

羊卓雍流域雪坑中化学离子记录研究

郑伟^{1,2}, 姚檀栋^{1,3}, 徐柏青^{1,3}, 赵华标^{2,3}

(1. 中国科学院青藏高原研究所青藏高原环境与过程实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 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, 兰州 730000)

摘要: 2006 年 8~9 月在西藏南部羊卓雍流域采集了 3 个不同地点的 50 个雪坑样品, 分析了所有样品的阳离子(Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+})、阴离子(Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^-) 和氧稳定同位素. 分析表明, 3 个雪坑的化学特征一致, 阴离子中 NO_3^- 的浓度最高, 为 $93.7 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ($16.1 \sim 187.2 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$); 阳离子中 Ca^{2+} 浓度最高, 为 $81.0 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ($19.0 \sim 236.7 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), 分析结果同青藏高原南部其它地区的雪坑离子浓度相当(两者比值为 $0.5 \sim 2.0$), 而仅为高原北部离子浓度的 $2/5 \sim 1/25$. 该区域雪坑中离子浓度在季风季节和非季风季节差异显著, 在季风季节 NO_3^- 、 NH_4^+ 浓度升高 $30\% \sim 40\%$, 是因为受植被、牲畜、人为活动以及雷暴的影响; Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 陆源离子浓度在季风季节降低了 80% , 是由于季风季节来自北方的沙尘、大风减少和印度季风带来丰富的降水对岩屑气溶胶的“淋洗”使 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度显著降低. 阴、阳离子浓度的变化受到海拔高度的差异和沉积后作用的影响, 表现为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度随海拔降低而升高, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 随海拔降低和沉积后作用的影响而降低.

关键词: 羊卓雍流域; 雪坑; 主要离子

中图分类号: X832; X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)06-1488-07

Ionic Chemistry in Snowpits from Yamzhog Yumco Basion

ZHENG Wei^{1,2}, YAO Tan-dong^{1,3}, XU Bai-qing^{1,3}, ZHAO Hua-biao^{2,3}

(1. Environmental and Processes Laboratory of Tibetan Plateau, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Cryosphere and Environment, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: During August and September, 2006, a total of 50 samples had been collected from three different snowpits at the Yamzhog Yumco Basion in the south of the Tibetan Plateau. All samples were analyzed for major cations (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+}), anions (Cl^- , SO_4^{2-} and NO_3^-) and stable oxygen isotope ratio. The results of analyses show that the three snowpits represent accordant chemical characteristics, with NO_3^- ($16.1 \sim 187.2 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, averaging at $93.7 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) and Ca^{2+} ($19.0 \sim 236.7 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, averaging at $81.0 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) being the highest concentration of anions and cations respectively. Compared with data from other representative sites, major ion concentrations in the Yamzhog Yumco Basion accord with those in the south of the plateau, but they differ much from those in the north of the plateau. Remarkable variabilities of major ion concentrations from monsoon period to non-monsoon period are demonstrated. Ion concentrations of NO_3^- , NH_4^+ increase $30\% \sim 40\%$ in monsoon period due to the influences of vegetation, live-stock, anthropogenic activity and thunderstorm, whilst the concentrations of crustal source ions, such as Ca^{2+} , Mg^{2+} reduce 80% due to decrease of dust and strong wind from the north of the plateau and crustal aerosols being washed out of the atmosphere by heavy precipitation during the monsoon period. Variation of ion concentrations are also impacted by elevation and post-deposition process, with Ca^{2+} , Mg^{2+} increasing with a decrease in elevation and SO_4^{2-} , NO_3^- decrease with an increase in elevation and the influence of post-deposition.

Key words: the Yamzhog Yumco Basion; snowpit; major ions

通过对大气干湿沉降化学成分的认识, 对理解区域和局地的大气污染以及各种成分对水系的影响都有着很重要的作用^[1]. 在高海拔或高纬度区, 积雪是大气化学沉降的一个良好载体, 在冰川的积累区, 冰雪能较好保存大气沉降的信息^[2~4]. 同时, 恢复雪冰中有代表性的长期化学记录, 也需要了解积雪中化学成分在时间和空间尺度上的变化过程^[5, 6]. 在青藏高原北部、中部和西南地区, 如天山、敦德、唐古拉、古里雅、珠峰等区域^[7~12]已经相继展开了雪冰化学特征的研究. 其中, Wake 等^[6]认为青藏高原南部

由于受海洋性季风降水影响较大, 雪冰中海盐性离子在总的可溶性离子中所占的比重比青藏高原北部高 $3 \sim 20$ 倍, 雪冰中 Na/Cl 值接近平均海水值; 姚檀栋等^[13]通过对青藏高原北部古里雅冰芯和表层雪化学成分的分析认为陆源的 Ca^{2+} 是可溶气溶胶中的主要阳离子, 可以作为中、低纬干旱区周边冰芯中

收稿日期: 2007-06-22; 修订日期: 2007-11-05

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2005CB422004); 国家自然科学基金创新群体研究项目(40121101); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-339)

作者简介: 郑伟(1979~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为雪冰化学和寒区环境, E-mail: zhengwei@itpcas.ac.cn

反映大气成分和环境变化的指标.Kang等^[11, 12]对达索普和东绒布冰芯和雪坑离子浓度的季节变化研究同样表明, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度的高值和低值分别出现在春季和夏季, 认为亚洲干旱和半干旱区的春季沙尘物质输入是造成冰芯中尘埃来源离子浓度高值的主要原因.

