

积雪中不溶微粒与 Mg^{2+} 的沉积特征和相互关系^①尤晓妮^{1,2}, 李忠勤²

(1. 天水师范学院, 甘肃 天水 741000; 2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为了探究不溶微粒和 Mg^{2+} 在雪冰沉积过程中的相关性, 对采自乌鲁木齐河源1号冰川海拔4 130 m处的雪冰样品进行不溶微粒和 Mg^{2+} 浓度的分析。表层雪中不溶微粒和 Mg^{2+} 浓度的季节变化具有较好的一致性, 在6~8月的降水频发期和局地风盛行时, 两者都达到一年中的最大值。粗微粒(直径大于10 μm)和 Mg^{2+} 浓度在雪层剖面中的垂直分布亦具有很好的相似性, 表现出相同的演化趋势, 暗示两者在后沉积过程中的相关性。这种相关性被证明与同期温度变化呈现出明显的负相关。

关键词: 不溶微粒; 气溶胶; 矿物粉尘; Mg^{2+} 浓度; 沉积过程; 1号冰川; 乌鲁木齐河; 天山

冰雪中的气溶胶矿物粉尘包含丰富的气候和环境信息, 是重建过去气候环境变化的一项重要指标^{(1)①}。通过对冰芯中不溶和可溶性矿物粉尘的研究, 可以高分辨率地恢复 $10^2 \sim 10^5$ a 来的大气环境纪录。在过去的几年中, 许多学者已经在全球不同的区域进行了相关研究⁽²⁻⁴⁾。然而, 冰芯中的气溶胶矿物粉尘记录不仅受到沉积过程的影响, 还与融水参与的后沉积过程密切相关。为较好解释冰雪记录中大气组分的变化, 首先要揭示气、雪、冰之间的转换机制⁽⁵⁾。1989年在格陵兰实施的Dye3冰芯计划和在Summit开展的气体和气溶胶采样计划, 已经开始通过对气-雪界面气溶胶矿物粉尘进行研究, 以进一步探求其沉积机制^{(6-8)②}。

乌鲁木齐河源1号冰川(43°06' N, 86°49' E)地处欧亚大陆腹地, 成为揭示中亚干旱区沙尘暴变化、沙尘传输路径以及气候演化的重要站点。有研究表明, 大气中 Mg^{2+} 可作为粉尘的替代指标⁽⁹⁻¹⁰⁾, 而两者在沉积和后沉积过程中, 是否仍然具有良好的相关性却有待研究。本文以不溶微粒、 Mg^{2+} 为研究对象, 基于一年的连续观测资料, 在Li和Wang等⁽¹¹⁻¹²⁾研究的基础上, 对天山乌鲁木齐河源1号冰川表面雪层和粒雪层中不溶微粒、 Mg^{2+} 的变化规律和沉积特征进行了阐述, 并对两者在粒雪层中演化的相关性进行了讨论。

1 研究区概况

乌鲁木齐河源1号冰川位于中国天山东段(图1)。

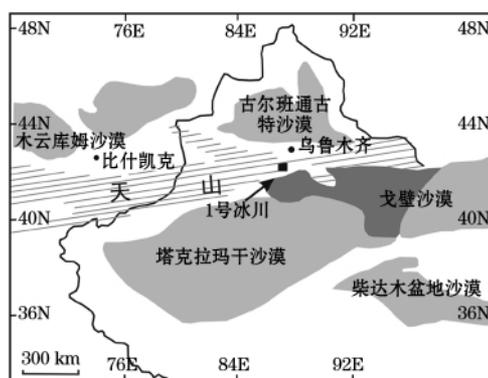


图1 天山乌鲁木齐河源1号冰川地理位置示意图

Fig. 1 Geographical location of Glacier No. 1 at headwaters of the Urumqi River

1号冰川由东、西两支组成, 面积1.79 km²。其周围分布大量裸露的岩石、山体以及冰碛沉积物。对这些冰碛物进行分析发现: 角闪石和绿帘石是主要的重金属成分, 石英, 碱性长石和斜长石是主要轻金属组成⁽¹³⁾。5~9月是1号冰川主要的降水发生期, 集中了全年90%的降水⁽¹⁴⁾, 同期亦是冰川的强烈消融期。本项研究中采样点位于1号冰川东支

