

夏季玉龙雪山地区不同水体常规阴离子特征及其来源分析

朱国锋^{1,2}, 何元庆^{1,3}, 蒲焘³, 张宁宁^{1,2}, 王淑新^{1,2}, 辛惠娟^{1,2}

(1. 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/玉龙雪山冰川与环境观测研究站, 兰州 730000;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 兰州大学西部环境与气候变化研究院, 兰州 730000)

摘要:依据 Dionex-3000 型离子色谱仪和 Dionex-600 型离子色谱仪测定的云南省丽江市玉龙雪山地区 2005 年 7 月 22 日~7 月 28 日不同水体的阴离子数据及同期降水中的无机离子数据,运用系统聚类、海盐示踪、后推气流模型分析等方法,分析了人类活动、岩石岩性、大气干湿沉降对我国云南省丽江市玉龙雪山地区不同水体阴离子构成和浓度的影响。结果显示,玉龙雪山地区阴离子浓度和组成在 3 180 m 以上受人类活动和岩石岩性影响较小,主要受大气干湿沉降影响,3 180 m 以下人类活动和岩石作用对水体阴离子浓度的影响增强,人类活动和岩石作用对低海拔地区水体阴离子浓度和组成的影响远大于对高海拔地区的影响。聚类分析发现高海拔地区各水体阴离子浓度和离子组成一致性很强,低海拔地区水体间一致性较弱,说明低海拔水体离子浓度的影响机制较为复杂。海盐示踪法分析表明该区湿沉降中 Cl^- 非海洋源平均值为 65%; NO_3^- 认为是陆源物质贡献; SO_4^{2-} 平均值为 93.7%,说明海盐对 Cl^- 浓度影响较大;后推气流轨迹模型分析表明 2005 年 7 月 22 日~7 月 30 日气团主要来自于印度洋,沿途主要经过南亚地区,同时有少量来自于东太平洋的气团, SO_4^{2-} 和 NO_3^- 主要为南亚、东南亚和我国东南沿海工业区的污染物质随季风环流输入。

关键词:玉龙雪山地区;阴离子;海盐示踪;系统聚类分析;相关性分析

中图分类号:X13 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2011)03-0626-06

Character and Sources of Conventional Anion in Different Water Bodies on the Summer in Yulong Snow Mountain Area

ZHU Guo-feng^{1,2}, HE Yuan-qing^{1,3}, PU Tao³, ZHANG Ning-ning^{1,2}, WANG Shu-xin^{1,2}, XIN Hui-juan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences Yulong Snow Mountain Glaciers and Environmental Observation Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Research School of Arid Environment and Climate Change, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Different water samples were collected at Mt. Yulong Region located in Lijiang city, Yunnan Province from July 22 to July 28 in 2005. The concentration of anion was measured by Dionex-3000 Ion chromatography and Dionex-600 ion chromatography, different water bodies anion composition and concentration in the study area were analyzed by applying approaches of cluster analysis sea salt iron tracer and typical backward trajectories analyze. The results show that the anion concentration of water of altitude higher than 3 180 m takes on natural state and the influence of human activities and foundation rock is less significant. However, human activities and foundation rock exert direct and decisive influence on the anion concentration of water of altitude lower than 3 180 m, with more significant effects than high altitude. Cluster analysis shows that at high altitude anion concentration and composition of water have strong consistency, the consistency of different water bodies in low altitude area anions is weak, indicating the influence factors is more complex in low altitude than high altitude. Sea salt tracer analysis indicates that the average proportion of nonmarine source of Cl^- is 65%; NO_3^- is predominantly of continental origin; nonmarine sources proportion of SO_4^{2-} is 93.7%. Typical backward trajectories analyze found that the mostly vapor in the region mainly from the Indian Ocean, part of the vapors from the eastern Pacific, the west wind South Branch occasionally along Tibetan Plateau into the study area. SO_4^{2-} and NO_3^- which from mainly from Southeast Asia and South Asia input with the monsoon circulation.

