

# 玉龙雪山地区不同海拔高度降水中常量无机离子特征分析

朱国锋<sup>1,2</sup>, 何元庆<sup>1,3</sup>, 蒲焘<sup>3</sup>, 张宁宁<sup>1,2</sup>

(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:**运用海盐示踪法计算了云南省丽江市玉龙雪山 2005-07-26 ~ 2006-07-31 不同海拔高度降水中常量无机离子非海洋来源的比例, 计算结果显示  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$  海洋源比重较高, 平均海洋源比重分别为 74.79%、73.53%。 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  主要是非海洋源, 平均非海洋源所占的比重依次为 100%、93.54%、97.29%、81.77%、99.66%。统计图显示阳离子浓度的变化远远大于阴离子, 阳离子浓度区间为 0.51 ~ 5.26 mg/L, 阴离子浓度区间为 0.99 ~ 4.90 mg/L, 由此推断阴离子来源构成比较复杂。分析表明陆源离子, 尤其是近源陆源离子对该地区降水的无机离子构成和离子浓度影响较大, 2 400 ~ 2 950 m 人类活动导致阴离子浓度较高, 2 950 ~ 4 800 m 降水的离子浓度受局地环流的影响较大, 玉龙雪山地区基岩以石灰岩为主是造成降水中阳离子, 尤其是  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  浓度较大的主要原因。

**关键词:** 玉龙雪山地区; 常量无机离子; 海盐示踪法; 人类活动; 局地环流

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)04-0963-08

## Characteristics of Constant Inorganic Ions in Precipitation at Different Altitudes Precipitation in Yulong Snow Mountain Area

ZHU Guo-feng<sup>1,2</sup>, HE Yuan-qing<sup>1,3</sup>, PU Tao<sup>3</sup>, ZHANG Ning-ning<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Science 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:** According to the different altitudes precipitation samples in Yulong Snow Mountain area in Yunnan Province from July 26 2005 to July 31 2005, the precipitation chemical characteristics of different altitudes were analyzed with the sea salt iron tracer analysis method. Sea salt tracer analysis showed that  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  had high proportion marine source, amounting 74.79% and 73.53% respectively while the other ions mainly were nonmarine sources. The average percentage of nonmarine sources of  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  were 100%, 93.54%, 97.29%, 81.77%, 99.66%. Statistics chart showed the changes of cation outweigh the anion greatly. The cation concentration ranged between 0.51-5.26 mg/L and anion concentration ranged between 0.99-4.90 mg/L, inferring the cation have more complicated sources. Further analysis showed terrestrial ions, especially near source terrestrial ion composition greatly impact the precipitation ion concentration. Human activities lead to higher anion concentration at alt. 2 950-4 800 m and precipitation ion concentration was correlated significantly with local atmospheric circulation. The most rock are limestone caused high precipitation cations in Yulong Snow Mountain, such as  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$ .

**Key words:** Yulong Snow Mountain area; constant inorganic ions; sea salt tracer method; human activities; Local circulation

不同区域降水中的常量无机离子特征是反映气候和环境特征的可靠指标<sup>[1-5]</sup>, 并用以识别与区域大气循环、水汽来源和生物地球化学循环相关的各化学成分的通量差异<sup>[6]</sup>。同时, 它能准确地反映当地大气质量的现状, 是监测人类活动对大气环境影响的可靠指标<sup>[6,7]</sup>。玉龙雪山地区处于我国第一、二阶梯交汇处, 降水中的无机离子不同程度地受到海气、冰雪融水和人类活动的影响, 是研究我国西部高山寒区环境中地-气-人-水相互影响非常理想的区域。在 7 月末, 玉龙雪山地区的降水受大气环流、冰

川消融、大气降水、人类活动的影响几乎都会达到峰值, 此时是研究我国西部高山寒区环境中地-气-人-水相互影响非常理想的时间段。自 1999 年来, 何元庆领导的课题组对玉龙雪山地区的水文水资源进行

收稿日期: 2010-05-12; 修订日期: 2010-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(40801028, 90511007, 40971019); 中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部博士资助项目”(0828A11001); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2007CB411501); 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

了系统的研究<sup>[8-12]</sup>,对于丽江盆地内夏季降水中的离子和同位素的化学特征进行了研究<sup>[7,12]</sup>.但是该区域的高海拔地区由于野外观测难度大,很难同时获取不同海拔降水样品,一直以来是研究的空白.本研究重点讨论夏季玉龙雪山不同海拔高度降水的常量无机离子特征和来源.通过本研究可以为玉龙雪山的降水现代过程研究提供一些基础的研究资料,同时对探究区域气候特征、区域环境特征及生态建设将有极为重要的意义<sup>[7]</sup>.