① 收稿日期: 2010-12-10; 修订日期: 2011-06-01

基金项目: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所引进国外杰出人才基金项目(CACX2003101); 国家自然科学基金项目(40371028, 40301009, 90102005); 国家自然科学基金创新群体项目共同资助

作者简介: 尤晓妮(1980-), 女, 甘肃陇南人, 在读博士, 主要从事冰川与寒区环境研究。E-mail: yxn_818@yeah.net

① Thompson L.G. Analysis of the concentration of microparticles in an ice core from Byrd station, Antarctica. The Ohio State University Research Foundation, Institute of Polar Studies, 1973.

② Hamilton W.L. Microparticles deposition on polar ice sheets Ohio State University. Institute of Polar Studies, 1969.

湿雪带粒雪盆后壁,海拔 4 130 m。采样期间该处年平均温度为 $-9.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量接近 700 mm。由于该位置日照时间短(尤其是冬季,完全无直接日照),使得完整的雪坑剖面得以保存。

2 样品采集与分析

表层雪及粒雪层样品取自同一雪坑。表层雪取样厚度为 3~5 cm,粒雪层采样密度为每 10 cm 一个样品。具体采样方法见文献 [15]。采样时穿洁净的工作服、戴面罩、聚乙烯手套,使用预先清洁的不锈钢铁铲和聚乙烯手套等。样品采集完毕后被密封在聚乙烯样品瓶中,在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻状态下运至兰州天山站冰雪化学实验室进行分析。

样品分析在 100 级超净工作台进行,微粒的粒度分析使用光学粒径监测仪 AccuSizer 780A [16]。分析前,样品在室温下自然融化,并用去离子水反复清洗管路及仪器系统,直至系统微粒含量低于 50 个/mL。稀释液在每次更换时需要进行背景值的计算,并在结果中予以扣除。 Mg^{2+} 浓度测量用 Dionex DX-320 离子色谱仪,用 Di-onex IonPac CS12A ($4 \times 250\text{ mm}$) 分离柱,CG12A ($4 \times 50\text{ mm}$) 保护柱,15 mmol/L MSA 淋洗液,CAES 阳离子抑制器,检测限为 0.001 neq/m^3 。自 2003 年 9 月至 2004 年 9 月,共采集有 54 个表层雪样品、1 011 个粒雪层样品。

3 结果与讨论

3.1 表层雪中不溶微粒与 Mg^{2+} 浓度变化

图 2 显示了表层雪中不溶微粒、 Mg^{2+} 浓度及采样期间降水、风速的日变化(气象资料来自大西沟气象站,海拔 3 539 m),可以看出两者浓度的季节波动极为相似。不溶微粒和 Mg^{2+} 的平均浓度在秋、冬季节较低,分别为 4.02×10^5 个/mL, 38.1 ng/g 和 4.23×10^5 个/mL, 57.5 ng/g 。进入春季,两者的平均浓度开始逐渐增大,分别为 2.02×10^6 个/mL 和 152.8 ng/g ,并伴随较大幅度的波动。夏季,不溶微粒和 Mg^{2+} 的平均浓度均达到最大值,分别为 2.12×10^6 个/mL 和 286.5 ng/g ,分别是春季的 1.04 倍和 1.88 倍,秋季的 5.28 倍和 7.52 倍,冬季的 5.01 倍和 4.98 倍。