Key words: Yulong Snow Mountain area; anion; sea salt tracer; cluster analysis; correlation analysis

收稿日期:2010-05-06;修订日期:2010-09-25

基金项目:中国科学院“西部之光”人才培养计划项目(O828A11001);国家自然科学基金项目(40971019,90511007,40801028);国家重点基础研究发展规划(973)项目(2007CB411501);中国科学院重要方向性项目(KZCXZ-YW-317);冰冻圈科学国家重点实验室自主项目;国家自然科学基金基础人才培养基金冰川学冻土学特殊学科点项目(J0630966)

作者简介:朱国锋(1983~),男,博士研究生,主要研究方向为冰雪水文与水化学,E-mail:guofeng_zhu@yahoo.cn

人类活动、岩石岩性、大气干湿沉降等因素都可能对水体主要离子产生影响,水体阴离子因相对受岩石岩性、大气降水的影响较弱而成为研究人类活动对水体水化学成分影响的可靠手段^[1~3]。为研究影响玉龙雪山地区不同水体的影响因素,尤其是人类活动对玉龙雪山地区不同水体的影响,本研究选择了玉龙雪山地区 11 个代表性较强的水体,通过对水体常规阴离子的浓度和组成特征的分析来揭示玉龙雪山地区不同因素对水体主要阴离子所产生的影响。玉龙雪山位于云南省丽江市西北部,处于北纬 $27^{\circ}10' \sim 27^{\circ}40'$ 、东经 $100^{\circ}10' \sim 100^{\circ}20'$ 之间,是我国纬度最南的一座雪山,也是欧亚大陆距赤道最近的海洋型冰川区。东麓是海拔约 3 000 m 的干海子盆地,南面是丽江盆地。该区域地处西部季风气候区,在季风环流、高原季风以及西风环流的影响下,降水量较为丰富,降水量年内变化大,5~10 月降水占全年降水的 90% 左右。该区域处于我国第一二阶梯交汇处,地域环境状况复杂,演变剧烈,区内岩溶发育强烈,使得地下水系发达。同时,玉龙雪山地区位于低纬度人类活动发达区,20 世纪 80 年代开发为国家级旅游区,丽江市 2006 年统计机动车辆 56 760 辆,星级酒店 178 家,2007 年全市户籍人口 120.26 万,接待游客 550 万,生态环境人为扰动大。区域内各水体离子除受到季风性降水、冰雪融水的影响外,人类活动的影响越来越强烈,是研究我国西部高山寒区环境中地-气-人相互影响非常理想的区域。7 月末是玉龙雪山地区西南季风最盛期,同时也是旅游旺季。各水体受大气环流、冰川消融、大气降水、人类活动的影响几乎都会达到一个峰值,此时是研究我国西部高山寒区环境中地-气-人相互影响非常理想的时间段。对水体离子的来源、传输机制及其在水体中的次生变化机制等问题的研究,是探究人类活动对水体环境变化影响的可靠手段之一^[4~8]。1999 年以来,何元庆课题组对玉龙雪山地区降水、冰川雪坑的化学特征进行了研究,但未系统性开展该地区流域水体化学特征的研究,分析流域内各种水体之间的潜在联系^[8~12]。本研究重点讨论了夏季玉龙雪山地区各种代表性水体的阴离子特征、形成机制及离子来源,以期对玉龙雪山地区的水体现代过程研究提供基础资料。

1 野外采样和实验分析方法

本研究于 2005 年夏季(7 月 22 日~7 月 28 日)在玉龙雪山-丽江盆地沿不同海拔高度对不同水体

进行了系统采样,采样区域和采样点如图 1。所有冰雪、冰雪融水以及河湖样品直接装入事先用去离子水清洗干净的敞口聚氯乙烯塑料瓶内,样品瓶为 120 mL。采样后立即冷冻运至中国科学院寒区旱区环境与工程研究所存放于 -15°C 的低温室保存。分析前 2 d 将样品取出并在室温(约 23°C)下自然融化,然后进行主要离子浓度的测量。用 Dionex-3000 型离子色谱仪测定 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 浓度,精度可达 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 级,测试数据误差 $<5\%$ 。用 Dionex-600 型离子色谱仪测定 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度用作海盐示踪辅助计算,精度可达 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 级,测试数据误差 $<5\%$,测定结果如表 1。



图1 玉龙雪山地区主要水体采样点示意

Fig. 1 Schematic diagram of main water sampling points in Yulong Snow Mountain area