## 1 区域概况、野外采样和实验分析方法

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,如图1,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性冰川区.东麓是海拔约3 000 m的干海子盆地,南面是丽江盆地,主山脊上有13座海拔5 000 m以上的高峰,主峰扇子陡海拔5 596 m.山上分布有19条现代冰川,面积 $10.86 \text{ km}^2$ .白水一号冰川是玉龙雪山东坡15条冰川中最大的一条,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,降水量年内变化较大,5~10月降水占全年降水的90%左右.玉龙雪山处在青藏高原边缘第一、第二阶梯的过渡带,地域环境状况复杂,演变剧烈,局地小气候对降水的化学特征有很大的影响.同时该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,年接待游客550万,生态环境人为扰动大,降水的化学特征也受到人类活动的深刻影响.

课题组于2005年夏季(2005-07-26~2006-07-31)在玉龙雪山沿不同海拔高度对降水进行了系统采样,采样点海拔由低到高分别为2 400 m、2 950 m、3 413 m、3 446 m、3 516 m、3 563 m、3 616 m、3 685 m、3 750 m、3 800 m、3 850 m、3 900 m、3 944 m、3 983 m、4 050 m、4 100 m、4 150 m、4 200 m、4 250 m、4 304 m、4 350 m、4 410 m、4 445 m、4 500 m、4 547 m、4 580 m、4 622 m、4 676 m、4 743 m、4 800 m.样品直接装入事先清洗干净的敞口聚氯乙烯塑料瓶内.样品运抵中国科学院寒区旱区环境与工程研究所后立即存放于 $-15^{\circ}\text{C}$ 的低温室保存.分析前2 d将样品取出并在室温(约 $23^{\circ}\text{C}$ )下自然融化.然后进行主要无机离子浓度的测量.用Dionex-600型离子色谱仪测定

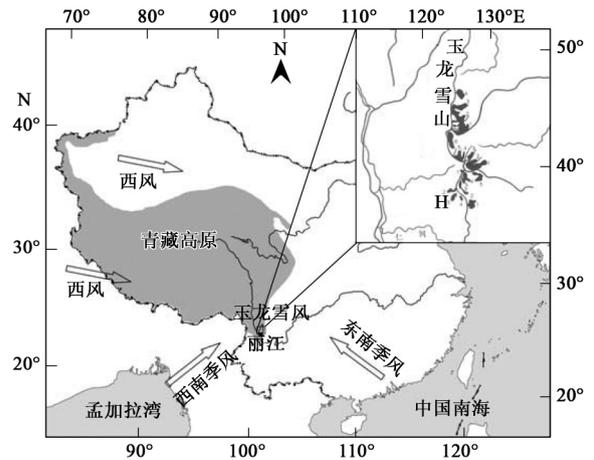


图1 玉龙雪山地区简图

Fig.1 Schematic diagram of Yulong Snow Mountain area

$\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 浓度;用Dionex-3000型离子色谱仪测定 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度,其精度可达 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 级,测试数据误差 $<5\%$ .测定结果如表1.

## 2 研究方法

研究区位于我国季风区,水汽以海洋源为主,季风期降水占年总降水量的90%以上,并且季风降水是不同降水的补给来源,而不同降水和季风降水又是其他降水的补给来源,因此本研究选择了海盐示踪法研究不同海拔高度降水中的无机离子来源<sup>[13-16]</sup>.海盐源示踪离子的选择主要判定依据如下.

①若 $\text{Cl}^-/\text{Na}^+$ 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N作为海盐源示踪离子.②若 $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ 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 $\text{Cl}^-$ 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 $\text{Mg}^{2+}$ 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,通过求算离子非海洋来源的含量公式: $NNA = A - R \times M$ (式中, $A$ 是离子实测浓度值, $NNA$ 是 $A$ 离子非海洋来源部分, $M$ 是示踪离子浓度值, $R$ 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,海盐源示踪离子为 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Cl}^-$ ,据此计算出了不同海拔高度降水常量离子来源的非海洋部分,如表2.

表 1 玉龙雪山地区不同海拔高度降水常量无机离子浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Table 1 Constant ions concentration of precipitation at different altitudes in Yulong Snow Mountain area/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 