1 号冰川不溶微粒和 Mg^{2+} 的来源可以通过建立表层雪各元素含量之间的相关系数来实现。基于

各种离子的相关系数矩阵,发现 Mg^{2+} 与不溶微粒具有较好的相关性 ($R=0.74$, $P=0.01$, $N=45$)。这说明表层雪中 Mg^{2+} 主要附着在粉尘中降落至冰川表面。与前期研究结果不同的是,表层雪中不溶微粒和 Mg^{2+} 浓度最大值并非出现在初春 [17],而是在夏季,这与粉尘物质的远距离传输和频繁的降水事件有关。乌鲁木齐河源区主要受到西风带的影响,春季,在西风上升气流的作用下,广袤的沙源地形成大量沙尘并穿过天山地区逐渐向东运移。与此同时,亦有大量水汽在西风影响下向东移动 [13],使得天山东段在 6~8 月(图 2d) 进入一年中降水最频繁的季节,为不溶微粒和 Mg^{2+} 的湿沉降提供可能。

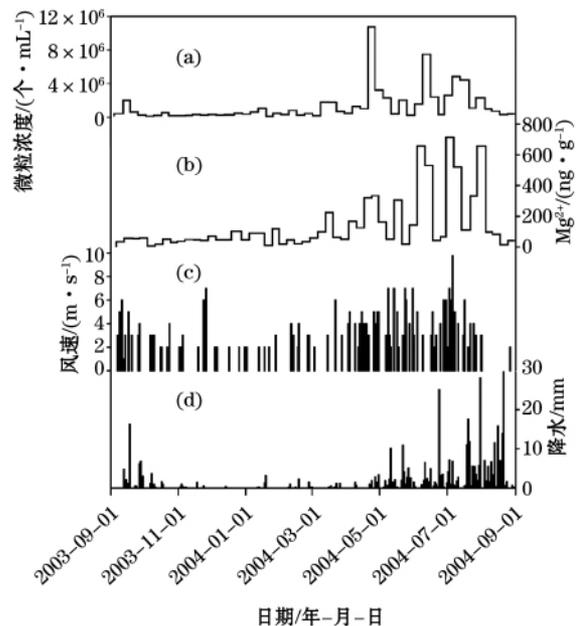


图 2 表层雪中不溶微粒和 Mg^{2+} 浓度及采样期间降水、风速随时间的变化

Fig. 2 Temporal variations of insoluble microparticles, Mg^{2+} concentration in surface snow, precipitation and wind speed

此外,1 号冰川周围湖沼很多,如东面的艾丁湖、盐湖、柴窝堡湖,南面还有塔里木盆地。这些地方降水较少,到了暖季,气候干热,蒸发强烈,使湖沼中的含盐微粒因蒸发带到空气中,被水汽或局地风带到冰川上,增加冰雪水中 Mg^{2+} 含量 [13]。加之冰川周围是大量裸露的岩石和山体以及冰碛沉积,这些冰碛物中含有大量钠、钙、镁、铁等元素 [18]。5~8 月的盛行谷风(图 2c)对粉尘的携带作用也成为表层雪中不溶微粒和 Mg^{2+} 浓度升高的原因。冬、秋两季两者的浓度较低,这与同期降水量较小有关。同

时, 稳定的大气层结阻碍了不溶微粒和 Mg^{2+} 在气-雪界面的交换, 也进一步导致其浓度降低^③。

3.2 不溶微粒与 Mg^{2+} 在粒雪层中的演化过程

按照粒径将不溶微粒划分为细微粒(直径小于 $1\ \mu m$)、粗微粒(直径大于 $10\ \mu m$), 分别探讨其在粒

雪层中的演化过程。由于细微粒在后沉积过程中, 极易受到溶水的携带和淋溶作用而流失, 很难用峰值跟踪的方法追寻其行踪⁽¹⁵⁾。因此, 本文只对粗微粒和 Mg^{2+} 浓度在粒雪层中的垂直分布随时间的变化进行了对比(图 3)。

