

# 青藏高原冰川雪坑中离子浓度的区域特征及来源分析

武小波, 李全莲, 王宁练, 蒲健辰, 贺建桥, 张春文

(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, 兰州 730000)

**摘要:**研究了青藏高原古仁河口冰川、小冬克玛底冰川和玉珠峰冰川中的离子浓度特征. 使用离子色谱对这 3 条冰川雪坑中的样品进行了分析, 并运用相关分析法探讨了离子的主要来源. 结果表明,  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  的浓度从古仁河口冰川、小冬克玛底冰川到玉珠峰冰川依次升高, 即从高原南部到北部依次升高. 反映了从青藏高原的南部到北部, 陆源物质成分所占比重越来越大的特征. 玉珠峰冰川中  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度比古仁河口冰川和小冬克玛底冰川高几倍, 可能是由于玉珠峰冰川北侧柴达木盆地盐湖的蒸发及盐类矿物风化的结果.  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{K}^+$  和  $\text{NH}_4^+$  的来源比较复杂, 对环境的指示意义不够显著.

**关键词:** 青藏高原; 雪坑; 离子; 相关性; 来源

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)04-0971-05

## Regional Characteristics of Ion Concentration in Glacial Snowpits over the Tibetan Plateau and Source Analysis

WU Xiao-bo, LI Quan-lian, WANG Ning-lian, PU Jian-chen, HE Jian-qiao, ZHANG Chun-wen

(State Key Laboratory of Cryospheric Science, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The characteristics of ion concentration were studied in snowpit samples collected from the GRHK glacier, the XDKMD glacier and the YZF glacier over the Tibetan Plateau. Samples of snowpits in these three glaciers were analyzed by ion chromatography and ion sources were also explored by correlation analysis. The results indicated that the concentration of  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  increased from the GRHK glacier to the XDKMD glacier and to the YZF glacier, suggesting that the terrestrial matter were major origin from the south to north over the Tibetan Plateau. The concentration of  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  in YZF glacier was higher by many times than GRHK glacier and XDKMD glacier, Perhaps mainly come from the evaporation of salt lake and the weather of mineral salts in the Qaidam Basin. The sources of  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$  and  $\text{NH}_4^+$  were complicated and it is not obvious for the indication of environment.

**Key words:** Tibetan Plateau; snowpit; ion; correlation; sources

雪冰是大气中各种物质的储存库, 是气候环境变化的指示器, 是全球气候环境变化的重要信息源, 因此雪冰化学研究已成为全球变化研究的重要内容<sup>[1]</sup>. 雪冰中的阴、阳离子是反映气候变化和环境演化的可靠指标, 因此, 研究阴、阳离子的来源、传输机制及其在雪冰中的次生变化机制等问题, 不仅可以恢复气候与环境的演变, 更重要的是能够提供地理圈层之间相互作用的新证据, 特别是对物质在大气圈、岩石圈、水圈、冰冻圈和人文圈之间的迁移和转化研究有着重要意义<sup>[2]</sup>. 雪冰现代过程研究是重建冰芯古气候环境记录的基础, 雪坑化学特征研究是雪冰现代过程研究的重要内容之一<sup>[3]</sup>. 作为世界“第三极”的青藏高原, 受亚洲季风和中亚干旱半干旱气候影响, 其南部与北部的气候及环境条件截然不同, 南部为海洋性气候的温湿环境, 北部则是以大陆性气候为主导的干旱、半干旱环境. 青藏高原冰川雪冰记录的研究对揭示中低纬度环境变化具有重要意义. 近年来, 在青藏高原及其周围山区, 如天

山<sup>[4-6]</sup>、敦德<sup>[7]</sup>、唐古拉<sup>[8,9]</sup>、古里雅<sup>[10,11]</sup>、阿尼玛卿山<sup>[12]</sup>、羊卓雍流域<sup>[13]</sup>、珠峰<sup>[14,15]</sup>等区域已经相继展开了雪冰化学研究. 这些研究表明<sup>[16]</sup>, 主要阴阳离子空间分布呈现出明显规律性:  $\text{Na}^+$  有从青藏高原中部向南缘增加的趋势,  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  的空间分布趋势与  $\text{Na}^+$  正好相反, 即从青藏高原南缘海洋性气候区向北缘大陆性气候区增大. 而  $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Cl}^-$  浓度有从高原中心向北部和南缘增加的趋势,  $\text{Ca}^{2+}$  浓度的空间分布呈现出从北部和中心的大陆性冰川向南缘的海洋性冰川减少的趋势. 形成这种分布特征的主要原因是由于青藏高原北部分布着众多的盐湖、沙漠和戈壁, 为冰川上各种物质成分的大量沉积提供了丰富的物质来源. 而高原南部受海洋性季风