1973 年以来, 中国科学院青藏高原综合考察队在羊卓雍流域先后开展了气候、冰川、湖泊等多方面的研究^[14], 但对该流域以冰雪为载体的大气化学沉降的研究基本是空白. 由于认识该地区大气环境的本底状况, 对于理解该区域大气化学的传输和沉降过程具有重要的现实意义, 同时也是恢复该地区冰芯环境变化记录的基础. 因此, 本研究通过对 2006 年 8~9 月在羊卓雍流域枪勇冰川和蒙达岗日冰川挖取的 3 个雪坑化学特征的综合分析, 并与前人在其它代表区域采集雪样的化学成分进行比较, 认识该流域降水化学的基本特征, 探讨该地区降水的物质来源及其气候和环境意义.

1 材料与方法

羊卓雍错是雅鲁藏布江以南, 喜马拉雅山北麓最大的封闭型内陆湖泊^[15], 也被纳入恒河-雅鲁藏布江水系^[16], 是印度季风水汽通道进入青藏高原内陆的前沿地带. 整个羊卓雍流域四周高山环绕, 其中南侧的西马拉雅山、西侧的宁金抗沙山等山峰都超过 6000 m, 这些高海拔山地孕育着丰富的冰川, 本研究的蒙达岗日冰川和枪勇冰川就分别位于羊卓雍流域的南侧和西侧(图 1). 根据毗邻羊卓雍错的浪卡子观测站 1961~1975 年有关气象要素统计, 该流域多年平均降水仅 372.8 mm, 降水量要比周边地区小; 雨季和旱季分明, 其中 6~9 月为雨季, 降水约占年降水量的 80%. 由于海拔较高, 多年平均气温只有 2.4℃. 这里日照长, 相对湿度小, 风大. 年平均 $\geq 17.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速的时间长达 93.1 d^[14].

2006 年 8 月下旬依次在羊卓雍流域的蒙达岗日冰川(28°29'N, 90°34'E, 海拔 6 425 m)、枪勇冰川(28°51'N, 90°14'E, 海拔 6 679 m)采集了蒙达岗日雪坑样(编号 PMY, 5 902 m)、枪勇 1 号雪坑样(编号 QY-1, 海拔 5 806 m)、枪勇 2 号雪坑样(编号 QY-2, 海拔 5 640 m)(图 1).

3 个雪坑样品的采集均是在地势平坦的积累区进行. 雪坑样品采集前, 先刮去表层 5 cm 表层雪, 然后在雪坑的迎风侧面由上向下依次每 5 cm 采取一个样品. 采样时戴一次性塑料手套, 用洁净的塑料铲

垂直于雪坑剖面直接采取, 及时装入 500 mL 的高密度聚乙烯广口样品瓶. 样品带到大本营(海拔 5 057 m)自然融化后再转入聚乙烯塑料样品瓶(所有样品瓶事先已在超净化实验室内用蒸馏水和去离子水冲洗 3 次, 密封后运至营地). 所有样品运抵中国科学院青藏高原研究所后立即存放于 -15℃ 的低温样品柜保存, 样品在分析前从冷柜中取出并自然融化. 主要阴阳离子 (Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+}) 测定分别使用中国科学院青藏高原研究所环境与过程实验室的 Dionex-2500、Dionex-2000 型离子色谱仪, 2 个离子色谱仪检测限均小于 $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 氧稳定同位素比率使用同一实验室的 Mat-253 型气体同位素质谱仪测定, 精度在 $\pm 0.2\text{‰}$ 以内. 3 个雪坑主要离子和氧同位素测试结果见图 2.

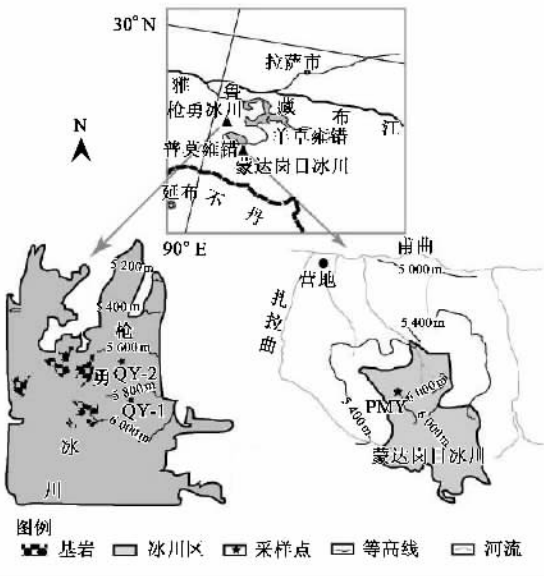


图 1 雪坑样品采集位置
Fig.1 Location of snowpit samples sites in Yamzhog Yumco Basin

2 结果与讨论

2.1 实验分析结果

根据实验测试, 得到 3 个雪坑阴阳离子平均浓度和 $\delta^{18}\text{O}$ (表 1). 3 个雪坑中, 阴离子浓度的排序均为 $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$; 阳离子浓度中, 除 NH_4^+ 外, 均显示 Ca^{2+} 远大于 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ . 雪坑中 Cl^-/Na^+ 在 1.7~1.95 之间变化, 与标准海水的比值 1.8 接近. 3 个雪坑的 $\delta^{18}\text{O}$ 也相接近, 这说明 3 个雪坑基本表现出化学组成和水汽来源相同. 然而, PMY 和 QY-1、QY-2 略有不同, PMY 中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子的浓度远高于后两者, 同时, 其 NO_3^- 、 NH_4^+ 的浓度均比后两者要