编号	海拔/m	降水量/mL	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	阴离子	阳离子	$\text{SO}_4^{2-} / \text{NO}_3^-$
1	2 400	265	0.32	0.27	4.67	0.16	0.14	0.02	0.97	5.26	1.29	17.30
2	2 850	335	0.28	0.22	4.46	0.2	0.29	0.03	0.85	4.96	1.37	20.27
3	3 413	280	0.13	0.17	0.55	0.1	0.28	0.11	0.5	0.85	0.99	3.24
4	3 446	215	0.17	0	0.74	0.13	0.37	0.08	1.14	0.91	1.72	
5	3 516	205	0.2	0	0.68	0.23	0.44	0.13	1.6	0.88	2.40	
6	3 563	245	0.11	0.01	0.53	0.09	0.39	0.1	2.46	0.65	3.04	53.00
7	3 616	275	0.08	0.29	0.56	0.13	0.06	0.28	2.73	0.93	3.20	1.93
8	3 685	275	0.08	0.25	0.51	0.07	0.1	0.09	1.29	0.84	1.55	2.04
9	3 750	235	0.33	0	0.55	0.24	0.39	0.1	1.42	0.88	2.15	
10	3 800	325	0.12	0.06	0.4	0.09	0.16	0.5	2.77	0.58	3.52	6.67
11	3 850	325	0.11	0	0.46	0.52	0.59	0.33	3.46	0.57	4.90	
12	3 900	295	0.11	0	0.5	0.15	0.11	0.12	2.64	0.61	3.02	
13	3 944	280	0.14	0.05	0.46	0.09	0.3	0.16	1.5	0.65	2.05	9.20
14	3 983	260	0.18	0.23	0.39	0.18	0.18	0.22	1.45	0.80	2.03	1.70
15	4 050	275	0.04	0.2	0.33	0.03	0.02	0.17	1.72	0.57	1.94	1.65
16	4 100	280	0.38	0.21	0.38	0.34	0.2	0.1	0.67	0.97	1.31	1.81
17	4 150	270	0.09	0.22	0.37	0.12	0.06	0.51	2.79	0.68	3.48	1.68
18	4 200	325	0.05	0.2	0.35	0.04	0.03	0.06	1.34	0.60	1.47	1.75
19	4 250	270	0.1	0.21	0.46	0.12	0.07	0.13	0.97	0.77	1.29	2.19
20	4 304	355	0.05	0.18	0.28	0.12	0.08	0.76	2.93	0.51	3.89	1.56
21	4 350	300	0.05	0.19	0.31	0.05	0.04	1.94	2.66	0.55	4.69	1.63
22	4 410	300	0.09	0.19	0.35	0.11	0.07	0.2	1.19	0.63	1.57	1.84
23	4 445	300	0.08	0.17	0.35	0.08	0.05	0.17	1.08	0.60	1.38	2.06
24	4 500	310	0.07	0.18	0.27	0.07	0.06	0.09	2.31	0.52	2.53	1.50
25	4 547	285	0.07	0.18	0.25	0.06	0.03	0.04	1.89	0.50	2.02	1.39
26	4 580	250	0.07	0.19	0.31	0.08	0.04	0.06	1.22	0.57	1.40	1.63
27	4 622	215	0.07	0.21	0.3	0.07	0.04	0.03	1.24	0.58	1.38	1.43
28	4 676	295	0.1	0.2	0.26	0.1	0.06	0.05	2.29	0.56	2.50	1.30
29	4 743	280	0.69	0.2	0.3	0.63	0.29	0.09	1.56	1.19	2.57	1.50
30	4 800	30	1.49	0.27	0.39	1.08	0.57	0.09	1.37	2.15	3.11	1.44

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同海拔梯度降水中常量无机离子的化学特征

从不同海拔高度的常量无机离子总浓度来看,玉龙雪山不同海拔高度降水常量无机离子浓度最大值出现在4 445 m,最小值出现在3 413 m. 离子浓度较高的几个区域分别为2 850 ~ 2 400 m、3 446 ~ 3 563 m、3 944 ~ 3 983 m、4 445 ~ 4 547 m;离子浓度较低的几个区域分别为3 616 ~ 3 685 m、3 850 ~ 3 900 m、4 050 ~ 4 100 m、4 200 ~ 4 350 m、4 574 ~ 4 622 m、4 743 m以上. 降水的主要组成离子是 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ . 在阳离子中, $\text{Ca}^{2+}$ 占全部阳离子的75.22%,是第一优势阳离子. 阴离子中 $\text{SO}_4^{2-}$ 是第一优势阴离子,占阴离子总量的66.12%,如图2.

从不同海拔高度的各降水离子组成和浓度来

看,离子浓度在海拔2 400 ~ 2 850 m都维持着一个高值(4.96 ~ 5.27 mg/L),在海拔3 446 ~ 3 516 m维持着一个次高值,在3 516 ~ 4 800 m基本稳定. 阳离子整体波动较大,离子浓度较高的几个区域分别为2 850 ~ 2 400 m、3 446 ~ 3 563 m、3 944 ~ 3 983 m、4 445 ~ 4 547 m;离子浓度较低的几个区域分别为3 616 ~ 3 685 m、3 850 ~ 3 900 m、4 050 ~ 4 100 m、4 200 ~ 4 350 m、4 574 ~ 4 622 m、4 743 m以上. 阳离子浓度随海拔高度的变化波动大,如图2,说明影响阳离子的因素复杂多样.

就阴离子来看, $\text{Cl}^-$ 浓度在海拔2 400 ~ 3 413 m、3 685 ~ 3 800 m、4 050 ~ 4 150 m、4 676 ~ 4 800 m浓度较高,其余区间浓度基本稳定.  $\text{NO}_3^-$ 整体上浓度低波动大,尤其在2 400 ~ 3 983 m经历了高-低-高-低的剧烈变化,在3 983 ~ 4 743 m整体上稳定,4 743 ~ 4 800 m离子浓度有上升的趋势.  $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度在2 400 ~ 2 650 m浓度较高,2 650 ~ 3 413 m浓

表 2 玉龙雪山地区不同海拔高度降水常量无机离子非海洋来源比重

Table 2 Proportion of non-marine sources ion of precipitation at different altitudes in Yulong Snow Mountain