2 结果

2.1 不同水体阴离子特征及形成机制

Cl^- 浓度随海拔梯度的变化整体变幅较大,如图 2,在海拔 4 270 m 以上的冰舌冰和冰舌融水中浓度较高,分别为 0.067 mg/L 和 0.064 mg/L 。主要是由于大气环流系统传输和近源 Cl^- 输入,该区山谷

表1 玉龙雪山地区代表性水体常规阴离子浓度值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Major anion average concentration in different water bodies in Yulong Snow Mountain area / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

编号	海拔高度/m	采样时间	名称	Cl^{-}	NO_3^{-}	SO_4^{2-}	阴离子总浓度
1	4 350	2005-07-24	白水一号冰川冰	0.067	0.024	0.040	0.131
2	4 270	2005-07-24	冰川冰舌融水	0.064	0.032	0.130	0.225
3	3 520	2005-07-30	牦牛坪(雪花池)	0.016	0.144	0.096	0.256
4	3180	2005-07-23	文海(湖)	0.033	0.007	0.164	0.204
5	3 180	2005-07-23	文海入口(上)	0.064	0.005	0.070	0.140
6	3 064	2005-07-24	甘海子	0.410	0.003	2.925	3.338
7	2 470	2005-07-22	玉峰寺	0.160	0.003	6.018	6.180
8	2 441	2005-07-23	拉市海	0.295	0.012	1.325	1.631
9	2 437	2005-07-23	团山水库	0.693	0.057	4.765	5.515
10	2 400	2005-07-22	黑龙潭	0.634	0.876	1.894	3.404
11	2 357	2005-07-23	木家桥	0.898	0.531	1.034	2.463

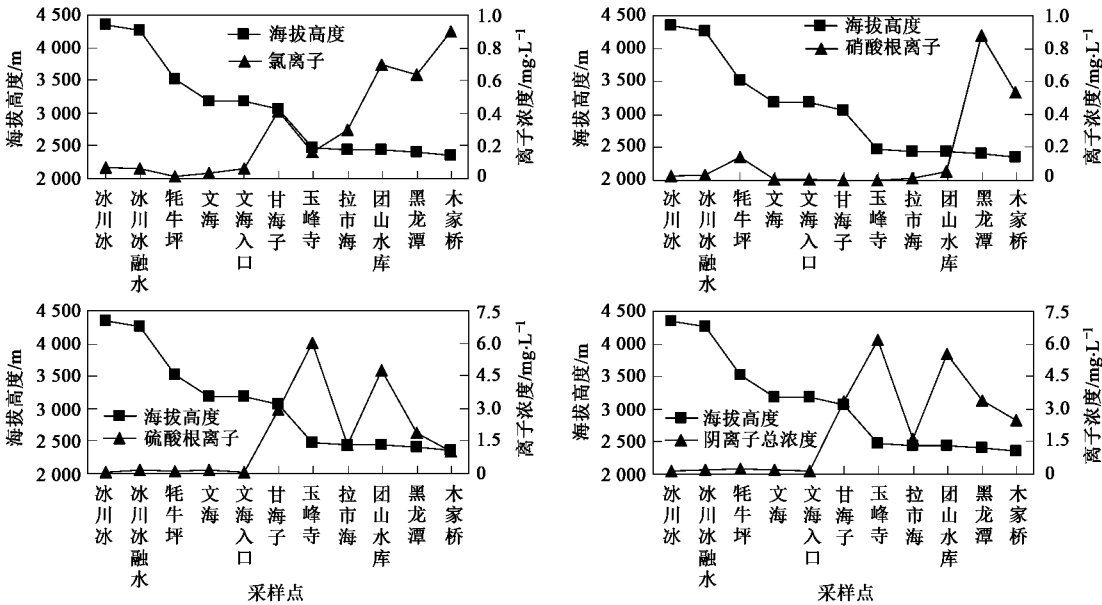


图2 阴离子在不同水体中的浓度变化

Fig. 2 Change of anion concentrations in different water bodies

风强劲,并且表现出在一定范围内随海拔上升而不断加强的特点,为风化物质进入高海拔水体提供了强大的动力源,山地强劲持久的大风将附近地表裸露岩石的风化产物吹至积雪或融水内^[9,10],使高海拔水体的 Cl^{-} 浓度基本保持在一个相对较高值. 在海拔 3 520 ~ 3 180 m 之间的水体 Cl^{-} 整体浓度较低,原因是该区域山谷风减弱并且受人类活动扰动较小, Cl^{-} 的主要来源只有大气降水. 2 470 ~ 2 357 m 之间 Cl^{-} 浓度整体较高,①受人类活动的影响,人类活动导致的生产生活次生废水、排泄物