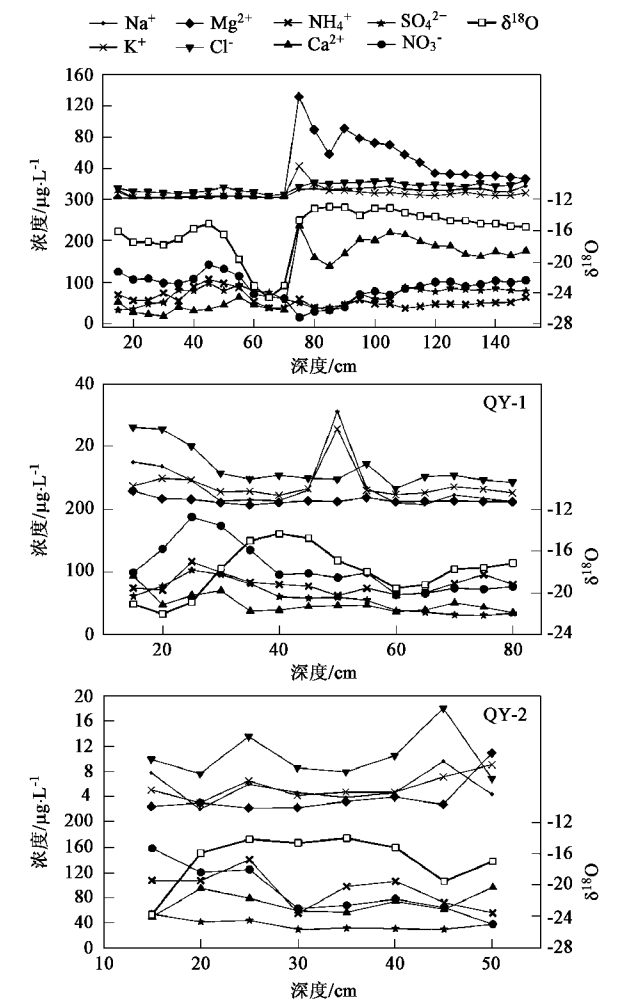


图2 雪坑主要离子和氧稳定同位素随深度变化实验

Fig.2 Variations of major ions and stable oxygen isotope ratio with depth in snowpits

表1 羊卓雍流域雪坑样品化学组成和稳定氧同位素											
Table 1 Chemical composition and stable oxygen isotope in snowpits in Yamzhog Yumco Basion											
雪坑编号	海拔高度 /m	雪坑深度 /m	离子平均浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$								$\delta^{18}\text{O}$ /‰
			Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	
PMY	5 902	1.4	16.1	69.5	87.4	9.4	57.5	8.4	34.9	122.3	-16.1
QY-1	5 806	0.7	13.0	58.2	104.3	7.4	79.9	7.7	2.7	49.0	-18.0
QY-2	5 640	0.4	10.4	36.9	89.3	5.3	92.9	5.5	3.8	71.3	-16.7

大陆性气团交替影响区,干湿季节分明,降水集中在6~9月的雨季,占全年总降雨量的80%^[24]. Tian等^[25]研究认为,受印度季风的影响,青藏高原南部氧同位素值表现出“降水量效应”,夏季伴随印度季风进入高原南部的水汽形成的降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 较低,而且季风活动越强,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 也越低. Kang等^[11]在青藏高原南部东绒布雪坑的研究中根据降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化,将雪坑代表的时间序列分为季风季节和非季风季节.据此,把能代表一年积累量的PMY

低,形成这一差异的原因将在后面详细分析.

将3雪坑中最深的雪坑PMY和全球其它有代表性的雪坑^[11, 17~20]主要离子浓度进行比较(图3),发现青藏高原北部(古里雅)离子浓度最高,高原南部(珠峰东绒布)和PMY次之,最低的是南极地区(南极点)和北极地区(格陵兰).其中,PMY和青藏高原南部的雪坑^[17, 21]无论从离子浓度量级,还是各离子浓度大小顺序的排列都相当,而与青藏高原北部在量级上差别显著.统计结果显示,青藏高原北部的离子总浓度要比两极、青藏高原南部以及PMY高6~12倍,而高原南部和PMY仅比南北两级高约1~2倍.青藏高原南部和PMY对应离子浓度的比值变化范围为0.5~2.0;而青藏高原北部与PMY对应离子浓度比值范围为2.5~25.在青藏高原北部, Cl^- 和 SO_4^{2-} 的浓度要比 NO_3^- 高出1倍,这是由于高原北部存在大量的含 Cl^- 、 SO_4^{2-} 的石盐^[22]以及分布广泛的盐湖蒸发岩也是冰川中 SO_4^{2-} 的重要来源^[23],而在本次采样的PMY, NO_3^- 反而要比 SO_4^{2-} 、 Cl^- 高出20%~4倍.PMY中 NO_3^- 浓度较高的原因将在下文阐述.通过与全球其它偏远地区分析比较,认为羊卓雍流域是青藏高原大气环境较为“洁净”的地区,该地可代表全球中低纬度偏远地区大气环境的本底状况.