收稿日期: 2010-05-06; 修订日期: 2010-07-27

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40930526); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB951400); 国家自然科学基金项目(40801023, 40871038); 西部博士资助项目(290928601); 科技基础性工作专项(2006FY1102007)

作者简介: 武小波(1980~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为雪冰化学, E-mail: xiaobowu@lzb.ac.cn

降水影响较大,雪冰中海盐性离子在总可溶性离子中所占的比重比北部要高出许多。

地理环境及大气环流系统等在地域分布上的特殊性和差异性,决定了雪冰中主要离子来源及其特征的地域性和差异性。由于青藏高原广袤的面积和气候状况的区域复杂性,在不同区域进一步开展此类研究是非常必要的,甚至是过去开展过研究的地点,也仍有必要进行不同时间尺度和分辨率的研究。青藏高原本身并不是一个独立、封闭的体系,而是与其周围广大地区相互联系、相互作用。所以,通过大范围的雪冰样品分析,深入研究青藏高原的局部环境特征,具有十分重要的科学意义。本研究在青藏高原从南向北选择古仁河口冰川、小冬克玛底冰川和玉珠峰冰川采集雪样进行了离子浓度分析,结合各离子组分间的相互作用关系探讨它们的可能来源,以期为进一步开展雪冰地球化学参量反演的气候环境变化过程研究奠定基础。

## 1 研究区自然地理概况

古仁河口冰川(30°11'3"N, 98°27'2"E)位于念青唐古拉山东南麓羊八井地区(图1)。冰川面积为1.40 km<sup>2</sup>,长2.9 km,雪线高度为5720 m,冰川上限海拔6040 m,末端海拔5525 m,朝向东南。由于冰川所处位置海拔较高,冰川消融并不十分强烈,冰面河道不太发育,冰川表面比较平坦,只是冰舌前端比较陡峭<sup>[17]</sup>。小冬克玛底冰川(33°4'18"N, 90°14'01"E)地处青藏高原中部唐古拉山北侧,属大陆性干旱气候,植被稀少,生态环境恶劣,加之夏季地面为热低压控制,近地层空气强烈抬升,致使地面尘扬作用

强烈。该冰川面积为16.40 km<sup>2</sup>,长5.4 km,冰川上限海拔6104 m,末端海拔5275 m,雪线高度为5600 m,冰川表面平缓<sup>[18]</sup>。玉珠峰冰川(35°39'37"N, 094°14'28"E)位于高原北部的东昆仑山地区,气候寒冷、干旱。该冰川面积为6.75 km<sup>2</sup>,长5.7 km,上限海拔是6178 m,末端海拔是5080 m,冰川表面平缓<sup>[19]</sup>。这3条冰川所在的地区覆盖了不同的气候和植被区域,气候表现出从南部地区相对温暖湿润的状态,向北部地区寒冷半干旱、干旱的气候状态过渡;植被分布也基本呈现南部地区植被覆盖好,逐渐向北部地区减少的特征。

## 2 雪冰样品采集及实验分析

2008年5月18日、5月26日、6月2日分别在东昆仑山的玉珠峰冰川(海拔5610 m)、唐古拉山小冬克玛底冰川(海拔5670 m)、念青唐古拉山羊八井地区古仁河口冰川(海拔4520 m)挖取40 cm深的雪坑。使用洁净的不锈钢铲子清理雪坑剖面后,在雪坑的迎风侧面从上往下每隔8 cm采集一个样品,置于清洗干净的聚乙烯塑料瓶内,以冷冻状态运输到兰州中国科学院寒旱所后立即存放于-15℃的低温实验室保存。样品分析前从冷库中取出并自然融化,所有样品均在中国科学院寒旱所冰冻圈科学国家重点实验室内完成。阳离子测试使用DX-600型离子色谱仪,色谱条件为:Dionex Ion Pac CS-12A 2 mm分析柱,CG-12A保护柱,CSRS-ULTRA 2 mm抑制器,25 μL进样环,800 μL载样管,25 mm MSA淋洗液。阴离子测试使用的是ICS-2500型离子色谱仪。色谱条件为:Dionex Ion Pac As11-HC 4 mm分析柱,AG-11保护柱,ASRS-ULTRA II 4 mm自动再生微膜抑制器,电导检测器,淋洗液为KOH自动再生淋洗液。检测限可达ng·g<sup>-1</sup>,测试数据误差≤5%。