等直接进入水体或以大气气溶胶的形式溶解于水体中. ②受局地水岩作用影响. ③土壤粉尘和盐碱湖物质的干湿沉降. 低海拔地区人类活动频繁且水岩作用强烈,该地区的甘海子 (3.338 mg/L)、团山水库 (0.898 mg/L)、黑龙潭 (3.404 mg/L) Cl^{-} 浓度较高.

NO_3^{-} 浓度出现双峰分布格局,在 4 350 ~ 3 520 m 浓度逐渐升高,在牦牛坪 (3 520 m) 出现小峰值,在 3 180 ~ 2 470 m 浓度基本稳定在一个较低水平,2 470 ~ 2 400 m 浓度急剧升高,黑龙潭

(0.876 mg/L) 达到浓度峰值,如图 2,双峰分布格局说明在该地区可能存在 2 个影响 NO_3^- 浓度的主要因素;①高海拔区域雨季冰川区频繁降水过程中的闪电对 NO_3^- 的贡献是导致 4 743 ~ 4 800 m 离子浓度上升的主要原因^[8];② NO_3^- 与海气和岩性联系不密切,推测低海拔地区的 NO_3^- 主要来自汽车尾气和化石燃料燃烧。

SO_4^{2-} 浓度整体上波动较大,如图 2,这说明影响 SO_4^{2-} 浓度的因素较复杂,在 3 180 m 以上随着海拔高度的升高 SO_4^{2-} 离子浓度急剧下降,其来源主要是西风环流远源物质和高原面物质,季风环流途经大陆时沿途所携带的 SO_4^{2-} 贡献,因为东南季风环流在西伸时经过我国南方的许多工业区,西南季风环流北进时途经南亚主要工业区,沿途不断有 SO_4^{2-} 离子的输入^[11]。海拔 2 470 ~ 2 357 m 处 SO_4^{2-} 浓度整体较高,与人类活动相关性很强。

就阴离子浓度整体变化趋势来看,在海拔 3 180 m 存在一个明显的边界,以上阴离子浓度较低,推测受人类活动和岩石岩性影响较小,3 180 m 以下阴离子浓度骤增,尤其是 Cl^- 和 SO_4^{2-} 浓度骤增,这与低海拔地区人类活动和蒸发岩、硫酸盐溶解强烈有关。

2.2 不同海拔高度水体常规阴离子聚类分析

对 3 种常规阴离子数据进行聚类分析,距离测量选择 Squared Euclidean Distance 算法。得到的聚类分析结果如图 3。由图 3 可见,当距离为 1 时可分为 6 种,可以看出其中冰舌冰、冰舌融水、雪花池、文海、文海入口采集的水样有很好的一致性,结合原始数据发现这些水体都位于 3 180 m 以上的高海拔地区,离人类活动区影响较远,这进一步说明了人类活动对该地区水体离子组成有着深刻的影响。当距离为 2 时可分为 4 类:拉市海、黑龙潭、木家桥聚合为一类,这 3 处都位于丽江盆地内,受人类活动的影响深刻,在距离为 3 处与冰舌冰、冰舌融水、雪花池、文

海、文海入口并为一类,距离为 7 处甘海子并入,距离 25 处玉峰寺和团山水库才并入,说明这 2 处水体与该地区其他水体有较大区别,距离为 3 处这 2 个水体合并,说明其具有一定的一致性。

3 水体阴离子来源分析

3.1 降水中阴离子对不同水体阴离子浓度的贡献
玉龙雪山地区位于我国季风区,水汽以海洋源为主,季风期降水占年总降水量的 90% 以上,在雨季是不同水体主要的补给来源,因此本研究选择了海盐示踪法作为研究不同水体的离子来源^[11~14]。海盐源示踪离子的选择主要判定依据如下。