2.2 季风季节与非季风季节离子浓度的差异

青藏高原南部地区降水以季风降水为主,每年夏季从印度洋海面蒸发的水汽沿雅鲁藏布江河谷进入高原南部地区.羊卓雍流域作为印度季风和亚洲

雪坑分为季风季节和非季风季节(图4).由图4可以看到,离子浓度总数在非季风季节明显高于季风季节,而和大陆性气团影响联系密切的陆源离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子总数在非季风季节、季风季节差别尤为突出.雪坑的深度能显示冰川积累量的变化过程^[26].在季风季节,PMY积累量占全年的45%(已换算成水当量),但离子总数仅占全年的32%,而 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子总数只占全年的11%.也就是说,非季风季节的总离子平均浓度为季风季节总离子平均

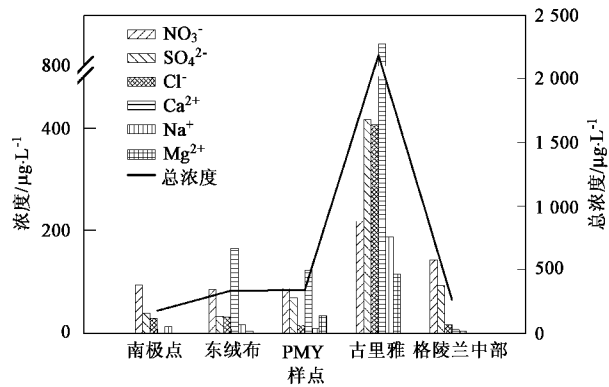


图3 羊卓雍雪坑和全球其它代表性雪坑的比较

Fig.3 Comparisons of major ion concentration in snowpit between the Yamzhog Yampo Basin and other regions in the world

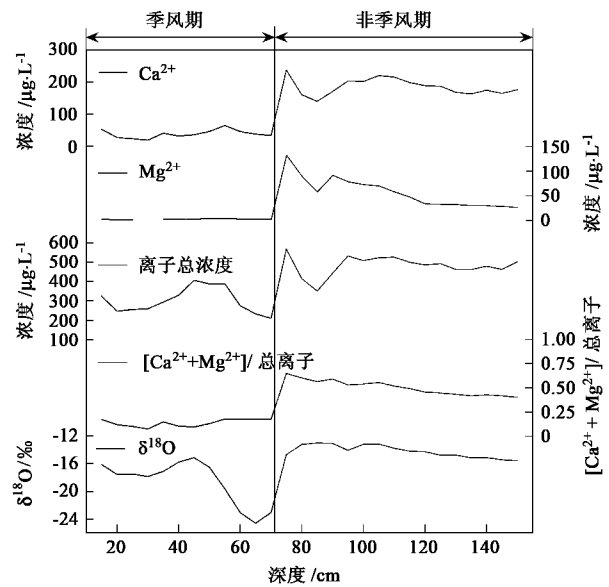


图4 羊卓雍雪坑离子浓度和稳定氧同位素的变化

Fig.4 Variation of major ions concentration and stable oxygen isotope in Yamzhog Yampo Basin

浓度的1.6倍,但 $[Ca^{2+} + Mg^{2+}]$ 平均浓度却是季风季节的5.9倍。 $[Ca^{2+} + Mg^{2+}]$ 与总离子的比值也显示,在季风季节 $[Ca^{2+} + Mg^{2+}]$ 在总离子中所占的比重变化范围为7%~18%,而在非季风季节, $[Ca^{2+} + Mg^{2+}]$ 在总离子中所占的比重范围为40%~

65%。

通过比较PMY雪坑主要离子在季风、非季风季节的浓度(表2),发现 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 这几类离子变化最明显。其中 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 4种离子在季风季节的浓度还不到非季风季节的50%,而 NO_3^- 、 NH_4^+ 表现出季风季节比非季风季节高30%~40%。引起季风季节 NO_3^- 、 NH_4^+ 增高的原因主要有2方面:①在季风季节,降水充沛,有利于牧草的生长,也是当地主要的放牧季节,而生物源和人类农业生产活动对 NO_3^- 、 NH_4^+ 的增长有着重要的贡献^[27]。Fuhren等^[28]认为 NH_4^+ 主要来自陆地土壤的释放,这也和季风季节气温升高,当地 NH_4^+ 释放加快相吻合;②季风季节贯穿于整个夏季,羊卓雍地处雅鲁藏布江河谷,在夏季,这里是高原雷暴的高发区^[29],而闪电正是对流强烈的中低纬度雪冰中 NO_3^- 的重要来源^[23, 30]。 Na^+ 、 K^+ 通常作为海盐的指示离子,但有研究表明,土壤尘埃、盐湖、碱性湖泊也是这2种离子的重要来源^[17]。PMY北临普莫雍、羊卓雍两大封闭性内陆湖泊,因此,有理由认为,在非季风季节,以北风为主的高原大陆气流携带的粉尘和当地湖泊的可溶物质是 Na^+ 、 K^+ 增高的主要原因,这一结果和珠峰东绒布雪坑观测的结果相一致^[11]。高亚洲雪冰化学研究证实, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 作为陆源气溶胶物质的指标,主要来自于中亚干旱半干旱的尘埃物质^[10, 31, 32]。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 在羊卓雍雪坑中均显示非季风季节浓度为季风季节浓度的5倍以上,这一点在所有离子中表现最为突出,羊卓雍雪坑表现出的春季高值,与青藏高原沙尘暴、大风出现的频率冬春季多,夏秋季少也正好吻合^[33]。有研究指出,季风季节降水发生频率增多,降水强度增大都会“淋洗”出大气中的岩屑气溶胶^[34],这一因素也会使得 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度在季风季节显著降低。