名称	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
离子浓度(2 400 m)/mg·L <sup>-1</sup>	0.32	0.27	4.67	0.16	0.14	0.02	0.97
非海洋来源比重/%	64.8	100	97.9	40.52	95.339		99.28
离子浓度(2 850 m)/mg·L <sup>-1</sup>	0.28	0.22	4.46	0.20	0.29	0.03	0.85
非海洋来源比重/%	49.47	100	98.74	39.49	97.24		99
离子浓度(3 413 m)/mg·L <sup>-1</sup>	0.13	0.17	0.55	0.10	0.28	0.11	0.5
非海洋来源比重/%	14.254	100	95.532		98.75	89.19	99.3
离子浓度(3 446 m)/mg·L <sup>-1</sup>	0.17	0.00	0.74	0.13	0.37	0.08	1.14
非海洋来源比重/%	14.06	100	95.72		98.77	81.64	99.6
离子浓度(3 516 m)/mg·L <sup>-1</sup>	0.20	0.00	0.68	0.23	0.44	0.13	1.60
非海洋来源比重/%		100	96.02	24.22	99.11	69.87	99.74
离子浓度(3 563 m)/mg·L <sup>-1</sup>	0.11	0.01	0.53	0.09	0.39	0.10	2.46
非海洋来源比重/%	1.3	100	95.67		99.15	89.24	99.87
离子浓度(3 616 m)/mg·L <sup>-1</sup>	0.08	0.29	0.56	0.13	0.06	0.28	2.73
非海洋来源比重/%		100	98.11	48.64	97.59	94.64	99.94
离子浓度(3 685 m)/mg·L <sup>-1</sup>	0.08	0.25	0.51	0.07	0.10	0.09	1.29
非海洋来源比重/%		100	97.8	15.71	98.42	81.44	99.87
离子浓度(3 750 m)/mg·L <sup>-1</sup>	0.33	0.00	0.55	0.24	0.39	0.10	1.42
非海洋来源比重/%	13.24	100	88.99		97.75	69.63	99.38
离子浓度(3 800 m)/mg·L <sup>-1</sup>	0.12	0.06	0.40	0.09	0.16	0.50	2.77
非海洋来源比重/%	8.45	100	94.16		97.83	97.72	99.88
离子浓度(3 850 m)/mg·L <sup>-1</sup>	0.11	0.00	0.46	0.52	0.59	0.33	5.46
非海洋来源比重/%	8.45	100	94.16		97.83	97.72	99.88
离子浓度(3 900 m)/mg·L <sup>-1</sup>	0.11	0.00	0.50	0.15	0.11	0.12	2.64
非海洋来源比重/%		100	96.79	32.2	98	80.69	99.91
离子浓度(3 944 m)/mg·L <sup>-1</sup>	0.14	0.05	0.46	0.09	0.30	0.16	1.5
非海洋来源比重/%	26.9	100	95.13		98.92	93.08	99.78
离子浓度(3 983 m)/mg·L <sup>-1</sup>	0.18	0.23	0.39	0.18	0.18	0.22	1.45
非海洋来源比重/%		100	93.57	12.13	98.07	84.05	99.74
离子浓度(4 050 m)/mg·L <sup>-1</sup>	0.04	0.20	0.33	0.03	0.02	0.17	1.72
非海洋来源比重/%	7.87	100	97.79		95.76	97.88	99.94
离子浓度(4 100 m)/mg·L <sup>-1</sup>	0.38	0.21	0.38	0.34	0.20	0.10	0.67
非海洋来源比重/%		100	86.02	2.5	96.21	29.3	98.82
离子浓度(4 150 m)/mg·L <sup>-1</sup>	0.09	0.22	0.37	0.12	0.06	0.51	2.79
非海洋来源比重/%		100	96.75	34.8	97.33	96.69	99.94
离子浓度(4 200 m)/mg·L <sup>-1</sup>	0.05	0.20	0.35	0.04	0.03	0.06	1.34
非海洋来源比重/%	6.36	100	96.93		94.53	91.12	99.88
离子浓度(4 250 m)/mg·L <sup>-1</sup>	0.10	0.21	0.46	0.12	0.07	0.13	0.97
非海洋来源比重/%		100	96.9	21.99	96.91	84.65	99.78
离子浓度(4 304 m)/mg·L <sup>-1</sup>	0.05	0.18	0.28	0.12	0.08	0.76	2.93
非海洋来源比重/%		100	97.31	60.56	98.68	98.62	99.96
离子浓度(4 350 m)/mg·L <sup>-1</sup>	0.05	0.19	0.31	0.05	0.04	1.94	2.66
非海洋来源比重/%		100	97.62	3.98	96.7	99.47	99.96
离子浓度(4 410 mm)/mg·L <sup>-1</sup>	0.09	0.19	0.35	0.11	0.07	0.20	1.19
非海洋来源比重/%		100	96.42	24.73	97.42	91.32	99.84
离子浓度(4 445 m)/mg·L <sup>-1</sup>	0.08	0.17	0.35	0.08	0.05	0.17	1.08
非海洋来源比重/%		100	96.73	9.57	96.73	90.67	99.84
离子浓度(4 500 m)/mg·L <sup>-1</sup>	0.07	0.18	0.27	0.07	0.06	0.09	2.31
非海洋来源比重/%		100	96.45	8.09	97.7	85.38	99.94
离子浓度(4 547 m)/mg·L <sup>-1</sup>	0.07	0.18	0.25	0.06	0.03	0.04	1.89
非海洋来源比重/%		100	96.19	3.52	95.85	67.73	99.92
离子浓度(4 580 m)/mg·L <sup>-1</sup>	0.07	0.19	0.31	0.08	0.04	0.06	1.22
非海洋来源比重/%		100	96.71	19.75	96.7	76.25	99.87
离子浓度(4 622 m)/mg·L <sup>-1</sup>	0.07	0.21	0.30	0.07	0.04	0.03	1.24
非海洋来源比重/%		100	96.66	13.33	96.39	58.88	99.88
离子浓度(4 676 m)/mg·L <sup>-1</sup>	0.10	0.20	0.26	0.10	0.06	0.05	2.29
非海洋来源比重/%		100	94.61	12.51	96.45	63.98	99.91
离子浓度(4 743 m)/mg·L <sup>-1</sup>	0.69	0.20	0.30	0.63	0.29	0.09	1.56
非海洋来源比重/%		100	67.66	8.57	95.27	51.51	99.07
离子浓度(4 800 m)/mg·L <sup>-1</sup>	1.49	0.27	0.39	1.08	0.57	0.09	1.37
非海洋来源比重/%	70.63	100	54.77	65.25	95.57		98.05