## 3 结果与讨论

### 3.1 雪坑中离子浓度的区域特征

雪冰内各种化学成分浓度的空间分布特征,不仅反映了大气环境的区域差异,而且还包含了丰富的大气环境信息。普遍认为唐古拉山以南地区,处在强季风区,孟加拉湾暖湿汽团带来较多的降水,冰川以下以草地草原为主,气候环境较“清新”,而唐古拉山以北地区,处在弱季风气候条件下的干旱半干旱荒漠草甸环境下,使得这一地区的大气环境与南部区域相比要“浑浊”得多<sup>[20]</sup>。由于雪坑太浅,根

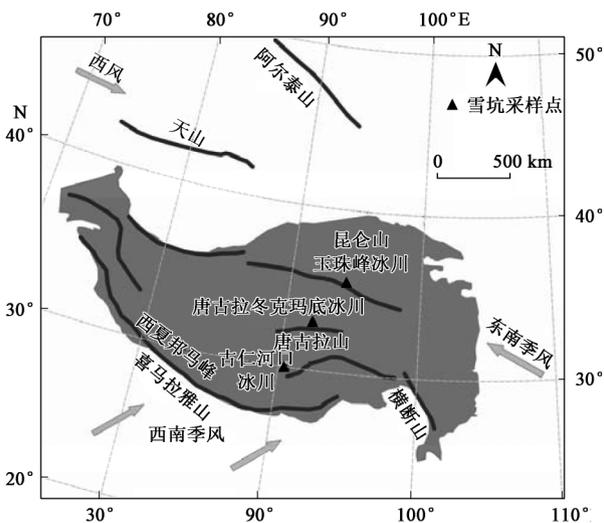


图1 雪坑采样点的位置示意

Fig. 1 Location of the sampling sites

据采样日期推断,玉珠峰冰川和小冬克玛底冰川可能仅仅是春季的一些降雪,古仁河口冰川可能是春季和夏初的部分降雪,不能代表区域上全年的雪冰离子状况。

由表 1 可知,  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  的浓度从古仁河口冰川、小冬克玛底冰川以及玉珠峰冰川依次升高,即从高原南部到北部依次升高。正好反映了从青藏高原的南部到北部,陆源物质成分所占比重越来越大的特征。这 3 条冰川雪坑中阳离子浓度的排列顺序相似,都是  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ ,说明它们都受到同源物质的影响。 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  是大气中矿物气溶胶的指示成分,其中  $\text{Ca}^{2+}$  的敏感性更强一些。一般认为, $\text{Ca}^{2+}$  浓度高,说明陆源物质多,冰川作用区较干旱;反之,则说明陆源物质少,冰川作用区较湿润<sup>[21]</sup>。这 3 条冰川雪坑中  $\text{Ca}^{2+}$  浓度所占比重最大,说明它们均受到陆源物质,即青藏高原本身局部干旱环境的影响很大。玉珠峰冰川与小冬克玛底冰川雪坑中  $\text{Ca}^{2+}$  含量相当,分别是古仁河口冰川的 5.22 和 4.37 倍。 $\text{Mg}^{2+}$  的含量也分别是古仁河口冰川的 4.37 和 4.16 倍。说明玉珠峰冰川和小冬克玛底冰川受到来自青藏高原北部广阔的干