2.3 3个雪坑季风季节离子浓度的比较

3个雪坑尽管都属于羊卓雍流域,但是,由于地理位置、海拔高度的差异以及受局地环境影响的不同(图1、表1),3个雪坑离子浓度又表现了一定的

表2 羊卓雍雪坑季风季节和非季风季节离子浓度比较/ $\mu g \cdot L^{-1}$

Table 2 Ions concentration compared between monsoon and non-monsoon period in Yamzhog Yumco Basin/ $\mu g \cdot L^{-1}$								
离子种类	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
平均浓度	16.1	69.5	87.4	9.4	57.5	8.4	34.9	122.3
季风期浓度	10.5	68.8	102.9	3.6	69.3	4.7	2.7	38.3
非季风期浓度	20.3	70.1	75.8	13.8	48.7	11.3	57.1	185.3
比值(季风/非季风)	0.52	0.98	1.36	0.26	1.42	0.42	0.05	0.21

差异性.为了便于比较,选取在这3个雪坑都能得到显示并具有代表性的季风季节的阴、阳离子浓度进行分析(图5).

图5(a)~(c)显示的3个雪坑阴离子浓度变化,均表现为 $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$,说明它们有着相同的大气沉降源,但是,离子随深度变化的形式不尽相同.已有研究表明,若干雪冰环境信息记录不同程度地受到融水渗浸等沉积后作用的影响^[35],甚至迄今研究最为成功的格陵兰GISP2冰芯,融化事件也相当普遍^[36].淋溶过程对不同离子的影响程度存在一定的差异,对于阴离子,Tranter等^[37, 38]认为 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 较之 Cl^- 更易于被下渗融水所迁移.羊卓雍流域的雪坑也受到沉积后作用的影响,通过比较发现3个雪坑中, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 整体浓度均随着深度逐渐降低,变化幅度逐渐减小,但在PMY、和QY-1雪坑中

SO_4^{2-} 均存在一个先增大后减小的趋势.PMY、QY-1中出现 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 逐渐增大,正是体现了 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 在沉积后过程中淋溶、迁移、下渗,然后积累的过程,是雪冰化学中普遍存在的现象,但是由于海拔高度的差异,QY-2海拔较低(5640 m),又是季风季节,气温较高,随着深度迁移的离子不足以积累下来,因此总是处于一种淋溶迁移的亏损状况,所以雪坑越深的地方迁移的离子越多,最终离子浓度偏低,同时变化幅度变小.

在阳离子方面[图5(d)~(f)],3个雪坑均表现 $\text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{2+}$,同时两者又均远大于 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 的浓度,和非季风季节甚至全年阳离子浓度的排序比较,明显不同的是,在季风季节,离子浓度最高的是 NH_4^+ ,而不是 Ca^{2+} ,这可以从2方面来解释:①季风季节(5~9月)基本相当于当地以牧草为主的植

