

文章编号: 0455-2059(2009)05-0036-06

天山乌鲁木齐河源 1 号冰川雪冰中 $\delta^{18}\text{O}$ 的演化过程

张明军^{1,2}, 周 平¹, 李忠勤^{2,1}, 王飞腾², 金 爽¹, 李瑞雪¹

(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)

摘 要: 2002 年 9 月 14 日–2005 年 3 月 7 日, 在天山乌鲁木齐河源 1 号冰川积累区雪坑中连续观测取样, 频率为 1 次/周, 分析了其中的部分表层雪样品和粒雪坑样品中的 $\delta^{18}\text{O}$ 。结果表明: 表层雪样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 具有明显的季节变化, 且与月平均温度关系密切。粒雪坑样品中的 $\delta^{18}\text{O}$ 在 9 月底至次年 6 月初变化较小, 升华对雪坑 1 m 以下雪冰中 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响不超过 -2‰ , 整个雪坑都较好地保持了 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化特征。但 6 月初–9 月底融水对雪冰中 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响巨大, 冬季形成的 $\delta^{18}\text{O}$ 低于 -30‰ 的中、细粒雪层, 经过夏季融水的改造, 可成为 $\delta^{18}\text{O} - 11.6\text{‰}$ 的粗粒雪和冰片层。融水可使雪冰中 $\delta^{18}\text{O}$ 的改变量 $> 60\%$ 。在全球变暖背景下, 冬季形成的低 $\delta^{18}\text{O}$ 雪层经过夏季融水的改造, 其内的 $\delta^{18}\text{O}$ 可以完全被平滑。

关键词: 雪冰; $\delta^{18}\text{O}$; 演化过程; 乌鲁木齐河源 1 号冰川**中图分类号:** P597**文献标识码:** A

Evolution processes of $\delta^{18}\text{O}$ in snowpits on No.1 glacier at the Urumqi river head, Tianshan Mountains

ZHANG Ming-jun^{1,2}, ZHOU Ping¹, LI Zhong-qin^{2,1},
WANG Fei-teng², JIN Shuang¹, LI Rui-xue¹

(1. College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. Tianshan Glaciological Station/ Key Laboratory of Cryosphere and Environment, Cold and Arid Region
Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Analysis of $\delta^{18}\text{O}$ in surface snow and snowpit samples collected successively on a monthly basis from September 14, 2002 to March 7, 2005 on the east branch of No.1 glacier at the Urumqi river head, Tianshan Mountain is presented here. $\delta^{18}\text{O}$ in surface snow showed obvious seasonal variations, which were associated with the monthly mean temperature. The variations of $\delta^{18}\text{O}$ in the snowpits were not obvious from the end of September to the beginning of the next June. The sublimation might have affected $\delta^{18}\text{O}$ in the snowpit, but the effect was within -2‰ in the bottom of the snowpit. However, from the beginning of June to the end of September, with the temperature rising, the variations of $\delta^{18}\text{O}$ in the snowpits were distinctly caused by melting water. The winter snow layers in which the $\delta^{18}\text{O}$ were less than -30‰ could be changed into coarse firn and ice layers in which the $\delta^{18}\text{O}$ were more than -11.6‰ due to the melting water, and the extent of the variations of $\delta^{18}\text{O}$ could be more than 60%. With the global warming, the lower $\delta^{18}\text{O}$ in the winter snow can be completely smoothed by summer melting water.