旱、半干旱环境中陆地地壳尘埃的影响较大,而古仁河口冰川位于唐古拉山以南地区,受惠于西南或偏南季风,气候湿润,植被发育,季风带来的降水对大气中的尘埃物质不断清洗,对大气环境起了“清洁”作用,因而大气粉尘含量相对较低。就阴离子而言,古仁河口冰川与小冬克玛底冰川类似,排列顺序为  $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ 。玉珠峰冰川刚好与之相反,其排列顺序为  $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ ,与敦德冰帽相同<sup>[22]</sup>,这可能是由于敦德冰帽和玉珠峰冰川分别处于柴达木盆地南北两侧的原因。玉珠峰冰川中  $\text{Cl}^-$  含量分别是小冬克玛底冰川和古仁河口冰川的 4.33 和 12.57 倍; $\text{SO}_4^{2-}$  分别是小冬克玛底冰川和古仁河口冰川的 1.53 和 1.90 倍; $\text{Na}^+$  含量分别是小冬克玛底冰川和古仁河口冰川的 3.39 和 5.91 倍。这种现象最可能的原因是玉珠峰冰川北侧柴达木盆地盐湖物质的输入。柴达木盆地内发育了众多的盐湖,盆地内气候干燥,年蒸发量在 2 000 ~ 3 000 mm 之间,最高可达 3 700 mm,而降水量在 50 mm 以下,多风少雨,是全世界蒸发量最大的地区之一。众多盐湖蒸发和盐类矿物的风化都是玉珠峰冰川潜在的物质来源,特别是对  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  贡献较大。

表 1 3 条冰川雪坑中主要阴阳离子的平均含量<sup>1)</sup>/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Mean contents of major ion in snowpits from three glaciers/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

编号	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{NH}_4^+$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$
GRHK	443.54	273.09	277.38	2 709.88	268.44	113.53	730.54	414.51
XDKMD	773.32	167.96	1 152.73	14 088.02	574.80	329.53	530.64	515.42
YZF	2 622.53	140.84	1 211.96	14 145.24	335.73	1 426.53	339.49	786.67

1) GRHK:古仁河口冰川,XDKMD:小冬克玛底冰川,YZF:玉珠峰冰川,下同

与前所述青藏高原雪冰化学研究中阴、阳离子呈现的规律相比,只有  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  遵循了该规律。 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Cl}^-$  都表现出从南向北依次增大,可能是由于受到盐湖和局地粉尘的影响较大。而  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{K}^+$  表现出从北向南依次增大, $\text{NH}_4^+$  则在这 3 条冰川中没有表现出任何规律性。说明  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$  和  $\text{K}^+$  来源比较复杂,对环境的指示意义不够显著。因此需要结合各条冰川雪坑离子之间的相关性来进行探讨。

### 3.2 雪坑中各离子组分间的相互作用关系与物源分析

雪冰中的化学成分有三大来源:陆源物质(包括被风吹刮的当地尘埃和远距离输送的陆地粉尘)、超远距离输送的海盐,人类活动的排放物和森林火灾等。离子之间相关性的大小反映了各组分之

间的密切程度,相关性越显著,说明在来源上存在着共性。笔者主要通过本研究 3 条冰川中离子浓度之间表现出的相关性来探讨它们的来源。表 2、表 3 和表 4 依次显示了玉珠峰冰川、小冬克玛底冰川和古仁河口冰川雪坑中各离子组分之间的相关性分析结果。由表 2 可知,玉珠峰冰川雪坑中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  彼此之间均存在明显的相关性,表明它们具有相同的来源或传输途径,可能是来自柴达木盆地的盐矿如食盐( $\text{NaCl}$ )、芒硝( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )等。地壳组份  $\text{Mg}^{2+}$  与  $\text{Ca}^{2+}$  有明显的相关性,与  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  均呈明显的负相关,说明  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  可能主要来自近源的陆源物质。青藏高原及周围山区雪冰化学的研究结果表明<sup>[23]</sup>,青藏高原北部大气杂质主要为陆源物质,海洋来源的很少。 $\text{K}^+$  与  $\text{Na}^+$  相关系数为 0.80,与  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  的相关系数分别为 0.81 和 0.54,与  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  没有相关性。而且玉珠峰冰川

位于高原东北部,因此该冰川中的  $K^+$  可能主要来自西部地区的盐碱湖物质. Xiao 等<sup>[24]</sup> 研究认为,青藏高原主要离子的时空分布特征反映了控制高原雪冰化学的 2 个大气传输过程:由高原南部向北传输的西南季风过程和从高原北部向南传输的陆地扬尘天气过程;在空间上,这 2 种过程在唐古拉山一线达到准平衡. 由表 3 可知,小冬克玛底冰川中离子之间的相关性与玉珠峰冰川有所不同, $Na^+$ 、 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$  与  $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  彼此之间均存在显著的相关性,说明这些离子具有较为一致的来源. 它们可能主要来自陆源物质,部分  $Na^+$ 、 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$  和  $K^+$  可能还来源于荒漠区和盐湖区.