① 若 Cl^-/Na^+ 和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 的当量比值都大于或等于海水的相应值 ($\text{Cl}^-/\text{Na}^+ = 1.165$; $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+ = 0.227$) 时,则选用 Na^+ 作为海盐源示踪离子;② 若 Na^+/Cl^- 和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$ 的当量比值都大于或等于海水的相应值 ($\text{Na}^+/\text{Cl}^- = 0.859$; $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^- = 0.195$) 时,则选用 Cl^- 作为海盐源示踪离子;③ 若 $\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{Cl}^-/\text{Mg}^{2+}$ 的当量比值都大于或等于海水的相应值 ($\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+} = 4.403$; $\text{Cl}^-/\text{Mg}^{2+} = 5.126$) 时,则选用 Mg^{2+} 作为海盐源示踪离子。

利用上述原则判定出海盐源示踪离子后,利用求算离子非海洋来源的含量公式: $\text{NNA} = c_A - R \times c_M$ (式中, c_A 是 A 离子实测浓度值, NNA 是 A 离子非海洋来源部分, c_M 是示踪 M 离子浓度值, R 为标准海盐中 A 离子跟 M 离子的比值), 分别计算各离子的非海洋来源。经判断水体示踪离子均为 Cl^- 和 Na^+ , 据此计算出了各不同水体阴离子来源的非海洋部分。

就收集到的同期降水样品来看, 该区水体中 Cl^- 非海洋源变化范围在 15.52 ~ 67.34 之间, 平均值为 65%; NO_3^- 是陆源物质贡献; SO_4^{2-} 非海洋源的变化范围为 76.6% ~ 99.6%, 平均值为 93.7%。可见 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 主要来自于陆源, Cl^- 海洋源比例相对较高。

后推气流轨迹模型分析图(图 4) 可以看出玉龙雪山地区雨季的降水来源具有一定的复杂性, 对该区 2005 年 7 月 22 ~ 30 日降水气团来源做了后向轨迹分析表明 2005 年 7 月 22 ~ 30 日气团主要来自于印度洋, 沿途主要经过南亚地区, 7 月下旬有少量来自于东太平洋的气团, 另外期间出现了 7 月 22 日西风环流南支沿青藏高原地区进入研究区的情况。由此判断 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 主要为南亚、东南亚和我国东南沿海工业区的污染物质随季风环流输入, 因此雨