Key words: firn and ice; $\delta^{18}\text{O}$; evolution process; No.1 glacier at the Urumqi river head**收稿日期:** 2009-02-27; **修回日期:** 2009-07-08**基金项目:** 国家自然科学基金项目(40701035, 40631001, 40571033); 霍英东教育基金项目(101019); 陇原青年创新人才扶持计划项目; 西北师范大学知识与科技创新工程科研骨干培育项目(NWNU-KJXCXC-03-45); 西北师范大学自然地理学省级重点学科基金项目**作者简介:** 张明军(1975–), 男, 甘肃宁县人, 教授, 博士, e-mail: mjzhang2004@163.com, 研究方向为冰川与环境。

冰芯研究的最终目标是了解气候环境的变化历史^[1], 冰芯中稳定同位素的研究可以恢复古气候的演化历史, 因此冰川广布的两极地区和青藏高原地区雪冰中的稳定同位素研究一直是全球变化研究的前缘和热点之一^[2-3]. 研究表明^[4-8]: 雪冰化学记录不同程度地受到融水渗浸等沉积后作用的干扰. 淋溶作用改变了雪层内化学元素原始季节层理记录, 而代之以新的分布形式^[9]. 因此, 弄清淋溶作用前后化学元素的变化情况, 是最大限度获取气候和环境变化信息的重要依据.

天山乌鲁木齐河源 1 号冰川是进行气候变暖对雪冰中稳定同位素影响研究的理想场所. 一方面, 1 号冰川地处中亚干旱-半干旱区高寒环境, 降水主要受西风环流的影响, 气候环境的变化会由于水汽来源的变化而在雪冰记录中得到明显的反映甚至放大. 另一方面, 此地有中国科学院天山冰川观测试验站作为后勤保障. 从 2002 年开始, 以天山冰川观测试验站为依托, 选定天山乌鲁木齐河源 1 号冰川开展雪冰中 $\delta^{18}\text{O}$ 记录形成过程的研究. 和已有的研究相比, 此项研究有稳定的全年度采样机制, 突破以往只是以夏季观测资料研究问题的局限. 同时, 完成从表层雪-粒雪-冰川冰这样一个完整的记录过程研究, 突破以往只对某一片段的过程研究.

1 采样点位置

天山乌鲁木齐河源 1 号冰川(43°06'N, 89°49'E)是一条山谷冰川, 由东(1.12 km²)、西(0.61 km²)两支组成, 总面积 1.73 km²^[10]. 1 号冰川东、西支及整个冰川多年平均零平衡线高度分别为: 4016, 4095, 4056 m. 西支零平衡线高度平均高于东支的, 但相对变幅比东支小^[11]. 自 1993 年 1 号冰川完全分为两支, 特别是 1996 年以后, 气温持续升高(冬季升温更加明显), 零平衡线呈现显著的升高趋势^[12], 冰川冰舌部分, 东支年退缩量、变幅均较小, 西支退缩量明显大于东支的^[13]. 除了气温升高在冰川退缩中的支配作用外^[14], 冰川分离后冰舌末端更加陡峭和冰面、冰下河发育等因素也是造成冰川退缩速度显著增大的原因. 野外观测表明: 采样点所在的渗浸带雪坑的深度在 1.5(夏末)~3.0 m(春末)内波动(图 1). 冬季由于雪的密实化、风吹雪和升华作用的影响, 雪坑的深度较稳定、变化不大. 夏初随着气温上升到 0℃, 雪坑上部的雪层开始融化, 雪坑深度迅速减小. 在夏末至秋初, 由于消融加剧, 融水下渗, 对下部雪层、甚至上一年的积

累产生影响^[7].



