

丽江市夏季降水化学组成分析

李宗省¹, 何元庆¹, 贾文雄^{1,2}, 庞洪喜¹, 张宁宁¹, 院玲玲³, 卢爱刚⁴, 和献中¹, 宋波¹

(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. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 3. 南京农业大学人文社会科学院, 南京 210095; 4. 渭南师范学院环境与生命科学系, 渭南 714000)

摘要:运用相关分析、趋势分析、海盐示踪法和 HYSPLIT 模型, 对 2006-05-23 ~ 2006-07-02 云南丽江市夏季降水常量离子的化学特征分析表明, 降水中离子浓度的大小顺序为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$, 其中 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 是夏季降水中的高浓度离子, 分别占离子总浓度的 65.5% 和 15.6%; 13 次降水中阴离子总浓度显著高于阳离子总浓度. 夏季降水中 $\text{SO}_4^{2-} : \text{NO}_3^-$ 变化范围为 7.2 ~ 37.1, 平均值为 15.7, 表明 SO_4^{2-} 为该区降水酸度的主要贡献者. 由于离子在大气中的相互反应和来源的相似性, 离子间相关性水平较好, 其中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的相关系数为 0.74; 离子浓度与同期降水和平均风速表现负相关. 研究区夏季降水中 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Ca^{2+} 主要是陆源物质输入, NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Cl^- 陆源物质贡献比例依次为 100%、98.8%、96%、99.3%、46.7% 和 50.3%. 人类经济活动导致的一些污染是该区大气环境变化的主要原因; 丽江周边工业区的污染物质主要通过局地环流输入, 南亚、东南亚和我国东南沿海工业区的污染物质主要随季风环流输入.

关键词: 丽江; 降水; 化学; 来源

中图分类号: X13 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)02-0362-06

Analysis on Chemical Compositions of Rainwater in Summer, Lijiang City, China

LI Zong-xing¹, HE Yuan-qing¹, JIA Wen-xiong^{1,2}, PANG Hong-xi¹, ZHANG Ning-ning¹, YUAN Ling-ling³, LU Aigang⁴, HE Xian-zhong¹, SONG Bo¹

(1. State Key Laboratory of Cryosphere Science/Yulong Glacial and Environmental Observation Station, Cold and Arid Region Environment and Engineering Research Institution, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 3. College of Humanities & Social Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 4. Department of Environment and Life Sciences, Weinan Teachers University, Weinan 714000, China)

Abstract: Rainwater samples were collected from Lijiang City, China, in 23 May-2 July, 2006. Rainwater chemical compositions and sources were studied, using HYSPLIT model, ions tracer techniques, correlation and trend analysis. Total ionic concentration was dominated by SO_4^{2-} and Ca^{2+} , which account for 65.5% and 15.6% respectively. Sort order of ions concentration is $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$. Total anions concentration is higher than total cations concentration in 13 rainwater events. The ratio of SO_4^{2-} to NO_3^- varies from 7.2 to 37.1 and average value is 15.7, it reflected SO_4^{2-} made great contribution to rainwater acidity in Lijiang City. The correlation among ions is significant due to the atmospheric chemical process and similar ionic sources, and correlation coefficient between SO_4^{2-} and NO_3^- is 0.74. And what's more, the negative correlation of ionic concentration, precipitation and the average wind speed is also outstanding. The source of NO_3^- , SO_4^{2-} , K^+ and Ca^{2+} is mainly land dust, and the non-marine source percent of NO_3^- , SO_4^{2-} , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} and Cl^- is 100%, 98.8%, 96%, 99.3%, 46.7% and 50.3%, respectively. The main reason of atmospheric environmental variation in Lijiang City is pollution caused by economic actions. The pollutants from surrounding industrial parks input into Lijiang City by local circulation, and from industrial regions of Southern Asia, Southeastern Asia and Southeastern China input into Lijiang City by monsoonal circulation.