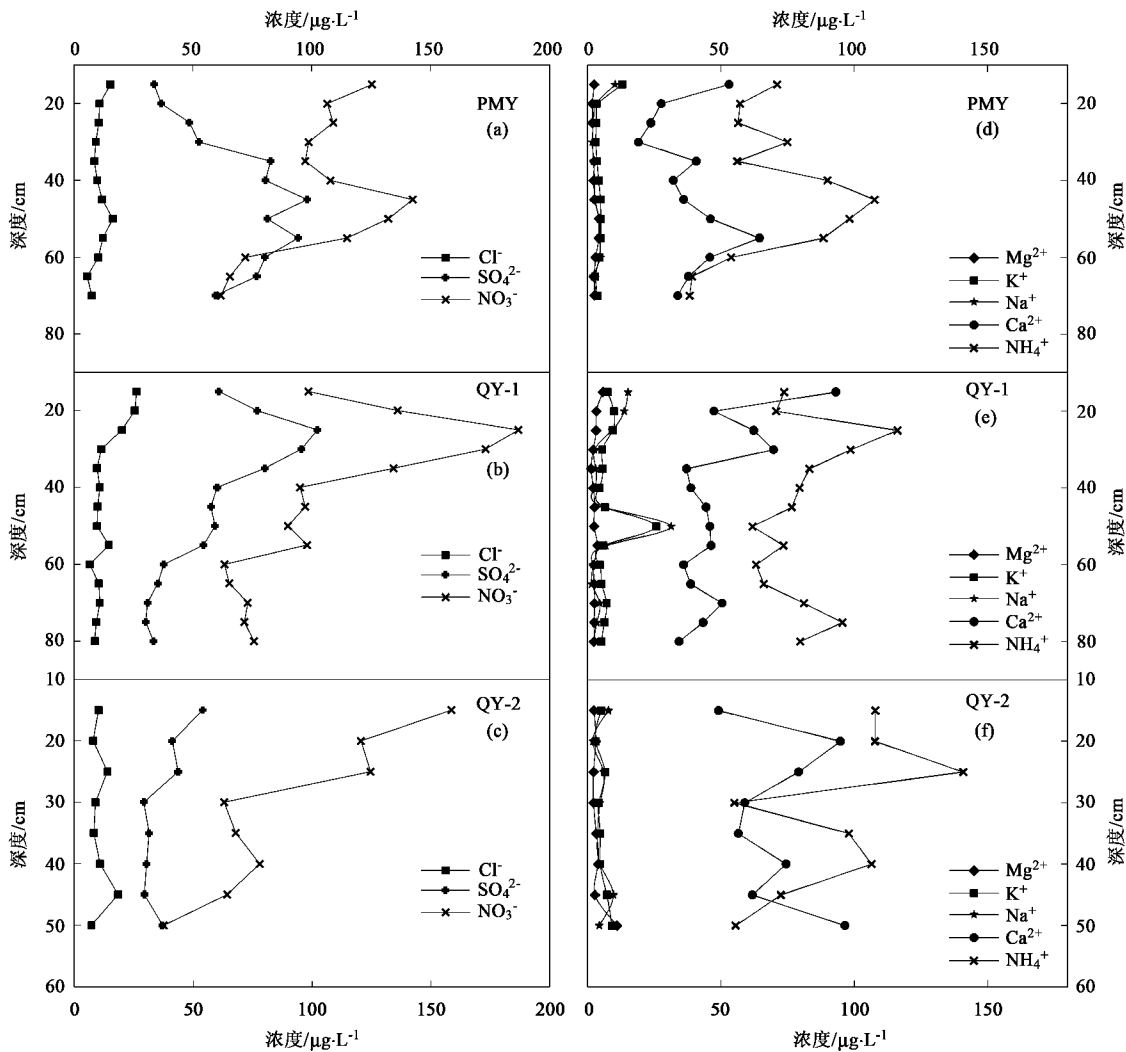


图5 3个雪坑阴、阳离子浓度的比较

Fig.5 Ions concentration comparision between three snowpits in Yamzhog Yumco Basion

物生长季,是主要的放牧季节,同时也是当地牧民1年中最主要的生产生活时段.而 NH_4^+ 自然源来自植物、土壤、动物的生物排放和生物材料的燃烧,人为活动源来自化肥,牲畜废弃物降解以及能源消耗^[39, 40],由此看来,季风季节羊卓雍雪坑 NH_4^+ 浓度升高和当地植被、牲畜以及人为活动有密切关系.此外,低海拔的QY-2、QY-1要比高海拔的PMY的 NH_4^+ 浓度高也正好印证了低海拔受人为活动影响更强烈,从而增高了 NH_4^+ 的浓度;②季风季节该地主要受印度季风控制,北部大陆气团的影响较小,所以到达该地的陆源离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 有削弱的作用,这样就导致了季风季节 NH_4^+ 要比 Ca^{2+} 浓度要高.通过3雪坑阳离子比较,发现 Na^+ 、 K^+ 离子的变化趋势基本一致.根据计算,3雪坑中 Na^+ 、 K^+ 之间的相关系数均在0.8($p=0.05$)以上,由此可见两者有着共同的来源.同时, Mg^{2+} 在季风季节很低,甚至低于 Na^+ 、 K^+ ,也说明了季风季节该区域主要受暖湿的印度季风影响.

考虑到3个雪坑离子浓度受地理位置、海拔高度的影响显著,将表现显著的陆源离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 以及 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 进行比较(图6).分析认为,海拔不同引起相关离子在该雪坑总离子中所占比例不同.3个样点海拔从高到低依次为PMY、QY-1、QY-2, [$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$]所占比例随海拔降低,采样点越接近冰川边缘,冰雪中化学成分受当地裸露的冰碛物风化岩屑化学成分的影响就越大,在风力搬运作用下越有利于粉尘到达冰雪表层,对雪冰化学成分的影响也越大,导致 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 所占的比例增大,这反映了近源粉尘对冰川的影响.罗日升等^[41]在羊卓雍流域枪勇冰川的考察结果认为,该地基岩表层所发育的沉淀物富积有大量的CaO,冰川融水中阳离子 Ca^{2+} 也占有相当大的比重.富Ca冰碛物的存在为该地冰雪化学受局地背景值影响提供了有力的证据.李月芳等^[42]关于古里雅冰帽的研究也证实,近源粉尘对冰帽边缘化学记录的影响比冰帽顶部的要大,阳离子随海拔降低而逐渐增加;喜马拉雅中段达索普冰川降水化学高程分布特征也有类似的结果^[12].上文中已经提到,阴离子中 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 受沉积后作用影响比其它离子显著^[37, 38],而气温、雪层温度是影响离子沉积后作用的重要外界因素^[43].随着海拔的降低,气温逐渐升高,沉积后作用也更为明显, NO_3^- 和 SO_4^{2-} 的淋溶迁移也会更为突出,由此导致了 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 浓度随海拔降低也随之降低.此外,青

藏高原是我国雷暴的多发地之一,与海拔低的位置相比,海拔高的位置接近对流云层的几率要更大,其发生闪电对地面产生的影响可能更大. NO_3^- 的重要来源之一是对流强烈的中低纬度地区的雷暴和闪电,这也使 NO_3^- 浓度随海拔降低而降低.