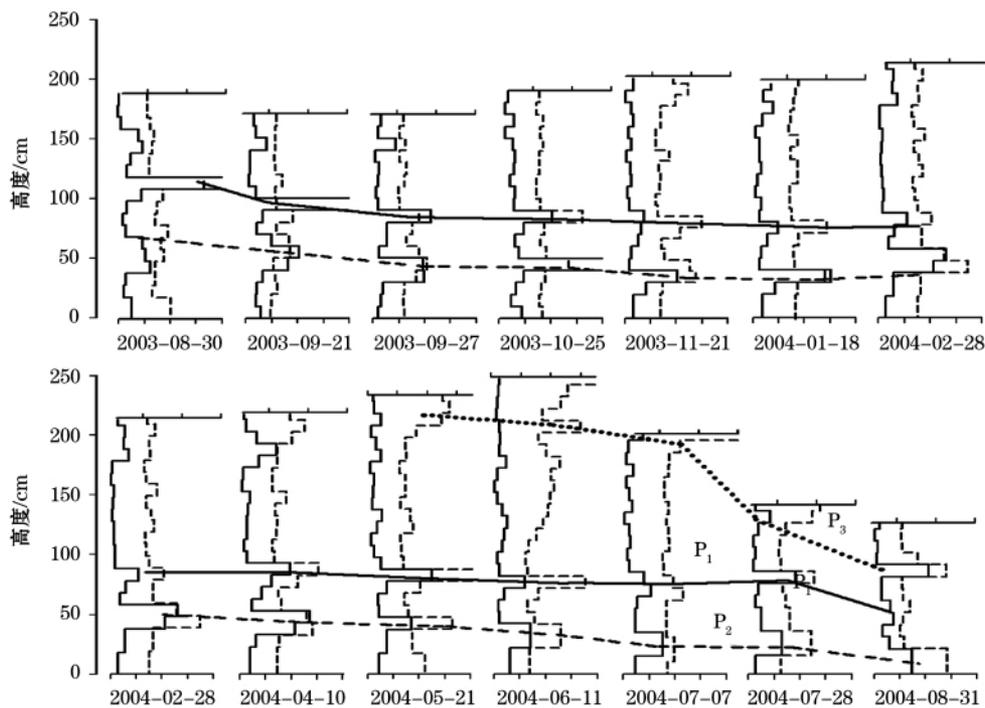


图 3 粗微粒(实线)和 Mg^{2+} (虚线)浓度在雪层剖面中的垂直分布及演化

Fig. 3 Vertical distribution and evolution process of course insoluble microparticles (solid line) and Mg^{2+} (dotted line) concentration along profiles of snow pits

由图 3 可得, 不溶微粒和 Mg^{2+} 浓度在雪层中的垂直分布曲线具有相似性。对典型的浓度峰值 P_1 和 P_2 进行跟踪(这些浓度峰值与污化层位置一致, 可作为污化层的表征), 可以得到两者在 2003 年 9 月到 2004 年 9 月演化过程。2003 年 9 月底至 2004 年 3 月下旬气温较低, 由于粒雪层的密实化过程, P_1 和 P_2 有微量下移。2004 年 1 月开始, 雪层上部出现了规模较小的浓度峰值, 很可能是由于少量的降水和微弱的蒸发引起⁽¹⁹⁻²⁰⁾。进入 4 月, 表层因频繁的沙尘和降水事件出现更多浓度峰值。 Mg^{2+} 浓度的变化较之不溶微粒更为剧烈(图 3 的 2004-04-10, 2004-05-21, 2004-06-11)。4~7 月初, 降水的频繁出现, 使得表层 10~30 cm 连续出现浓度峰值, 加之温度逐渐升高, 冰川表面出现微弱的融水, 融水携带不溶微粒和 Mg^{2+} 下渗, 使其发生明显的迁移。7 月中旬到 8 月底, 伴随着雪层厚度的锐