表 2 玉珠峰冰川雪坑中离子之间的相关性<sup>1)</sup>

Table 2 Correlation coefficients among ion in the YZF glacier

	$Na^+$	$K^+$	$Mg^{2+}$	$Ca^{2+}$	$NH_4^+$	$Cl^-$	$NO_3^-$	$SO_4^{2-}$
$Na^+$	1							
$K^+$	0.80	1						
$Mg^{2+}$	-0.46	0.08	1					
$Ca^{2+}$	-0.40	0.01	0.95*	1				
$NH_4^+$	0.38	-0.07	-0.60	-0.32	1			
$Cl^-$	0.98**	0.81	-0.34	-0.24	0.44	1		
$NO_3^-$	0.55	0.12	-0.91*	-0.81	0.76	0.49	1	
$SO_4^{2-}$	0.92*	0.54	-0.77	-0.68	0.59	0.86	0.82	1

1) \* 表示置信度为 95%, \*\* 表示置信度为 99%, 下同

表 3 小冬克玛底冰川雪坑中离子之间的相关性

Table 3 Correlation coefficients among ion in the XDKMD glacier

	$Na^+$	$K^+$	$Mg^{2+}$	$Ca^{2+}$	$NH_4^+$	$Cl^-$	$NO_3^-$	$SO_4^{2-}$
$Na^+$	1							
$K^+$	0.99**	1						
$Mg^{2+}$	0.98**	0.94*	1					
$Ca^{2+}$	0.98**	0.99**	0.94*	1				
$NH_4^+$	0.56	0.48	0.58	0.45	1			
$Cl^-$	0.97**	0.92*	0.99**	0.92*	0.69	1		
$NO_3^-$	-0.65	-0.59	-0.68	-0.59	-0.93*	-0.75	1	
$SO_4^{2-}$	0.98**	0.93*	0.99**	0.94*	0.62	0.99**	-0.70	1

表 4 古仁河口冰川雪坑中离子之间的相关性

Table 4 Correlation coefficients among ion in the GRHK glacier

	$Na^+$	$K^+$	$Mg^{2+}$	$Ca^{2+}$	$NH_4^+$	$Cl^-$	$NO_3^-$	$SO_4^{2-}$
$Na^+$	1							
$K^+$	0.83	1						
$Mg^{2+}$	0.66	0.13	1					
$Ca^{2+}$	0.64	0.12	0.99**	1				
$NH_4^+$	0.81	0.49	0.79	0.82	1			
$Cl^-$	0.80	0.34	0.98**	0.97**	0.87*	1		
$NO_3^-$	0.65	0.22	0.88*	0.92*	0.89*	0.89*	1	
$SO_4^{2-}$	0.85	0.44	0.93*	0.94*	0.91*	0.98**	0.93*	1