图 1 研究区域的地理位置

Fig. 1 Location map of the study area

2 样品的采集和分析

样品采集于天山乌鲁木齐河源 1 号冰川东支渗浸带积累区海拔 4 130 m 处的雪坑中, 该位置在冰川渗浸冻结带内, 坡向朝北, 属于日照时间最短的区域, 是良好的雪冰过程研究位置^[15-19]. 在天山乌鲁木齐河源 1 号冰川开展的雪冰过程国际合作项目(program for glacier processes investigation, PGPI)从 2002 年 9 月 14 日开始取样, 取样频率为 1 次/周. 取样时表层雪样品取自雪坑顶部表层 5 cm 处, 粒雪坑样品在取完表层雪样品后, 沿雪坑剖面继续向下以每 10 cm 间距连续取样直至粒雪冰面. 样品在采集和运输过程中均采取严格的操作规范, 包括使用聚乙烯手套和面具等以避免污染. 采样后雪坑被重新填埋、直至下次采样时在上次采样位置重新挖开并向前挖进 20~30 cm, 在与上次相同的层位上取样. 雪冰样品在冷冻状态下装入聚乙烯塑料瓶中, 装完样品后立即封闭以避免蒸发和扩散. 样品保持在冷冻状态下置于绝缘的铁箱中被运送到中国科学院寒区旱区环境与工程研究所后立即存放于 -15℃ 的低温室保存, 分析前两天将样品取出并在室温下自然融化. $\delta^{18}\text{O}$ 的测试在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈与环境联合重点实验室 Mat-252 气体稳定同位素质谱仪上进行, 其检测误差为 $\pm 0.2\text{‰}$. 用于本研究的样品为 2002 年 9 月 14 日-2005 年 3 月 7 日的样品, $\delta^{18}\text{O}$ 的测试是平均每月选取一个完整的雪坑样品. 由于 2002-2003 年雪坑中 $\delta^{18}\text{O}$ 的数据表明冬季雪坑中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化小, 夏季变化大, 所以 2003-2004 年样品分析中, 减少了冬季雪坑样品数. 同时, 为了深入研究夏季雪坑样品中 $\delta^{18}\text{O}$ 的演化过程, 加密分析了夏季雪坑样品数.

3 乌鲁木齐河源 1 号冰川表层雪中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征

图 2 为 2002 年 9 月 27 日–2003 年 11 月 28 日表层雪样品中 $\delta^{18}\text{O}$ 与月平均气温关系图。从图 2 中可以看出: 表层雪样品中 $\delta^{18}\text{O}$ 冬季低, 夏季高, 季节变化特征十分明显, 其春季、夏季、秋季和冬季的平均值分别为 -16.6‰ , -9.4‰ , -17.9‰ , -29.1‰ 。表层雪样品中 $\delta^{18}\text{O}$ 与月平均气温的相关性非常好, 相关系数达到了 0.87, 表明新降雪样品中 $\delta^{18}\text{O}$ 可以很好地代表温度的变化, 这与前人的研究结果一致^[20–23]。

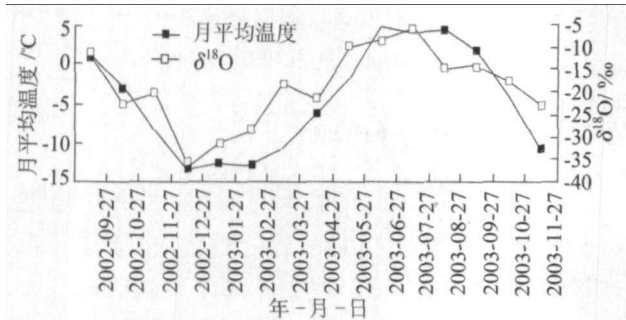


图 2 表层雪样品中 $\delta^{18}\text{O}$ 与月平均气温关系图

Fig. 2 Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ in the surface snow and monthly mean temperature

4 乌鲁木齐河源 1 号冰川雪冰中 $\delta^{18}\text{O}$ 的演化过程

雪冰中各种可溶性化学离子的研究结果表明乌鲁木齐河源 1 号冰川雪冰中化学离子的淋

融主要发生在 6–8 月^[24]。为了研究 1 号冰川雪冰中 $\delta^{18}\text{O}$ 的演化过程, 将研究时期分为两段: 9 月底至次年 6 月初为冬半年, 主要研究低温条件下 $\delta^{18}\text{O}$ 的演化过程; 6 月初至 9 月底为夏半年, 主要研究融水对雪坑中 $\delta^{18}\text{O}$ 的改造过程。根据大西沟气象站 2003, 2004 年气象资料分析, 发现 6, 7, 8, 9 月平均温度都在 0°C 以上, 其他月份平均温度都在 0°C 以下。