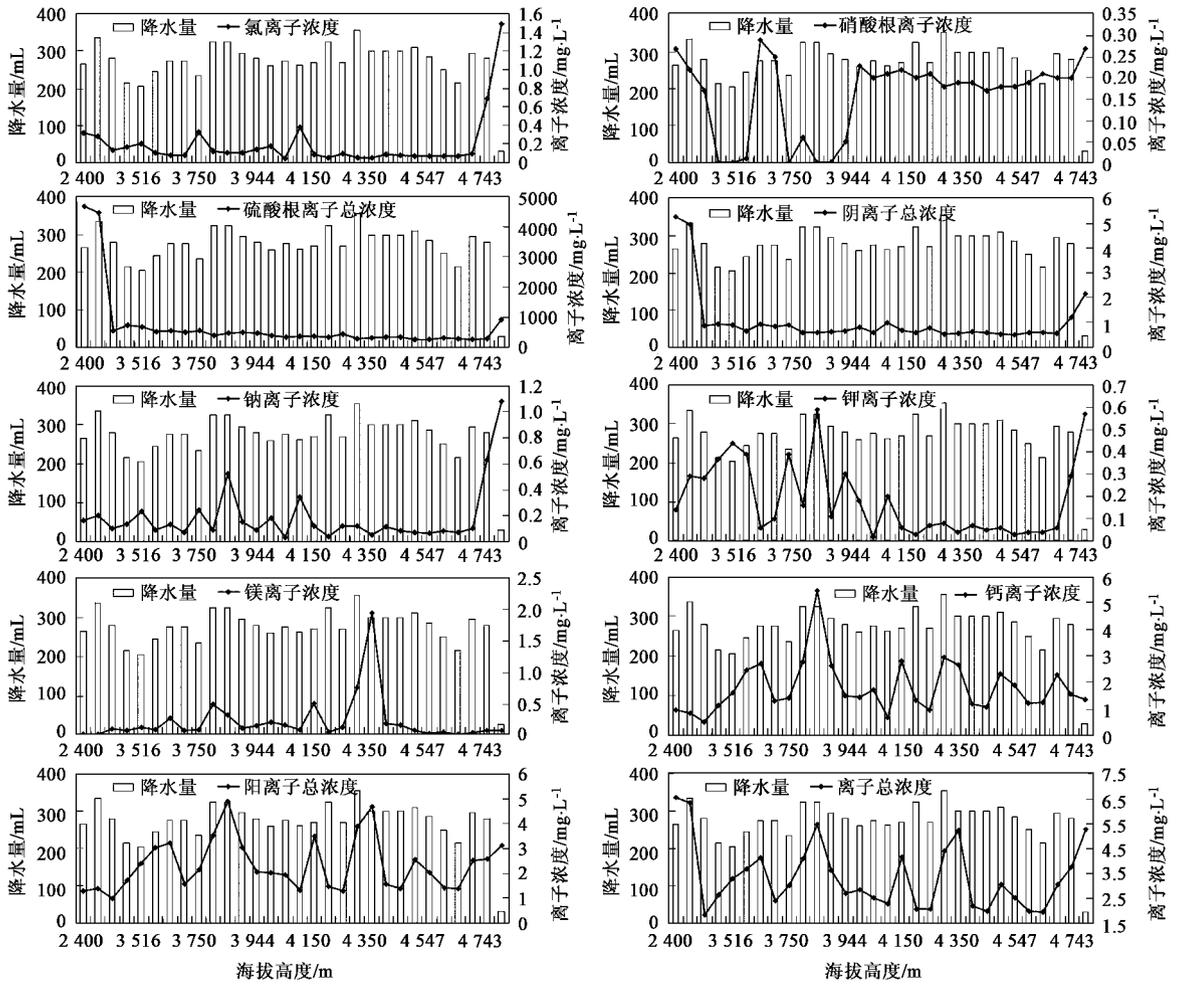


图2 玉龙雪山地区不同海拔高度降水中的无机离子浓度变化

Fig.2 Ion concentration of precipitation at different altitudes in Yulong Snow Mountain area