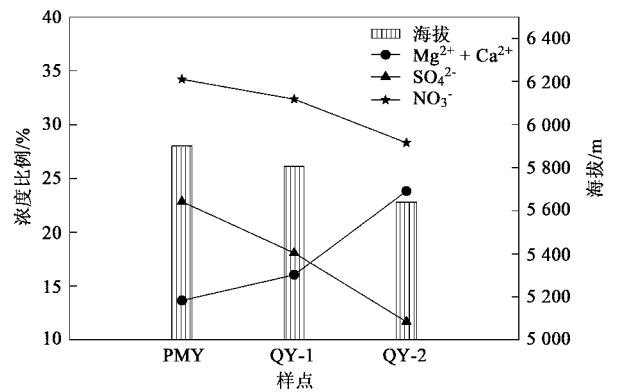


图6 季风季节海拔高度引起3个雪坑离子浓度的差异
Fig.6 Difference of ion concentration variations among three snowpits with elevation during the monsoon period

3 结论

- (1)羊卓雍流域3雪坑中,阴离子、阳离子浓度的排列顺序、量级基本一致,氧稳定同位素值相接近,表明3个雪坑基本表现出化学组成和水汽来源相同.该流域雪坑离子浓度与青藏高原南部其它雪坑离子浓度相接近,而与高原北部差别明显.
 - (2)印度季风对该地区雪坑离子浓度的影响显著,其中 NO_3^- 、 NH_4^+ 在季风季节增高主要是受植被、牲畜、人为活动以及雷暴的影响而增高, NH_4^+ 甚至高于 Ca^{2+} . Na^+ 、 K^+ 除了海洋来源,当地的2大内陆湖泊也是其重要来源. Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 陆源离子在季风季节显著降低,仅相当于非季风季节的1/5.近源粉尘对雪坑化学成分的影响导致 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 随海拔降低而升高.
 - (3)沉积后作用对离子浓度,尤其是对 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 影响显著,在3个雪坑中表现为随海拔降低而浓度降低.
- 致谢:野外工作得到了周广鹏、辛晓冬、刘勇勤、高晶等同仁的大力支持,实验室工作在曲冬梅老师的指导下完成,在此表示衷心的感谢.

参考文献:

[1] Turk J T, Taylor H E, Ingersoll G P, et al. Major-ion chemistry of the Rocky Mountain snowpack, USA [J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(23): 3957-3966.