从图 3 可以看出: 9 月底至次年 6 月初雪坑中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化比较小; 随着积雪的积累, 雪坑的深度加深, 但雪坑中 $\delta^{18}\text{O}$ 没有大的变化。变化较大的是 2004 年 4 月 3 日–2004 年 6 月 4 日的雪坑, 因为这一时期降水量达 66.5 mm, 雪坑上部 $\delta^{18}\text{O}$ 变化较大, 但下部仍无明显变化, 说明融水没有对整个雪坑中 $\delta^{18}\text{O}$ 产生大的影响。

通过对 2002, 2003 年雪坑中 $\delta^{18}\text{O}$ 的分析发现: 在 2002 年底和 2003 年初在雪坑顶部形成了 $\delta^{18}\text{O}$ 低于 -30‰ 的细粒雪层, 但这一细粒雪层经过 2003 年夏季融水的改造, 在 2003 年 9 月 27 日雪坑 100 cm 处形成了 $\delta^{18}\text{O}$ 为 -11.6‰ 粗粒雪和冰片层。从图 3 可见这一标志层(P1 层)随着积雪的积累, 在 9 月底至次年 6 月初出现的位置不断下降, 从 2003 年 9 月 27 日距雪面 100 cm 下降到 2004 年 6 月 4 日的 185 cm。同时, 标志层中 $\delta^{18}\text{O}$ 从 2003 年 9 月 27 日的 -11.6‰ 降为 2004 年 6 月 4 日的 -13.3‰ , 这可能是这一时期升华对雪冰中 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响所致。这一标志层位以下雪冰中 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值, 从 -8.6‰ 降为 -10.5‰ ,