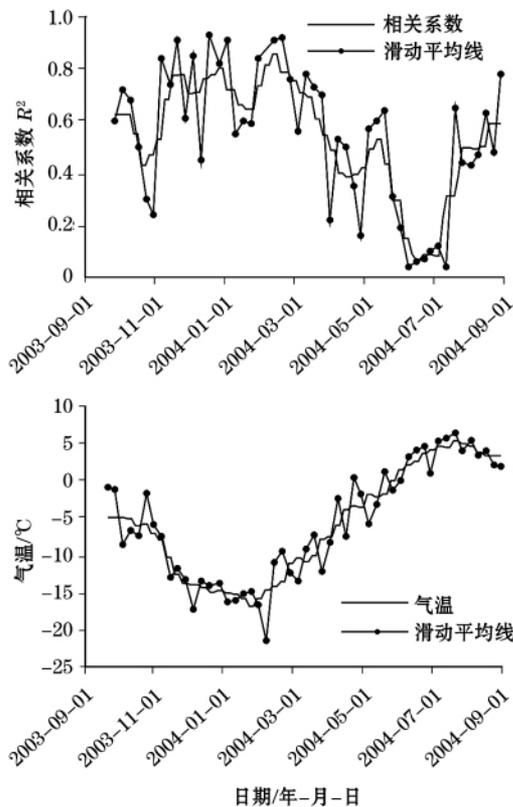
减, P_1 和 P_2 距冰面的距离大幅减小。8 月 31 日前后 P_2 没入粒雪冰层, 同时一个较为显著的浓度峰值出现在雪层上部 (P_3)。这种大规模的浓度峰值迁移是由于温度升高致使雪层融化, 融水渗浸造成的。夏季温度升高, 冰川消融, 融水携带不溶微粒和化学离子下渗, 使得不溶微粒和 Mg^{2+} 在垂直剖面上频繁迁移。当融水遇到较为坚硬的不透水层时, 发生再冻结并释放大量的潜热, 这些热量成为加热底部雪层的重要热源, 从而引起底部粒雪层进一步融化。同时, 渗浸作用导致雪层上部的不溶微粒在局部不透水层产生富集, 形成了新的污化层 (P_3)。

3.3 不溶微粒与 Mg^{2+} 在后沉积过程中的相关性

粗微粒和 Mg^{2+} 在雪层中的浓度分布具有很好的相似性。为了探讨两者在后沉积过程中的相关性

③ Thompson L G, Microparticles, Ice sheets and climate, Ohio State University, Institute of Polar Studies, 1977.

及影响因子,对粗微粒和 Mg^{2+} 在雪层中的浓度变化建立相关关系,一个采样时间得到一个相关系数 (R^2)。为了保证样本数量相同,取冰面以上 130 cm (消融期最低雪层的高度)的雪层样本进行相关分析。得到相关系数 (R^2) 随时间的变化曲线(图 4)。可以看到,较高的相关系数 (R^2 值在 0.5~0.9) 出现在冬天。6 月初到 7 月中旬 R^2 值最低,其间正是强烈消融期。7 月底 R^2 值又开始升高。对比同期日平均气温变化情况可发现, R^2 与气温的变化呈明显反相关。气温越高,不溶微粒与 Mg^{2+} 在后沉积过程中的相关性越低,气温越低,两者的相关性越高。



曲线为通过滑动平均建立的平滑曲线,样本比例为 0.100

图 4 雪层中粗微粒与 Mg^{2+} 浓度的相关性 (R^2) 随时间的变化及其与温度的关系

Fig. 4 Temporal variation of correlation coefficient between coarse insoluble microparticles and Mg^{2+} concentration and its relationship with daily air temperature

乌鲁木齐河源 1 号冰川,融化渗浸不仅是重要的成冰过程,也是不溶微粒和可溶矿物粉尘在雪层中迁移、沉积的重要影响因子。非消融期, Mg^{2+} 附着在粗微粒上通过密实化过程缓慢迁移,两者保持了较好的相关性。进入消融期,融化渗浸作用增强,