的相互关系比玉珠峰冰川和小冬克玛底冰川要复杂的多. 由表 4 可知, $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  与  $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$  彼此之间都具有显著的相关性, $Na^+$ 、 $Cl^-$  和  $SO_4^{2-}$  彼此之间的相关系数都大于 0.80, 但该冰川中  $Na^+$  与代表陆源成分的  $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  的相关系数只有 0.64 和 0.66, 说明古仁河口冰川中  $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Cl^-$  和  $SO_4^{2-}$  主要来自陆源物质,部分  $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$  可能来自青藏高原盐湖.  $K^+$  与  $Na^+$  的相关系数为 0.83,  $K^+$  与  $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  的相关性很差,说明  $K^+$  可能主要来自盐碱湖物质也许还有少量海盐来源. 综合以上考虑,古仁河口冰川中的  $Na^+$  也许是陆源物质、青藏高原盐湖以及海盐来源的综合结果.  $NO_3^-$  和  $NH_4^+$  的来源比较复杂,在 3 条冰川中与其它离子表现出的相互作用关系也各不相同.  $NO_3^-$  主要有闪电、平流层交换、海盐、陆源物质和人类污染等来源<sup>[25-27]</sup>. 古仁河口冰川中, $NO_3^-$  与  $NH_4^+$  的相关系数是 0.89, 可能代表了区域农业活动排放源(农业生产中化肥的大量使用和牲畜排泄物的生物分解过程)对两者的贡献.  $NO_3^-$  与  $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  的相关系数为 0.88 和 0.92, 说明部分  $NO_3^-$  还来自陆源. 地壳源粉尘颗粒物本身对  $NO_3^-$  并没有贡献,其仅充当赋存和沉降的载体形成硝酸盐的  $Ca(NO_3)_2$  覆盖层,而后进行长距离传输.  $NH_4^+$  与  $SO_4^{2-}$ 、 $Cl^-$  的相关性也比较好,相关系数  $> 0.87$ , 它们可能主要是以  $(NH_4)_2SO_4$ 、 $NH_4NO_3$  和  $NH_4Cl$  的形式以湿沉降的方式随降雪保存在冰川表面<sup>[28]</sup>. 同时也侧面反映出部分  $SO_4^{2-}$  还与人为污染有关. 小冬克玛底冰川中  $NO_3^-$  与其它离子都没有相关性,研究表明,闪电是对流强烈的中低纬度雪冰中  $NO_3^-$  的重要来源<sup>[25]</sup>. 王宁练等<sup>[26]</sup> 对古里雅冰芯中  $NO_3^-$  的研究发现,太阳活动、平流层  $N_2O$  的氧化是古里雅冰芯中  $NO_3^-$  的主要来源. 小冬克玛底冰川位于青藏高原腹地,其雪冰中的  $NO_3^-$  可能来自闪电和平流层交换等.  $NH_4^+$  与其它离子的相关性较弱,可能主要来自陆地土壤释放<sup>[29]</sup>. 玉珠峰冰川中, $NO_3^-$  与  $SO_4^{2-}$ 、 $NH_4^+$  的相关系数分别是 0.82 和 0.76, 与其它离子都没有相关性, $NH_4^+$  和  $SO_4^{2-}$  的相关系数是 0.59, 说明玉珠峰冰川中的  $NO_3^-$  与  $NH_4^+$  主要是来源于人为活动产生,部分  $SO_4^{2-}$  来自人为污染.

#### 4 结论

(1) 3 条冰川雪坑中阳离子浓度的排列顺序相似,都是  $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+} > K^+$ , 表明它们均受到

古仁河口冰川位于青藏高原中南部,既受海洋性季风降水的影响,也受从高原北部向南传输的陆源物质影响. 因此,古仁河口冰川雪坑中离子之间

陆源物质,即青藏高原本身局部干旱环境的影响。古仁河口冰川与小冬克玛底冰川阴离子排列顺序为  $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ ,玉珠峰冰川刚好与之相反。玉珠峰冰川中  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度比古仁河口冰川和小冬克玛底冰川高几倍,可能是由于柴达木盆地的盐湖蒸发及盐类矿物风化的结果。

(2)雪坑中各离子之间的相关性表明,3条冰川中  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  都主要来自陆源物质。 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  在玉珠峰冰川中主要来自盐湖,在小冬克玛底冰川和古仁河口冰川中主要来自盐湖和陆源物质。海盐对古仁河口冰川中的  $\text{K}^+$  和  $\text{Na}^+$  也有少量贡献。 $\text{NO}_3^-$  的来源比较复杂,在玉珠峰冰川中主要来自人为污染,小冬克玛底冰川中主要来自闪电和平流层交换,古仁河口冰川中主要来自陆源物质和人类污染。 $\text{NH}_4^+$  都来自人为污染。