度急剧下降,3 413 ~ 4 743 m浓度基本稳定,4 743 ~ 4 800 m浓度略有上升,如图2。

就阳离子来看,Na<sup>+</sup>浓度在海拔2 400 ~ 4 676 m以0.17 mg/L为中心线上下波动,在4 676 ~ 4 800 m离子浓度急剧上升,在4 800 m达到1.08 mg/L,且还有继续上升的趋势。K<sup>+</sup>浓度在2 400 ~ 4 150 m波动较大,最高值出现在3 850 m(0.59 mg/L),最低值出现在4 050 m(0.02 mg/L),在4 676 ~ 4 800 m,离子浓度急剧升高。Mg<sup>2+</sup>浓度整体比较平稳,在3 800 m(0.50 mg/L)、4 150 m(0.51 mg/L)、4 350 m(1.94 mg/L)出现高值。Ca<sup>2+</sup>浓度2 400 ~ 4 800 m都极不稳定,在2.0 mg/L左右波动,在海拔3 800 ~ 3 900 m出现了一个浓度较高的区域,在3 850 m出现最高值5.46 mg/L,如图2。

### 3.2 不同海拔高度降水常量无机离子特征的形成机制分析

为了确定不同海拔梯度降水中无机离子组分不同来源的构成,本研究运用海盐示踪法计算了该区2005年玉龙雪山地区不同海拔梯度降水中离子海洋源和非海洋源的贡献(经判断,该区海盐示踪离子为Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>)。就研究区30个降水平均值来看,该区降水中Cl<sup>-</sup>非海洋源的变化范围为6.36% ~ 70.63%,平均值为25.21%;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>认为是陆源物质贡献;SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>非海洋源的变化范围为54.77% ~ 98.74%,平均值为93.54%;Na<sup>+</sup>非海洋源的变化范围为2.5% ~ 62.5%,平均值为26.47%;K<sup>+</sup>非海洋源的变化范围为94.53% ~ 99.15%,平均值为97.29%;Mg<sup>2+</sup>非海洋源的变化范围为29.3% ~ 97.88%,平均值为81.77%;Ca<sup>2+</sup>非海洋源的变化范围为98.05% ~ 99.96%,平均值为99.66%。

就阴离子来看,Cl<sup>-</sup>浓度在海拔2 400 ~

3 413 m、3 685 ~ 3 800 m、4 050 ~ 4 150 m、4 676 ~ 4 800 m 浓度较高,其余区间浓度基本稳定,在 2 400 ~ 3 413 m  $\text{Cl}^-$  非海洋来源占 42.84%,除海气输送外,部分  $\text{Cl}^-$  来源于人类活动导致的生产生活次生废水、排泄物等以大气气溶胶的形式沉降<sup>[17]</sup>. 3 685 ~ 3 800 m、4 050 ~ 4 150 m、4 676 ~ 4 800 m 的离子浓度与水汽来源有密切的关系,海盐示踪结果表明在海拔 3 685 ~ 4 743 m 处  $\text{Cl}^-$  的海源比例达到 88.83%,影响  $\text{Cl}^-$  浓度的主要因素是海气中  $\text{Cl}^-$  的含量,海拔 4 743 ~ 4 800 m 处  $\text{Cl}^-$  浓度有上升的趋势,这主要是因为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,当水汽沿山体上升时,携带了地表物质,到达凝结高度形成固态或液态降水,使这些物质重返地表<sup>[18,19]</sup>,正是这种形成机制导致 4 676 ~ 4 800 m 的离子浓度出现升高的趋势.

$\text{NO}_3^-$  整体上浓度低波动大,尤其在 2 400 ~ 3 983 m 经历了高-低-高-低的剧烈变化,低海拔地区变化较为剧烈,这一方面说明影响  $\text{NO}_3^-$  浓度的因素非常复杂,另一方面说明  $\text{NO}_3^-$  浓度与低海拔地区受近域人类活动的影响强烈.  $\text{NO}_3^-$  浓度在 3 983 ~ 4 743 m 整体上稳定,除西风环流远源物质和高原面物质输送外,季风环流途经大陆时沿途所携带的  $\text{NO}_3^-$  也有贡献,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  $\text{NO}_3^-$  离子的输入<sup>[7]</sup>. 4 743 ~ 4 800 m 离子浓度有上升的趋势,除西风环流和高原面物质输送和季风输送外,雨季在雪山积累区的小气候闪电对  $\text{NO}_3^-$  的贡献是导致 4 743 ~ 4 800 m 离子浓度上升的主要原因<sup>[20-24]</sup>.

