 中部(海拔 3 870 m)石环活动性保持稳定, 冰坎处(海拔 3 820 m)活动性越来越弱。

(3) 影响石环发育和冻胀作用的气候因素中夏季水热条件作用较大, 其中夏季降水对冻胀作用的影响显著, 一年中地温在 0 °C 波动的天数也是重要的影响因素。

(4) 综合对比研究区石环活动性、多年冻土活动层厚度和冰川平衡线高度观测结果及变化趋势均对区域内温度升高有积极响应。

致谢: 中国科学院天山冰川观测实验站给予野外工作和气象资料等方面的支持, 参加野外工作的还有张敬春、张跃、石磊、傅海荣等, 在此一并致谢。

参考文献 (References):

- [1] Wang Guoya, Shen Yongping, Mao Weiyi. Climate warming at headwater of Ürümqi River, Xinjiang in past 44 years and its impact on glacier shrinking[J]. Journal of Glaciology and

- Geocryology, 2005, **27**(6): 813-819. [王国亚, 沈永平, 毛伟峰. 乌鲁木齐河源区 44 a 来气候变暖特征及其对冰川的影响[J]. 冰川冻土, 2005, **27**(6): 813-819.]
- [2] Jin Huijun, Qiu Guoqing, Zhao Lin, *et al.* Thermal regime of alpine permafrost in the upper reach of Ürümqi River, Tian Shan[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1993, **15**(1): 110-114. [金会军, 邱国庆, 赵林, 等. 东天山中段乌鲁木齐河上游冻土热状况研究[J]. 冰川冻土, 1993, **15**(1): 110-114.]
- [3] Ji Zixiu. The modern periglacial process in the central part of Tian Shan [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1980, **2**(3): 1-11, 67-68. [季子修. 天山中部现代冰缘作用[J]. 冰川冻土, 1980, **2**(3): 1-11, 67-68.]
- [4] Cui Zhijiu, Xiong Heigang, Liu Gengnian, *et al.* Research on Cryosphere Geomorphologic Process and Sedimentary Characteristic in the Middle Tianshan Mountain[M]. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Press, 1998. [崔之久, 熊黑钢, 刘耕年, 等. 中天山冰冻圈地貌过程与沉积特征[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 1998.]
- [5] Liu Gengnian, Liu Yuefeng. Formation and distribution of the sorted circles at the head area of Ürümqi River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1993, **15**(3): 474-480. [刘耕年, 刘岳峰. 天山乌鲁木齐河源分选环的发育特征[J]. 冰川冻土, 1993, **15**(3): 474-480.]
- [6] Xiong Heigang, Liu Gengnian, Cui Zhijiu. Observation and research of sorted circles in empty cirque at the head of Ürümqi River, Tian Shan, China[J]. Geographical Research, 1993, **12**(4): 46-53. [熊黑钢, 刘耕年, 崔之久. 天山乌鲁木齐河源空冰斗中石环的观测与研究[J]. 地理研究, 1993, **12**(4): 46-53.]
- [7] Zhu Cheng. The Modern Periglacial Lanform Research[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1994: 2-10, 150-161. [朱诚. 现代冰缘地貌研究[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1994: 2-10, 150-161.]
- [8] Cui Zhijiu. Some progress in the research of periglacial landform in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1981, **3**(3): 70-77. [崔之久. 我国冰缘地貌学研究的进展[J]. 冰川冻土, 1981, **3**(3): 70-77.]
- [9] Deng Yangxin, Deng Xiaofeng. Characteristics of periglacial landforms in Bogda area, Tian Shan[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1983, **5**(3): 179-190, 250-252. [邓养鑫, 邓晓峰. 天山博格达峰地区现代冰缘地貌特征[J]. 冰川冻土, 1983, **5**(3): 179-190, 250-252.]
- [10] Xiong Heigang, Liu Gengnian, Cui Zhijiu. The characteristics and vertical zone spectrum of natural disasters in the Tianshan Mountains, Xinjiang [J]. Acta Geographica Sinica, 1998, **18**(3): 227-233. [熊黑钢, 刘耕年, 崔之久. 新疆天山山地自然灾害垂直带谱及其特征[J]. 地理科学, 1998, **18**(3): 227-233.]
- [11] Liu Gengnian, Xiong Heigang. Observation and consideration on the gelifluction in the alpine periglacial environment of the Tianshan Mountains [J]. Acta Geographica Sinica, 1994, **49**(4): 363-370. [刘耕年, 熊黑钢. 天山高山冰缘环境的融冻泥流作用[J]. 地理学报, 1994, **49**(4): 363-370.]