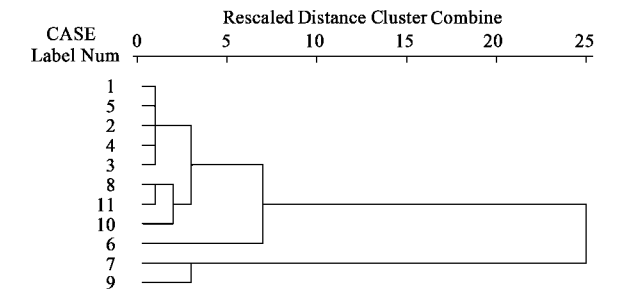


图 3 不同水体离子聚类分析

Fig. 3 Different water bodies anion cluster analysis diagram

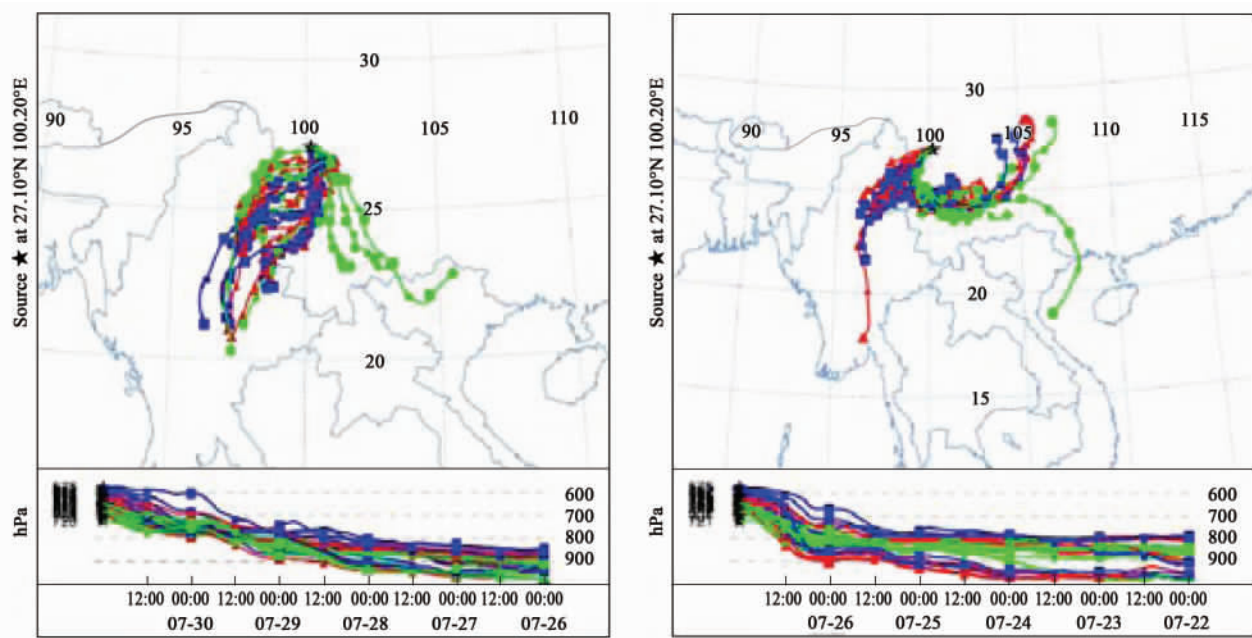


图4 玉龙雪山地区7月降水的后推气象轨迹图

Fig. 4 Backward trajectories of Yulong Snow Mountain area

季丰沛的降水导致玉龙雪山地区水体中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度普遍升高。

3.2 离子来源分析

研究区雨季时无机离子浓度受季风环流影响,高海拔冰川冰和冰舌融水中阴离子主要来自于大气环流系统传输,季风环流途经大陆时沿途会携带大量的 NO_3^- 和 SO_4^{2-} ,因为东南季风环流在西伸时经过我国南方的许多工业区,西南季风环流北进时途经南亚主要工业区,沿途不断有 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 离子的输入^[11],除上述来源之外,近源 Cl^- 输入的贡献较大,该区山谷风强劲,并且表现出在一定范围内随海拔上升而不断加强的特点。这为风化物进入高海拔水体提供了强大的动力源。雨季的闪电对高海拔地区水体中 NO_3^- 浓度有一定的贡献^[15~20],牦牛坪离子含量中 NO_3^- (0.144 mg/L) 的异常高值与同日发生的单次雷阵雨降水事件有很好的相关关系。流域内低海拔区域由于季风环流途经大陆时沿途所携带的 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 叠加近源人类活动产生的 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 导致 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 浓度上升,同时由于岩石风化物的溶解和近源人类活动污染, Cl^- 浓度也显著升高。可见,玉龙雪山地区 Cl^- 主要源于海盐、土壤粉尘和人为污染物; SO_4^{2-} 主要来源于季风通道和近源的人类污染; NO_3^- 来源主要有闪电、平流层交换、海盐和人类污染等。

4 结论

(1)对玉龙雪山地区不同海拔高度水体阴离子浓度数据分析表明,以3180 m为界,以上受人类活动和岩石岩性影响较小,无机离子主要来自于大气干湿沉降,离子浓度整体偏低。3180 m以下在人类活动和岩石溶解的影响下离子浓度骤增。聚类分析发现位于3180 m以上的高海拔地区水体阴离子组成和离子浓度一致性很强,低海拔地区水体组成和离子浓度一致性较弱,说明低海拔水体影响机制复杂。

(2)雨季降水对水体离子有决定性的影响,运用海盐追踪法计算了降水阴离子海洋源和非海洋源的贡献,发现 Cl^- 很大一部分来自于海盐, NO_3^- 和 SO_4^{2-} 主要来自于陆源。

(3)后推气流轨迹模型分析表明玉龙雪山地区雨季的降水来源具有一定的复杂性,雨季气团主要来自于印度洋,另外有少量来自于东太平洋的气团, SO_4^{2-} 和 NO_3^- 很大一部分来源于南亚、东南亚和我国东南沿海工业区的污染物质随季风环流输入。

(4)区域内 Cl^- 主要源于海盐、土壤粉尘和人为污染物; SO_4^{2-} 主要来源于季风通道和近源的人类污染; NO_3^- 来源主要有闪电、平流层交换、海盐和人类污染等。

参考文献:

[1] Hum H, Stallard R F, Edmond J M. Major ion chemistry of some

large Chinese rivers[J]. Nature,1982,**298**:550-553.