致谢:感谢王晓香老师对样品的测试分析。

#### 参考文献:

- [1] Duan K Q, Thompson L G, Yao T D, *et al.* A 1000 year history of atmospheric sulfate concentrations in southern Asia as recorded by a Himalayan ice core[J]. *Geophys Res Lett*, 2007, **34**: L01810, doi:10.1029/2006GL027456.
- [2] 李宗省,何元庆,庞洪喜,等. 我国典型季风海洋型冰川区雪坑中主要阴、阳离子的来源[J]. *地理学报*, 2007, **162**(9): 992-1001.
- [3] 康世昌,秦大河,任贾文. 北极 Svalbard 群岛 Longyearbyen 地区雪坑主要阴阳离子特征研究[J]. *极地研究*, 1998, **10**(3): 172-180.
- [4] Zhao Z P, Tian L D, Fischer E, *et al.* Study of chemical composition of precipitation at an alpine site and a rural site in the Urumqi River Valley, Eastern Tien Shan, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(39): 8934-8942.
- [5] Jiang F Q, Zhu C, Wei W S, *et al.* Some results of snow chemical surveys in the Kunlun River valley, East Tianshan mountains, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(31): 4941-4949.
- [6] Li Z Q, Edwards R, Thompson E M, *et al.* Seasonal variability of ionic concentrations in surface snow and elution processes in snow-firn packs at the PGPI site on Urumqi glacier No. 1, eastern Tien Shan, China [J]. *Annals of Glaciology*, 2006, **43**(1): 250-256.
- [7] Yang M X, Yao T D, Wang H J. Microparticle content records of the Dunde ice core and dust storms in northwestern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, **27**(2): 223-229.
- [8] Zheng W, Yao T D, Joswiak D R, *et al.* Major ions composition records from a shallow ice core on Mt. Tanggula in the central Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Atmospheric Research*, 2010, **97**(1-2): 70-79.
- [9] 张玉兰,康世昌,张强弓,等. 青藏高原中部各拉丹东峰雪坑记录特征[J]. *冰川冻土*, 2007, **29**(5): 685-693.
- [10] 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.
- [11] 姚檀栋,邬光剑,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.
- [12] 武小波,王宁练,李全莲,等. 黄河源区阿尼玛卿山耶和龙冰川表层雪化学组成 [J]. *冰川冻土*, 2008, **30**(3): 415-420.
- [13] 郑伟,姚檀栋,徐柏青,等. 羊卓雍流域雪坑中化学离子记录研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(6): 1488-1494.
- [14] Liu Y P, Geng Z X, Hou S G. Spatial and seasonal variation of major ions in Himalayan snow and ice [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, **37**(2): 195-205.
- [15] Kang S C, Mayewski P A, Qin D H, *et al.* Seasonal differences in snow chemistry from the vicinity of Mt. Everest, central Himalayas [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(18): 2819-2829.
- [16] Wake C P, Mayewski P A, Spencer M J. A review of central Asian glaciochemical data [J]. *Annals of Glaciology*, 1990, **14**: 301-306.
- [17] 蒲建辰,姚檀栋,田立德. 念青唐古拉山羊八井附近古仁河口冰川的变化[J]. *冰川冻土*, 2006, **28**(6): 861-864.
- [18] 侯书贵,秦大河,皇翠兰. 唐古拉山冬克玛底冰川雪层中淋溶作用的初步研究[J]. *冰川冻土*, 1996, **18**(3): 227-234.
- [19] 蒲建辰. 中国冰川目录(长江水系) [M]. 兰州:甘肃文化出版社, 1994. 79.
- [20] 施雅风,黄茂垣,姚檀栋,等. 中国冰川与环境 [M]. 北京:科学出版社, 2000. 135.
- [21] 盛文坤,姚檀栋,李月芳,等. 古里雅冰芯中钙离子含量及与气候变化关系[J]. *冰川冻土*, 1999, **21**(1): 19-21.
- [22] 霍文冕,姚檀栋. 敦德冰芯 19 世纪中叶以来的环境记录[J]. *地球化学*, 2001, **30**(3): 203-207.
- [23] 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: 青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究 [M]. 北京:科学出版社, 1995. 11-20.
- [24] Xiao C D, Kang S C, Qin D H, *et al.* Transport of atmospheric impurities over the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau as shown by snow chemistry [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, **20**(3): 231-239.
- [25] Lee D S, Kohler I, Grobler E, *et al.* Estimations of global  $\text{NO}_x$  emissions and their uncertainties [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31**(12): 1735-1749.
- [26] 王宁练,姚檀栋, Thompson L G. 青藏高原古里雅冰芯中  $\text{NO}_3^-$  浓度与太阳活动 [J]. *科学通报*, 1998, **43**(3): 309-312.
- [27] Jacobi H W, Hilker B. A mechanism for the photochemical transformation of nitrate in snow [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2007, **185**(2-3): 371-382.
- [28] 王朋岭,姚檀栋,田立德,等. 喜马拉雅山中段达索普最新粒雪芯高分辨率化学记录 [J]. *科学通报*, 2007, **52**(21): 2549-2555.
- [29] 赵华标,姚檀栋,徐柏青,等. 慕士塔格冰芯中近百年来  $\text{NH}_4^+$  浓度的变化 [J]. *科学通报*, 2008, **53**(7): 815-820.