- [2] Schoner W, Puxbaum H, Staudinger M, *et al.* Spatial variability in the chemical composition of the snowcover at high Alpine sites [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 1997, **56**: 25-32.
- [3] Turk J T, Spahr N E. Rocky Mountains[A]. In: Charles D F (ed), *Acidic Deposition and Aquatic Ecosystems-Regional Case Studies* [C]. New York: Springer, 1991. 471-501.
- [4] Turk J T, Campbell D H, Spahr N E, *et al.* Use of chemistry and stable sulfur isotopes to determine sources of trends in sulfate of Colorado lakes [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1993, **67**(3-4): 415-431.
- [5] Williams M W, Tonnessen K A, Melack J M, *et al.* Sources and spatial variation of the chemical composition of snow in the Tien Shan, China [J]. *Annals of Glaciology*, 1992, **16**: 25-32.
- [6] Wake C P, Mayewski P A, Spencer M J. A review of central Asian glaciochemical data [J]. *Annals of Glaciology*, 1990, **14**: 301-306.
- [7] Wake C P, Mayewski P A, Wang P, *et al.* Anthropogenic sulfate and Asian dust signals in snow from Tien Shan, northwest China [J]. *Annals of Glaciology*, 1992, **16**: 45-52.
- [8] Jiang F Q, Zhu C, Wei W S, *et al.* Some results of snow chemical surveys in the Kunlun River valley, East Tianshan mountain, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(31): 4941-4949.
- [9] Thompson L G, Thompson E M, Davis M E, *et al.* Holocene-Late Pleistocene climatic ice core records from Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Science*, 1989, **246**: 474-477.
- [10] 姚檀栋, 盛文坤, 蒲健辰. 唐古拉冰芯的化学组成及变化[A]. 见: 姚檀栋, 上田丰. 青藏高原冰川气候与环境——1989年中日青藏高原冰川考察研究[C]. 北京: 科学出版社, 1993. 38-43.
- [11] Kang S C, Mayewski P A, Qin D H, *et al.* Seasonal differences in snow chemistry from the vicinity of Mt. Everest, central Himalaya [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(18): 4941-4949.
- [12] 康世昌, 秦大河, 姚檀栋, 等. 喜马拉雅山中段北坡对流层中上部大气降水化学的高程分布特征[J]. *环境科学*, 2001, **22**(2): 118-122.
- [13] 姚檀栋, 郭光剑, 蒲建辰, 等. 古里雅冰芯中钙离子与大气粉尘变化关系[J]. *科学通报*, 2004, **44**(9): 888-892.
- [14] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏河流与湖泊[M]. 北京: 科学出版社, 1984. 159-168.
- [15] 刘天仇. 西藏羊卓雍错水位动态研究[J]. *地理科学*, 1995, **15**(1): 55-62.
- [16] 施雅风, 刘潮海, 王宗太, 等. 简明中国冰川目录[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2005. 139-153.
- [17] 效存德, 秦大河, 任贾文, 等. 冰冻圈关键地区雪冰化学的时空分布及环境指示意义[J]. *冰川冻土*, 2002, **24**(5): 492-499.
- [18] 秦大河. 南极冰盖表层雪内的物理过程和现代气候及环境记录[M]. 北京: 科学出版社, 1995. 102-116.
- [19] 李忠勤, 姚檀栋, 皇翠兰, 等. 古里雅冰帽中的化学物质沉积特征和现代大气环境记录[A]. 见: 西藏项目专家委员会. 青藏高原形成演化、环境变化与生态系统研究学术论文年刊[C]. 北京: 科学出版社, 1995. 11-20.
- [20] Yang Q, Mayewski P A, Linder E, *et al.* Chemical species spatial distribution and relationship to elevation and snow accumulation rate over the Greenland Ice Sheet [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, **101**(D13): 18629-18638.
- [21] 康世昌, 秦大河, 姚檀栋, 等. 希夏邦马峰北坡地区夏季末降水化学特征探讨[J]. *环境科学学报*, 2000, **20**(5): 574-578.
- [22] 李月芳, 姚檀栋, 盛文坤, 等. 干旱区粉尘对古里雅冰帽中化学记录的影响[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, **19**(2): 103-108.
- [23] 李忠勤, 姚檀栋, 谢自楚. 大气气溶胶中 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 研究[J]. *地球科学进展*, 1995, **10**(3): 289-295.
- [24] 戴加洗. 青藏高原气候[M]. 北京: 气象出版社, 1990. 1-365.
- [25] Tian L D, Masson-Delmotte V, Stievenard M, *et al.* Tibetan Plateau summer monsoon northward extent revealed by measurements of water stable isotopes [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**(D22): 28081-28088.
- [26] 姚檀栋, 上田丰, 大田哲夫, 等. 1989年中日青藏高原冰川联合考察研究[A]. 见: 姚檀栋, 上田丰. 青藏高原冰川气候与环境——1989年中日青藏高原冰川考察研究[C]. 北京: 科学出版社, 1993. 1-7.
- [27] Shrestha A B, Wake C P and Dibb J E. Chemical composition of aerosol and snow in the high Himalayas during the summer monsoon season [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31**(17): 2815-2826.
- [28] Fuhrer K, Nelftel A, Anklin M, *et al.* High-resolution ammonium ice core record covering a complete glacial-interglacial cycle [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, **101**(D2): 4147-4164.
- [29] 唐小萍, 张核真. 西藏雷暴气候特征的初步分析[J]. *西藏科技*, 2004, **14**(5): 38-40.
- [30] Legrand M, Kirchner S. Origins and variations of nitrate in south polar precipitation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, **95**(D4): 3493-3507.
- [31] 李忠勤, 姚檀栋, 谢自楚. 青藏高原古里雅冰芯中的现代大气环境记录[J]. *科学通报*, 1994, **39**(23): 2200-2201.
- [32] Wake C P, Mayewski P A, Spencer M J. A review of central Asian glaciochemistry data [J]. *Annals of Glaciology*, 1990, **14**: 301-306.
- [33] 白虎志, 马振锋, 董文杰, 等. 西藏高原沙尘气候特征及成因研究[J]. *中国沙漠*, 2006, **26**(2): 249-253.
- [34] Li C L, Kang S C, Zhang Q G, *et al.* Major ionic composition of precipitation in the Nam Co region, Central Tibetan Plateau [J]. *Atmospheric Research*, 2007, **85**(3-4): 351-360.
- [35] Hou S G, Qin D H, Ren J W. Different post depositional processes of NO_3^- in snow layers in East Antarctica and on the northern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Annals of Glaciology*, 1996, **29**: 73-76.
- [36] Alley R B, Anandakrishnan S. Variations in melt-layer frequency in the GISP2 ice core: Implications for Holocene summer temperatures in central Greenland [J]. *Annals of Glaciology*, 1995, **21**: 64-70.
- [37] Tranter M. The composition of acidic melt-water during snowmelt in the Scottish Highlands [J]. *Water, Air and Soil pollution*, 1988, **36**: 75-91.
- [38] 皇翠兰, 李忠勤, 侯书贵, 等. 离子淋溶作用对冰川化学记录的影响[J]. *科学通报*, 1996, **41**(23): 2171-2173.
- [39] Dentener F J, Crutzen P J. A three-dimensional model of the global ammonia cycle [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1994, **19**(3): 331-369.
- [40] Zhao D W, Wang A P. Estimation of anthropogenic ammonia emissions in Asia [J]. *Atmospheric Environment*, 1994, **28**(4): 689-694.
- [41] 罗日升, 曹峻, 刘耕年, 等. 西藏枪勇冰川冰下富碎屑化学沉淀特征与冰下过程[J]. *地理学报*, 2003, **58**(5): 757-764.
- [42] 李月芳, 姚檀栋, 盛文坤, 等. 古里雅冰帽 8 米浅冰芯的化学成分组成特征及其来源[J]. *冰川冻土*, 1997, **19**(2): 173-179.
- [43] 侯书贵, 秦大河. 青藏高原冰川淋溶作用的初步研究[J]. *冰川冻土*, 1996, **18**(增刊): 75-82.