$\text{SO}_4^{2-}$  浓度在 2 400 ~ 2 650 m 浓度较高,说明  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度与低海拔地区的人类活动存在密切的关系,在 2 650 ~ 3 413 m 随着海拔高度的升高降水中  $\text{SO}_4^{2-}$  离子浓度急剧下降,至 3 413 ~ 4 743 m 浓度基本稳定,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  $\text{SO}_4^{2-}$  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  $\text{SO}_4^{2-}$  离子的输入<sup>[7]</sup>.

就阳离子来看,  $\text{Na}^+$  浓度在海拔 2 400 ~ 4 676 m 一直以 0.17 mg/L 为中心线上下波动,海盐示踪得出在海拔 2 400 ~ 4 676 m  $\text{Na}^+$  海洋来源为 75.78%,其陆源来源主要为火成岩或者变质岩,如钠长石、正长石和云母等硅酸盐矿物的风化产物在局地环流影响

下进入降水<sup>[19,25]</sup>,这也是其浓度以 0.17 mg/L 为中心线上下波动的原因所在.  $\text{Na}^+$  浓度在 4 676 ~ 4 800 m 急剧上升,海盐示踪得出在 4 676 ~ 4 800 m 处  $\text{Na}^+$  海洋来源为 63.09%,也就是说这个区域的  $\text{Na}^+$  一定有其他的来源,这与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大气中,当水汽沿山体上升时,携带了地表物质,到达凝结高度形成固态或液态降水,使这些物质重返地表,正是这种形成机制导致 4 676 ~ 4 800 m 的  $\text{Na}^+$  浓度出现高值,在 4 800 m 达到 1.08 mg/L 还有继续上升的趋势<sup>[7]</sup>.

$\text{K}^+$  浓度在 2 400 ~ 4 150 m 波动较大,最高值出现在 3 850 m (0.59 mg/L),最低值出现在 4 050 m (0.024 mg/L),  $\text{K}^+$  来自于火成岩或者变质岩,如钠长石、正长石和云母等硅酸盐矿物的风化产物进入大气和区域以及季风通道上植被系统、农业活动的贡献<sup>[18,19,25]</sup>. 来源的复杂性导致了在海拔梯度上  $\text{K}^+$  浓度的波动性.  $\text{K}^+$  浓度在 4 676 ~ 4 800 m,离子浓度急剧升高,这也与当地局地山谷风主导下的物质运移有着密切的关系<sup>[7]</sup>.

$\text{Mg}^{2+}$  浓度整体比较平稳,在 3 800 m (0.50 mg/L)、4 150 m (0.51 mg/L)、4 350 m (1.94 mg/L) 出现高值.  $\text{Mg}^{2+}$  主要来源于降水对大气中碳酸盐和蒸发盐(如石膏)风化物的溶解及对碱土金属的硅酸盐的溶解,其来源以近源物质输送为主,浓度的高低与区域小气候密切相关<sup>[18,19,25]</sup>. 另外海盐离子对  $\text{Mg}^{2+}$  也有一定贡献<sup>[7]</sup>,贡献率在 2.12% ~ 72.86% 不等,海洋源平均占 18.229%.

$\text{Ca}^{2+}$  浓度在海拔 2 400 ~ 4 800 m 都极不稳定,在 2.0 mg/L 上下波动,在海拔 3 800 ~ 3 900 m 处出现了一个浓度较高的区域,3 850 m 出现最高值 5.46 mg/L.  $\text{Ca}^{2+}$  整体浓度较高的原因是玉龙雪山岩性以石灰岩为主,降水对碳酸盐和蒸发盐(如石膏)风化物的溶解及对碱土金属的硅酸盐的溶解后包含大量的  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  的来源以近源传输为主<sup>[7,19,26]</sup>. 其浓度高低与区域大气环流密切相关,在 3 850 m 附近岩石裸露,碳酸盐和蒸发盐(如石膏)风化物及碱土金属的硅酸盐风化程度高,山谷风盛行,出现了  $\text{Ca}^{2+}$  浓度最高值 5.46 mg/L.

#### 4 结论

(1) 对玉龙雪山地区不同海拔高度降水常量无机离子浓度数据分析表明,玉龙雪山地区不同海拔高度降水常量离子含量存在较为明显的差距,离子

浓度较高的几个区域分别为 2 400 ~ 2 850 m、3 446 ~ 3 563 m、3 944 ~ 3 983 m、4 445 ~ 4 547 m; 离子浓度较低的几个区域分别为 3 616 ~ 3 685 m、3 850 ~ 3 900 m、4 050 ~ 4 100 m、4 200 ~ 4 350 m、4 574 ~ 4 622 m、4 743 ~ 4 800 m. 降水的主要组成离子是  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ . 在阳离子中,  $\text{Ca}^{2+}$  占全部阳离子的 75.22%, 是第一优势阳离子. 阴离子中  $\text{SO}_4^{2-}$  是第一优势阴离子, 占阴离子总量的 66.12%.