[2] Zhang J,Huang W W,Letolle R,*et al.* Major element chemistry of the Huanghe (Yellow River), China: weathering processes and chemical fluxes[J]. Journal of Hydrology,1995,**168**:173-203.

[3] 秦建华,冉敬,杜谷. 岷江流域河水主要离子地球化学特征及人类活动影响[J]. 沉积与特提斯地质,2007,**27**(2):14-19.

[4] Wake C P,Mayewski P A,Spencer M J. A review of central Asian glaciochemical data [J]. Annual of Glaciology, 1990, **14**: 301-306.

[5] Soko K,Takahashi S. Characteristics of winter precipitation and its effect on glaciers in the Nepal Himalaya [J]. Bulletin of Glacier Research,1991,**9**:9-16.

[6] Stravisi F,Verza G P,Tartari G. Meteorology and climatology at high altitude in Himalaya [A]. In: Baudo R G, Tartari G, Munawar M. Top of the World Environmental Research: Mount Everest Himalayan Ecosystem [C]. Ecovision World Monograph Series. Leiden, the Netherlands: Backhuys, 1998. 101-122.

[7] 鞠建延,朱立平,汪勇,等. 藏南普莫雍错流域水体离子组成与空间分布及其环境意义[J]. 湖泊科学,2008,**20**(5):591-599.

[8] 李宗省,何元庆,庞洪喜,等. 我国典型季风海洋性冰川区雪坑中主要阴、阳离子的来源[J]. 地理学报,2007,**62**(9):992-1001.

[9] 何元庆,姚檀栋,杨梅学,等. 山地温冰川中的气候环境记录研究[J]. 冰川冻土,1999,**21**(3):257-263.

[10] 何元庆,姚檀栋,杨梅学,等. 玉龙山温冰川浅冰芯记录现代指示意义[J]. 冰川冻土,2000,**22**(3):235-242.

[11] 李宗省,何元庆,院玲玲,等. 丽江市降水中常量离子的化学特征[J]. 环境化学,2008,**27**(5):648-652.

[12] Church T M,Galloway J N,Jickells T D,*et al.* The Chemistry of Western Atlantic Precipitation at the Mid-Atlantic Coast and on Bermuda[J]. Journal of Geophysical Research,1982,**87**(c13): 11013-11018.

[13] Kneene W C, Alexander A P, Galloway J N, *et al.* Sea-salt Corrections and Interpretation of Constituent Ratios in Marine Precipitation [J]. Journal of Geophysical Research, 1986, **91**(c13):6647-6658.

[14] 肖辉,沈志来,西太平洋热带海域降水化学特征[J]. 环境科学学报,1993,**13**(2):143-148.

[15] 效存德,秦大河,侯书贵,等. 冰冻圈关键地区雪冰化学的时空分布及环境意义[J]. 冰川冻土,2002,**24**(5):492-498.

[16] 何元庆,姚檀栋,杨梅学,等. 山地温冰川中的气候环境记录研究[J]. 冰川冻土,1999,**21**(3):257-263.

[17] He Y Q, Yao T D, Theakstone W H, *et al.* Recent climate significance indicated by the chemical signals in a shallow ice core at a glacier in south-Asia monsoon region[J]. Journal of Asia Earth Science,2002,**20**(3):289-296.

[18] 康世昌,秦大河,Mayewski P A,等. 近 200a 来珠穆朗玛峰北坡远东绒布冰芯气候记录[J]. 冰川冻土,2000,**22**(3):211-217.

[19] 康世昌,丛志远. 青藏高原大气降水 and 气溶胶化学特征研究进展[J]. 冰川冻土,2006,**28**(3):371-379.

[20] 何元庆,姚檀栋,杨梅学. 中国典型山地温冰川水化学空间分布特征与近期冰川动态 [J]. 山地学报,2000, **18**(6):481-488.