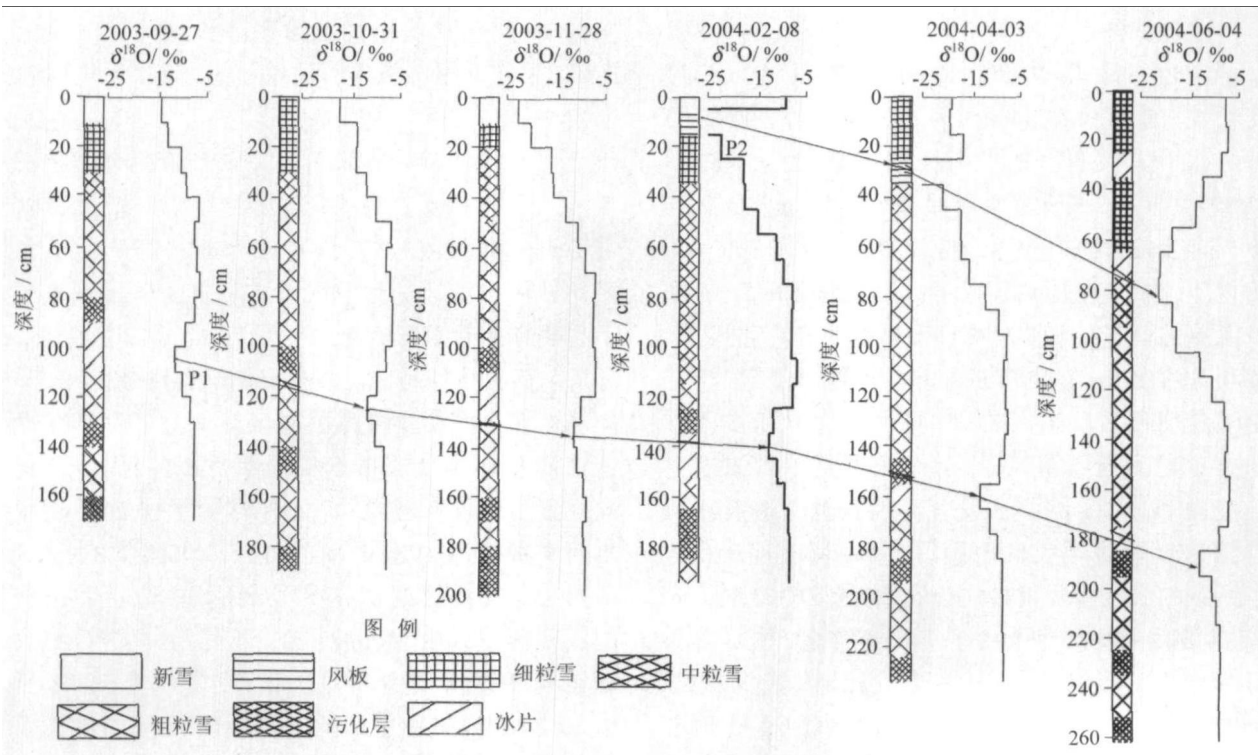


图 3 2003 年 9 月 27 日–2004 年 6 月 4 日 PGPI 雪坑中 $\delta^{18}\text{O}$ 演化过程

Fig. 3 Evolution process of $\delta^{18}\text{O}$ in the snow-ice pack at the PGPI site from September 27, 2003 to June 4, 2004

说明冬季升华对 1 m 以下雪冰中 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响较小, 不超过 -2‰ 。总体上看, 9 月底至次年 6 月初整个雪坑都较好地保持了 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化特征(图 3)。

从图 4 可以看出: 7, 8, 9 月雪坑消融强烈, 厚度减薄(最薄时只有 120 cm)。2002 年底和 2003 年初在雪坑中形成的标志层在 2004 年 7 月 7 日的雪坑中已经很不明显了, 而 2003 年底和 2004 年初在雪坑中形成的 $\delta^{18}\text{O}$ 低于 -25‰ 的细粒雪层经过融水的改造, 已经升高为 -14.9‰ , 经过 7, 8 月融水的改造, 冬季形成的低 $\delta^{18}\text{O}$ 细粒雪层完全被破坏。这一点从雪坑中 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值也可以看出, 2004 年 6 月 4 日雪坑中 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值为 -11.9‰ , 到 2004 年 9 月 8 日变为 -8.1‰ , 变化达 -3.8‰ , 说明夏季融水对整个雪坑中 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响很大。融水对整个雪坑中 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响主要通过融水与粒雪之间大量的物质交换进行。通过图 3-4 中雪坑的物理剖面可以看出: 6 月底-9 月初雪坑物理剖面最大的特

点是粗粒雪和冰片所占的比例增大, 这就意味着夏季冰雪表面的融水与雪坑中冬季形成的细粒雪和中粒雪之间进行了大量的物质交换。有研究表明: 融水和雪坑中粒雪之间每天的物质交换量可达 $5.07\times 10^{-2}\text{ g/cm}^3$ [25]。大量的物质交换使融水改变了整个雪坑中 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布。

通过对 2002-2005 年雪坑中 $\delta^{18}\text{O}$ 的研究发现: 在 2002 年底和 2003 年初在雪坑顶部形成的低 $\delta^{18}\text{O}$ 的细粒雪层虽然经过 2003 年夏季融水的改造, 在 2003 年 9 月 27 日的雪坑中还可以辩出 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化, 但 2003 年底和 2004 年初在雪坑中形成的低 $\delta^{18}\text{O}$ 的细粒雪层(P2 层)经过 2004 年夏季融水的改造, 在 2004 年 8 月 5 的雪坑中已基本消失, 这可能与融水的强弱有关。邻近的大西沟气象站资料表明: 2004 年夏季温度比 2003 年的要高, 特别是 2004 年 7 月份的平均温度为 $6.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 比 2003 年 7 月份的高 $2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。说明雪坑中 2004 年夏季的融水要