由于物理性质、迁移机制的差异,两者表现出不同的下移特征。较之粗微粒, Mg^{2+} 浓度变化在融水参与的后沉积过程中表现出更多的灵活性。

4 结论

(1) 表层雪中不溶微粒和 Mg^{2+} 的浓度变化表现出一致性,6~8 月出现浓度的最大值,并伴有较大幅度的波动,这与同期频繁的降水和盛行局地风密切相关。

(2) 粗微粒(直径大于 10 μm) 和 Mg^{2+} 浓度在雪层垂直剖面中的分布具有相似性。跟踪其与污化层对应的浓度峰值 (P_1 和 P_2),发现在消融后期,由于强烈的融水渗浸作用,最下部的浓度峰值进入冰层,雪层上部出现新的浓度峰值,成为新的污化层。

(3) 雪层剖面中,粗微粒和 Mg^{2+} 浓度分布的相关性受到温度的影响,气温越高,不溶微粒与 Mg^{2+} 在后沉积过程中的相关性越低,气温越低,两者的相关性越高。

参考文献 (References):

- (1) Mayewski P A, Lyons W B, Ahmad N. Chemical composition of a high altitude fresh snowfall in the Ladakh Himalayas (J). *Geophysical Research Letters*, 1983, 10: 105 - 108.
- (2) Mayewski P A, Spencer M J, Twickler M S, et al. Glaciochemical survey of the summit region, Greenland (J). *Annals of Glaciology*, 1990, 14: 186 - 190.
- (3) Petit J R, Mounier L, Jouzel J, et al. Palaeoclimatological and chronological implications of the Vostok core dust record (J). *Nature*, 1990, 343: 56 - 58.
- (4) 刘纯平,姚檀栋,谢树成. 祁连山敦德冰芯微粒变化特征和大气环境记录 (J). *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(3): 105 - 113. (Liu Chunping, Yao Tandong, Xie Shucheng. Characteristics of microparticle variation and record of atmospheric environment in Dunde ice (J). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, 19(3): 105 - 113.)
- (5) Dibb J E, Jaffrezo L. Air-snow exchange investigations at Summit, Greenland: An overview (J). *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 26 795 - 26 807.
- (6) Davidson C I. Chemical constituents in the air and snow at Dye 3, Greenland II. Analysis of episodes in April 1989 (J). *Atmospheric Environment*, 1993, 27: 2 723 - 2 737.
- (7) Dibb J E, Jaffrezo J L. Beryllium - 7 and lead - 210 in aerosol and snow in the Dye 3 gas, aerosol and snow sampling program (J). *Atmospheric Environment*, 1993, 27: 2 751 - 2 760.
- (8) Davidson C I, Jaffrezo J L, Mosher, et al. Chemical constituents in the air and snow at Dye 3, Greenland I. Seasonal variations (J). *Atmospheric Environment*, 1993, 27: 2 709 - 2 722.
- (9) Steffensen J P. The size distributions of microparticle from selected segments of the Greenland Ice Core Project ice core representing