(2) 海盐示踪法(经判断, 该区海盐示踪离子为  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ ) 表明就研究区 30 个降水平均值来看, 该区降水中  $\text{Cl}^-$  非海洋源的变化范围为 6.36% ~ 70.63%, 平均值为 25.21%;  $\text{NO}_3^-$  认为是陆源物质贡献;  $\text{SO}_4^{2-}$  非海洋源的变化范围为 54.77% ~ 98.74%, 平均值为 93.54%;  $\text{Na}^+$  非海洋源的变化范围为 2.5% ~ 62.5%, 平均值为 26.47%;  $\text{K}^+$  非海洋源的变化范围为 94.53% ~ 99.15%, 平均值为 97.29%;  $\text{Mg}^{2+}$  非海洋源的变化范围为 29.3% ~ 97.88%, 平均值为 81.77%;  $\text{Ca}^{2+}$  非海洋源的变化范围为 98.05% ~ 99.96%, 平均值为 99.66%.

(3) 阳离子总浓度的变化远远大于阴离子总浓度的变化, 由此推断阳离子来源构成比较复杂. 进一步分析认为陆源离子, 尤其是近源陆源离子对该地区降水离子构成和离子浓度影响较大. 2 400 ~ 2 950 m 人类活动导致阴离子浓度较高. 2 950 ~ 4 800 m 降水的离子浓度主要局地环流的影响较大. 玉龙雪山岩性以石灰岩为主是造成降水中阳离子, 尤其是  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  浓度较大的主要原因.

(4) 由于采样点分散, 部分采样过程难免存在疏漏, 离子浓度值存在少许误差, 故以趋势分析为主, 浓度值多用浓度区间表示.

致谢: 感谢南京大学地理与海洋科学学院庞洪喜副教授提供数据.

#### 参考文献:

[ 1 ] Migliavacca D, Teixeira E C, Pires M, *et al.* Study of chemical elements in atmospheric precipitation in South Brazil [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38** ( 11 ): 1641-1656.

[ 2 ] 耿志新, 侯书贵, 张东启, 等. 喜马拉雅山雪冰主要离子的时空变化特征及来源分析 [ J ]. *冰川冻土*, 2007, **29** ( 2 ): 192-200.

[ 3 ] Okuda T, Iwase T, Ueda H, *et al.* Long-term trend of chemical constituents in precipitation in Tokyo metropolitan area, Japan from 1990 to 2002. [ J ]. *Science of the Total Environment*, 2005, **339** ( 1-3 ): 127-141.

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

[ 5 ] 鞠建廷, 朱立平, 汪勇, 等. 藏南普莫雍错流域降水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.

[ 6 ] 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.

[ 7 ] 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.

[ 8 ] 何元庆, 姚檀栋, 张晓君, 等. 典型季风温冰川区大气-冰川-融水径流系统内环境信息的现代变化过程 [ J ]. *中国科学( D 辑)*, 2001, **31** ( 增刊 ): 221-227.

[ 9 ] 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.

[ 10 ] He Y Q, Yao T D, Theakstone W H, *et al.* The irregular pattern of isotopic and ionic signals in a typical monsoon temperate-glacier area, Mt Yulong, China [ J ]. *Annals of Glaciology*, 2002, **35**: 167-174.

[ 11 ] 何元庆, 张惠林, 姚檀栋, 等. 中国季风温冰川区近代气候变化与冰川动态 [ J ]. *地理学报*, 2003, **58** ( 4 ): 550-558.

[ 12 ] 庞洪喜, 何元庆, 卢爱刚, 等. 玉龙雪山冰川稳定同位素分馏冬夏对比 [ J ]. *地理学报*, 2006, **61** ( 5 ): 501-509.

[ 13 ] 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** ( 13 ): 11013-11018.

[ 14 ] 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** ( 13 ): 6647-6658.

[ 15 ] 李宗省, 何元庆, 阮玲玲, 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.

[ 16 ] 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.

[ 18 ] 高坛光, 康世昌, 张强弓, 等. 青藏高原纳木错流域河水主要离子化学特征及来源 [ J ]. *环境科学*. 2008, **29** ( 11 ): 3009-3016.

[ 19 ] 陈震. *水环境科学* [ M ]. 北京: 科学出版社, 2006. 129-135.

[ 20 ] 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.

[ 21 ] 刘君峰, 宋之光, 许涛. 广州地区雨水化学组成与雨水酸度主控因子研究 [ J ]. *环境科学*, 2006, **27** ( 10 ): 1998-2002.

[ 22 ] 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.
- [23] 康世昌, 秦大河, Mayewski P, 等. 近 200a 来珠穆朗玛峰北坡远东绒布芯气候记录 [J]. *冰川冻土*, 2000, **22**(3): 211-217.
- [24] 康世昌, 丛志远. 青藏高原大气降水和气溶胶化学特征研究进展 [J]. *冰川冻土*, 2006, **28**(3): 371-379.
- [25] 李思悦, 谭香, 徐志方, 等. 湖北丹江口水库主要离子化学季节变化及离子来源分析 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(12): 3353-3359.
- [26] 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.