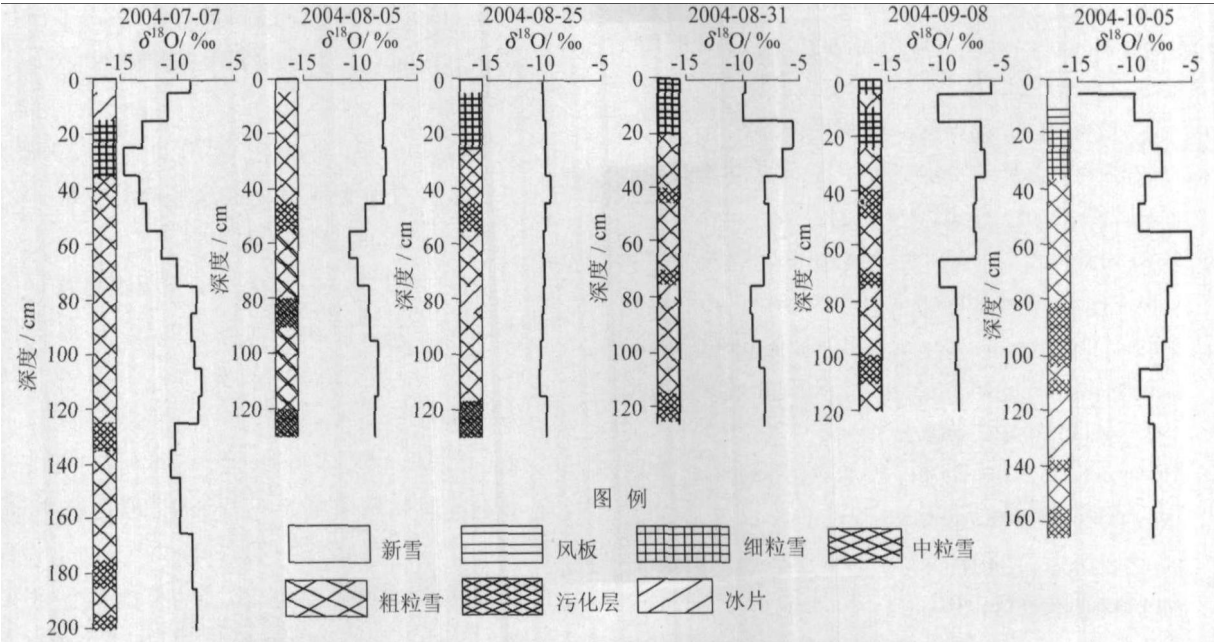


图 4 2004 年 7 月 7 日-2004 年 10 月 5 日 PGPI 雪坑中 $\delta^{18}\text{O}$ 演化过程

Fig. 4 Evolution process of $\delta^{18}\text{O}$ in the snow-firn pack at the PGPI site from July 7, 2004 to October 5, 2004

强于 2003 年的, 但无论是 2003 年夏季, 还是 2004 年夏季, 融水都改变了整个雪坑中氧稳定同位素的分布特征。

5 结语

全球变暖已是不争的科学事实[26], 乌鲁木齐河源 1 号冰川自小冰期以来一直在退缩。附近的大西沟气象站资料表明: 该地区 20 世纪 80 年代的平均温度为 $-5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 20 世纪 90 年代上升为 $-4.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 21 世纪前 6 年的平均温度达到 $-4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 气温升高导致 1 号冰川发生了诸多变化[27]。侯书贵等[21-22]的研究表明 1 号冰川东支粒雪盆 4040 m 处的两

支冰芯中 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在 1975-1995 年与夏半年平均气温之间存在一定程度的正相关关系, 即雪冰中的 $\delta^{18}\text{O}$ 还具有一定的气候环境意义。Li 等[28]在同样位置获得的冰芯中的 $\delta^{18}\text{O}$ 在 1955-1998 年具有一定的年层效应。通过连续三年在同一地点每月一次的雪坑中 $\delta^{18}\text{O}$ 的研究, 我们发现近年来的升温彻底改变了雪冰中 $\delta^{18}\text{O}$ 的原始记录, 使得冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录至少在年际尺度上不再具有温度指示意义。