- different climatic periods (J). *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(C12): 26 755 – 26 763.
- (10) Thompson L G, Wayne L. Climatological implications of microparticle concentrations in the ice core from “Byrd” station, Western Antarctica (J). *Journal of Glaciology*, 1975, 14(72): 433 – 444.
- (11) Li Zhongqin, Edwards R, Mosley-Thompson E, et al. Seasonal variabilities of ionic concentrations in surface snow and elution processes in snow-firn packs at the PGPI site on Glacier No. 1 in Eastern Tianshan, China (J). *Annals of Glaciology*, 2006, 43(1): 250 – 256.
- (12) Wang Feiteng, Li Zhongqin, You Xiaoni, et al. Seasonal evolution of aerosol stratigraphy in Glacier No. 1 percolation zone, Eastern Tianshan, China (J). *Annals of Glaciology*, 2006, 43(1): 245 – 249.
- (13) 骆鸿珍. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川的水化学特征 (J). *冰川冻土*, 1983, 5(2): 55 – 64. (Luo Hongzhen. Hydrochemical features of the Glacier No. 1 in the source region of Urumqi River, Tianshan (J). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1983, 5(2): 55 – 64.)
- (14) 王德辉, 张怀远. 天山乌鲁木齐河谷气候特征 (J). *冰川冻土*, 1985, 7(3): 239 – 248. (Wang Dehui, Zhang Peiyuan. On the valley climate of Urumqi River in the Tianshan Mountain (J). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1985, 7(3): 239 – 248.)
- (15) 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): 1 164 – 1 170. (You Xiaoni, Li Zhongqin, Wang Feiteng, et al. Seasonal evolution of insoluble microparticle stratigraphy in Glacier No. 1 percolation zone, Eastern Tianshan, China (J). *Advance in Earth Sciences*, 2006, 21(11): 1 164 – 1 170.)
- (16) 朱宇漫, 李忠勤, 尤晓妮. AccuSizer 780A 光学粒径检测仪在冰川微粒研究中的应用 (J). *现代科学仪器*, 2006(3): 81 – 84. (Zhu Yuman, Li Zhongqin, You Xiaoni. Application and technique in glacier by AccuSizer 780A Optical Particle Sizer (J). *Modern Science Apparatus*, 2006(3): 81 – 84.)
- (17) Sun Junying, Qin Dahe, Mayewski P A, et al. Soluble species in aerosol and snow and their relationship at Glacier 1, Tien Shan, China (J). *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(D21): 28 022 – 28 027.
- (18) 孙俊英, 秦大河, 任贾文, 等. 乌鲁木齐河源区水体和大气气溶胶化学成分研究 (J). *冰川冻土*, 2002, 24(2): 186 – 191. (Sun Junying, Qin Dahe, Ren Jiawen, et al. A study of water chemistry and aerosol at the headwaters of the Urumqi River in the Tianshan Mountains (J). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(2): 186 – 191.)
- (19) Ginot P, Kull C, Schwikowski M, et al. Effects of postdepositional processes on snow composition of a subtropical glacier (Cerro Tapado, Chilean Andes) (J). *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(23): 32 375 – 32 386.
- (20) Schulz O. Snowmelt and sublimation: Field experiments and modeling in the High Atlas Mountains of Morocco (J). *Hydrology and Earth System Science Discussion*, 2004, 8(6): 1 076 – 1 089.

Study on Deposition Characteristics of Insoluble Microparticles and Mg^{2+} Concentration in Snow Cover and Their Correlation

YOU Xiao-ni^{1,2}, LI Zhong-qin²

(1. Tianshui Normal College, Tianshui 741000, Gansu Province, China;

2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: It is a part of the PGPI (Program for Processes Investigation) to study the relationship between insoluble microparticles and magnesium, and it was initiated at the Tianshan Glaciological Station in July 2002. In this paper, the vertical distribution and evolution process of insoluble microparticle and magnesium concentration along vertical profiles of snow pits as well as their seasonal variation were studied by weekly sampling from a snow pit (4 130 m a. s. l., in the percolation zone) on Glacier No. 1 in the east Tianshan Mountains from September 2003 to September 2004. The analyzed results of insoluble microparticles and magnesium concentration reveal that their change trends were similar in both surface snow and along vertical snow profiles. In winter, insoluble microparticles and magnesium concentrations in surface snow layer were altered slightly by sublimation and wind erosion. In early summer, as snow melting occurred in the upper part of snow-firn pack, snow meltwater carried microparticles and magnesium to different depths of the underlying snow-firn layers, all the surface elements might be leached out from the upper layers at the end of the ablation season. Correlation coefficient between concentration of insoluble microparticles and magnesium along vertical profiles of snow layer showed a significant negative correlation with temperature.

Key words: insoluble microparticle; aerosol; mineral dust; Mg^{2+} concentration; deposition process; Glacier No. 1; Urumqi River; Tianshan Mountains