- [12] Zhu Cheng. Some problems from the slope periglacio-landform on middle Tianshan Mountain [J]. Journal of Mountain Research, 1992, **10**(2): 65-74. [朱诚. 中天山坡地冰缘地貌的若干问题[J]. 山地学报, 1992, **10**(2): 65-74.]
- [13] Zhu Cheng, Cui Zhijiu. The distribution and evolution of periglacial landforms in the source region of Ürümqi River on the Tianshan Mountain [J]. Acta Geographica Sinica, 1992, **47**(6): 526-535, 571-572. [朱诚, 崔之久. 天山乌鲁木齐河源区冰缘地貌的分布和演变过程[J]. 地理学报, 1992, **47**(6): 526-535, 571-572.]
- [14] Cui Zhijiu, Liu Gengnian, Xiong Heigang, *et al.* Investigation report of periglacial landforms in the source region of Ürümqi River[C]//Annual Report of Tianshan Glaciological Station, Vol. 10. Lanzhou: Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences, 1991: 57-66. [崔之久, 刘耕年, 熊黑钢, 等. 乌鲁木齐河源冰缘地貌考察报告[C]//天山冰川观测试验站年报, 第 10 卷. 兰州: 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1991: 57-66.]
- [15] Zhao Lin, Liu Guangyue, Jiao Keqin, *et al.* Variation of the permafrost in the headwaters of the Ürümqi River in the Tianshan Mountains since 1991[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, **33**(2): 223-230. [赵林, 刘广岳, 焦克勤, 等. 1991-2008 年天山乌鲁木齐河源区多年冻土的变化[J]. 冰川冻土, 2010, **33**(2): 223-230.]
- [16] Wang Jiaoyan. Impacts of climate change on runoff process of Khash River in western Tianshan Mountains, Xinjiang, China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, **33**(5): 1153-1160. [王娇妍. 气候变化对天山西部喀什河径流变化过程的影响分析[J]. 冰川冻土, 2011, **33**(5): 1153-1160.]
- [17] Li Lin, Wang Zhenyu, Xu Weixin, *et al.* Response of growth of typical plateau meadow on Tibetan Plateau to climate change [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, **33**(5): 1006-1013. [李林, 王振宇, 徐维新, 等. 青藏高原典型高寒草甸植被生长发育对气候和冻土环境变化的响应[J]. 冰川冻土, 2011, **33**(5): 1006-1013.]
- [18] Chen Feng, Yuan Yujiang, Wei Wenshou, *et al.* July temperature at the upper treeline recorded in the tree-ring in the headwaters of the Ürümqi River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, **33**(1): 55-63. [陈峰, 袁玉江, 魏文寿, 等. 树轮记录过去 384 a 乌鲁木齐河源 7 月温度变化[J]. 冰川冻土, 2011, **33**(1): 55-63.]
- [19] Jiao Keqin, Ye Baisheng, Han Tianding, *et al.* Response of runoff to climate change in the Glacier No. 1 at the headwater of Ürümqi River, Tianshan Mountains during 1980-2006 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, **33**(3): 606-611. [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.]
- [20] Lan Yongchao, Shen Yongping, Zhong Yingjun, *et al.* Sensitivity of the mountain runoff of Ürümqi River to the climate changes[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, **24**(11): 50-55. [蓝永超, 沈永平, 钟英君, 等. 乌鲁木齐河出山径流对气候变化的敏感性分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, **24**(11): 50-55.]
- [21] Zhang Guofei, Li Zhongqin, Wang Wenbin, *et al.* Change processes and characteristics of mass balance of the Ürümqi Glacier No. 1 at the headwaters of the Ürümqi River, Tianshan Mountains, during 1959-2009[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, **34**(6): 1301-1309. [张国飞, 李忠勤, 王文彬, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川 1959-2009 年物质平衡变化过程及特征研究[J]. 冰川冻土, 2012, **34**(6): 1301-1309.]