这一研究使我们认识到, 在全球变暖的背景下, 冰芯记录研究要小心谨慎, 温度的微小变化都

可能对化学记录产生很大的影响,所以在冰芯记录解释之前,必须进行记录形成过程的研究。

致谢 本项研究是天山冰川观测试验站开展的雪冰现代过程研究项目的一部分,是在全体观测和研究人员集体努力下完成的。在此对参加本项研究的每一个观测人员以及项目组人员焦克勤,杨惠安,韩添丁,李传金,李慧林,张坤,尤晓妮,李向应,赵中平,钱军,朱宇曼等表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] 张明军,李忠勤,秦大河,等. 南极洲伊利莎白公主地区主要离子来源传输过程和沉积方式研究[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2001, 37(6): 99-106.
- [2] PETIT J R, JOUZEL J, RAYNAUD D, et al. Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctica[J]. Nature, 1999, 399: 429-436.
- [3] YAO Tan-dong, THOMPSON L G, THOMPSON M, et al. Climatologically significance of $\delta^{18}\text{O}$ in north Tibetan ice cores[J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 23: 29 531-29 537.
- [4] 何元庆,姚檀栋,程国栋,等. 玉龙山温冰川浅冰芯内气候环境信息的初步剖析[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2001, 37(4): 118-124.
- [5] HOU Shu-gui, QIN Da-he, MAYEWSKI P A, et al. Climatological significance of $\delta^{18}\text{O}$ from precipitation to ice cores: a case study at the head of Urumqi River, Tien Shan, China[J]. Journal of Glaciology, 1999, 45(151): 517-523.
- [6] HOU Shu-gui, QIN Da-he, REN Jia-wen, et al. The present environmental processes of ice core pH and conductivity records: a case study at the headwaters of the Urumqi River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1999, 21(4): 371-379.
- [7] LI Zhong-qin, ROSS E, THOMPSON M, et al. Seasonal variability of ionic concentration in surface snow and elution process in snow-firn packs at PGPI site on Urumqi glacier No. 1 in eastern Tien Shan; China[J]. Annals of Glaciology, 2006, 43: 250-256.
- [8] KANG Shi-chang, HUANG Jie, XU Yan-wei. Changes in ionic concentrations and $\delta^{18}\text{O}$ in the snowpack of Zhadang glacier, Nyainqentanglha Mountain, southern Tibetan Plateau[J]. Annals of Glaciology, 2008, 49: 127-134.
- [9] 皇翠兰,李忠勤,侯书贵,等. 离子淋溶作用对冰川化学记录形成的影响[J]. 科学通报, 1996, 42(23): 2171-2173.
- [10] 李忠勤,韩添丁,井哲帆,等. 乌鲁木齐河源区气候变化和1号冰川40 a观测事实[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 117-123.
- [11] 韩添丁,刘时银,丁永建,等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川物质平衡特征研究[J]. 地球科学进展, 2005, 20(3): 298-303.
- [12] 刘时银,王宁练,丁永建,等. 近30年来乌鲁木齐河流域冰川波动特征与流域高山带升温幅度的估算[J]. 地球科学进展, 1999, 14(3): 279-285.
- [13] 李向应,李忠勤,尤晓妮,等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川成冰带及雪层剖面特征研究[J]. 冰川冻土, 2006, 28(1): 37-44.
- [14] 苏珍,刘宗香,王文梯,等. 青藏高原冰川对气候变化的响应及趋势预测[J]. 地球科学进展, 1999, 14(6): 607-612.
- [15] WANG Fei-teng, LI Zhong-qin, YOU Xiao-ni, et al. Seasonal evolution of aerosol stratigraphy in Urumqi glacier No. 1 percolation zone, eastern Tien Shan, China[J]. Annals of Glaciology, 2006, 43: 245-249.
- [16] 王飞腾,李忠勤,尤晓妮,等. 乌鲁木齐河源1号冰川积累区表面雪层演化成冰过程的观测研究[J]. 冰川冻土, 2006, 28(1): 45-53.
- [17] 尤晓妮,李忠勤,王飞腾,等. 利用雪层层位跟踪法研究暖型成冰作用的年限问题——以乌鲁木齐河源1号冰川为例[J]. 冰川冻土, 2005, 27(6): 853-860.
- [18] 尤晓妮,李忠勤,王飞腾,等. 乌鲁木齐河源1号冰川不溶微粒的季节变化特征[J]. 地球科学进展, 2006, 21(11): 1164-1170.
- [19] 李向应,李忠勤,陈正华,等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川雪坑中pH值和电导率的季节变化及淋溶过程[J]. 地球科学进展, 2006, 21(5): 487-495.
- [20] WATANABE O, WU Xiao-ling, Ikegami K, et al. Oxygen isotope characteristics of glaciers in the eastern Tianshan[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1983, 5(3): 101-112.
- [21] 侯书贵,秦大河,李忠勤,等. 乌鲁木齐河源1号冰川冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的现代环境过程分析[J]. 地球化学, 1998, 27(2): 108-116.
- [22] 侯书贵,秦大河,任贾文. 乌鲁木齐河源1号冰川冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录气候意义的再探讨[J]. 地球化学, 1999, 28(5): 438-442.

(下转第47页)

参 考 文 献

- [1] 董晓峰, 杨保军. 宜居城市研究进展[J]. 地球科学进展, 2008, 23(3): 323-326.
 - [2] 任致远. 关于宜居城市的拙见[J]. 城市发展研究, 2005, 12(4): 33-36.
 - [3] 张文忠. 宜居城市的内涵及评价指标体系探讨[J]. 城市规划学刊, 2007(3): 30-34.
 - [4] PETER E. Political strategies for more livable cities: lessons from six cases of development and political transition[M]. Berkeley: University of California Press, 2002: 203-229.
 - [5] PETER E. Livable cities? The politics of urban livelihood and attainability[M]. Berkeley: University of California Press, 2001: 211-219.
 - [6] 浅见泰司. 居住环境评价方法与理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
 - [7] 张文忠, 尹卫红, 张锦秋, 等. 宜居城市研究报告(北京)[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2006.
 - [8] 周志田. 中国适宜人居城市研究与评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2004, 14(1): 27-30.
 - [9] 梁文钊, 侯典安. 宜居城市的主成分分析与评价[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2008, 44(4): 51-54.
 - [10] 刘洪丽, 吴军年, 王根绪. 基于层次分析法的铬盐生产系统风险分析[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2008, 44(1): 20-24.
 - [11] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 224-249.
 - [12] 李雪铭, 刘敬华. 我国主要城市人居环境适宜居住的气候因子综合评价[J]. 经济地理, 2003, 23(5): 656-660.
-
- (上接第40页)
- [23] YAO Tan-dong, MASSON V, JOUZEL J, et al. Relationships between $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and surface air temperature in the Urumqi River Basin, east Tianshan Mountain, China[J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(23): 3473-3476.
 - [24] 焦克勤, 井哲帆, 韩添丁, 等. 42 a来天山乌鲁木齐河源1号冰川变化及趋势预测[J]. 冰川冻土, 2004, 26(3): 253-259.
 - [25] HASHIMOTO S, ZHOU Shi-qiao, NAKAWO M, et al. Isotope studies of inner snow layers in a temperate region[J]. Hydrological Processes, 2002, 16: 2209-2220.
 - [26] IPCC. Summary for policymakers of climate change 2007: the physical science basis[M]//Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
 - [27] 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.
 - [28] LI Xin-qing, QIN Da-he, JIANG Guibin, et al. Atmospheric pollution of a remote area of Tianshan Mountain: ice core record[EJ/OL]. (2003-07-17), [2009-02-26]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, <http://www.agu.org/pubs/crossref/2003/2002JD002181.shtml>.