- [22] Li Zhongqin, Shen Yongping, Wang Feiteng, *et al.* Response of glacier melting to climate change—Take Ürümqi Glacier No. 1 as an example[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, **29**(3):333–342. [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.]
- [23] Li Xuliang, Li Zhongqin, Wang Wenbin, *et al.* Variations on equilibrium line altitude of the Glacier No. 1 at the headwaters of Ürümqi River, during 1959–2009 [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, **27**(2):83–88. [李旭亮, 李忠勤, 王文彬, 等. 1959–2009 年乌鲁木齐河源 1 号冰川零平衡线高度变化研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, **27**(2):83–88.]
- [24] French H M. *The Periglacial Environment* (3rd Edition)[M]. Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd., 2007: 1–15.
- [25] French H M. *The Periglacial Environment* (2nd Edition)[M]. Harlow, Essex, UK: Addison-Wesley Longman, Incorporated, 1996: 1–341.
- [26] Kade A, Romanovsky V E, Walker D A. The N-Factor of nonsorted circles along a climate gradient in Arctic Alaska[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2006, **17**(4): 279–289.
- [27] Kerman H J, Johansson M. Thawing permafrost and thicker active layers in sub-arctic Sweden[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2008, **19**(3): 279–292.
- [28] Tarnocai C, Nixon F M, Kutny L. Circumpolar-Active-Layer-Monitoring (CALM) sites in the Mackenzie Valley, northwestern Canada [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2004, **15**(2): 141–153.
- [29] Gorbunov A P, Marchenko S S, Seversky E V. The thermal environment of blocky materials in the mountains of Central Asia[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2004, **15**(1): 95–98.
- [30] Gruber S, Hoelzle M, Haeberli W. Rock-wall temperatures in the Alps: modelling their topographic distribution and regional differences[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2004, **15**(3): 299–307.
- [31] Haeberli W, Cheng G, Gorbunov A P, *et al.* Mountain permafrost and climatic change [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1993, **4**(2): 165–174.
- [32] Harris S A, Corte A E. Interactions and relations between mountain permafrost, glaciers, snow and water [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1992, **3**(2): 103–110.
- [33] Williams P J, Smith M W. *The Frozen Earth: Fundamentals of Geocryology* [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1989.
- [34] Shur Y L, Slavin-Borovskiy V B. N-factor maps of Russian permafrost region[C]//Permafrost Sixth International Conference Proceedings. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1993: 564–568.

A Long Term Monitoring of Frost Heaving in Periglacial Environment in the Tianshan Mountains

SUN Cai-qi, LI Chuan-chuan, CHEN Yi-xin, ZHANG Mei, NIE Zhen-yu, LIU Geng-nian
(College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Freezing and thawing is an important geomorphic process of the periglacial environment. Its activity is a direct reflection of climate change and thus it is an important part of the Cryosphere process. Based on a long-term monitoring in the source region of the Ürümqi River from 1991 to 2011, a discussion in detail on the characteristics of sorted circles and frost heaving mechanism in the Tianshan Mountains is made in this article. In the source region, the effect of frost heaving is strongest within the surface layer of 20 cm deep, while the stake of 3 cm in diameter is least affected by frost heaving. Inside a sorted circle the frost heaving becomes weaker along radius from the center to the edge. Frost heaving in sorted circle area is stronger than that in the area without sorted cir-

cle. The altitude has significant effect on frost heaving. At the altitude range from 3 500 to 4 000 m, frost heaving enhances with altitude and reaches a maximum at 3 900 m, the equilibrium line altitude of glaciers. Correlation analysis demonstrates that the development of frost heaving and sorted circles has closely relation with moisture and thermal regime in the warm half year (from May to October). Frost heaving has positive relation with precipitation in the warm season, the transfer days when ground temperature undulates around 0 °C is also an important factor. The sorted circle monitoring reveals that periglacial landform is sensitive to regional climate change and has an active respond to the air temperature rising in recent two decades.

Key words: Tianshan Mountains; sorted circle; freeze-thaw action; climate change