Key words: Lijiang City; rainwater; chemistry; sources

降水化学是大气学和地理学研究的热点之一^[1~3]. 降水化学组成是评价大气物质沉降水平、转化、输送及其对生态、环境、建筑物等影响的基础^[4~6]. 降水化学组分是非常重要的环境因子, 根据降水的化学成分、分布特征及其变化趋势, 可以了解由于经济发展、人口膨胀、工业化程度加剧、能耗增加等导致人类赖以生存的环境系统恶化的程度^[7~12]. 自 20 世纪 90 年代中期, 国内学者关于城市地区的降水化学特征分析和研究已逐步展开, 国家

环境保护总局 2004 年下发了《城市大气环境容量核定工作》文件, 使降水化学的分析和研究更具实效

收稿日期: 2008-03-10; 修订日期: 2008-06-03

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (KZCXZ-YW-317); 国家自然科学基金重点项目 (90511007); 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2007CB411201); 国家自然科学基金委群体项目 (40121101); 中国科学院创新群体项目 (CXTD-Z2005-2); 冰冻圈科学国家重点实验室自主研究项目; 中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部博士资助项目” (0828A11001); 丽江市政府委托项目

作者简介: 李宗省 (1984 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境化学、冰川与全球变化, E-mail: Lzxhs@163.com

性, 为环境容量测算和降水离子组成的演变及环境系统可持续发展提供了科学参考. 前人对我国西南地区降水化学状况、酸雨影响的研究表明, 该区降水酸化程度逐年加重, 酸雨类型由硫酸型向硫酸和硝酸复合型转变, 酸雨形成的主要原因是人类经济活动引发的大气污染^[13~16]. 本研究以丽江市夏季降水化学组成为对象, 重点探讨了季风背景下该区降水的化学特征及其来源, 以期对未来大气污染防治工作提供重要参考.

1 研究区概况

丽江市位于青藏高原南缘、滇西北中部、横断山脉最南端, 北纬25°59' ~ 27°56'、东经99°23' ~ 101°31'之间(图1). 该区分布有亚欧大陆最南端的季风海洋性冰川区玉龙雪山冰川区, 2006年该区建成了我国第一个季风海洋性冰川与环境观测研究基地. 自1999年以来开展了包括冰川、气候、生态、旅游等大量研究工作, 已取得了一系列有意义的成果. 在全球变暖背景下, 该区气候变暖明显, 环境变化更加复杂, 研究该区大气降水的化学特征有重要的理论和现实意义. 丽江地区气候干、湿季分异明显, 每年11~次年4月为干季, 主要受西风环流南支和青藏高原冬季风控制, 干燥少雨, 日照充足, 气温日较差大; 5~10月, 主要受控于西南和东南季风, 降水丰沛, 其中7~9月降水量最为集中. 海拔2393 m的丽江盆地, 多年平均气温为12.6℃, 全年各月均为正温, 年均降水量900 mm左右.

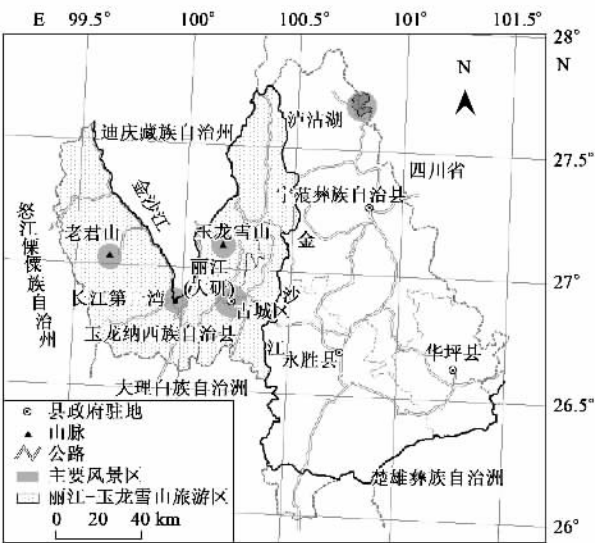


图1 研究区位置

Fig.1 Location of study area

2 采样、试验分析和研究方法

2006-05-23 ~ 2006-07-02 在丽江玉龙雪山冰川与环境观测研究站连续收集了共13次降水, 本实验使用的采样仪器是1个直径为50 cm的聚乙烯塑料桶和1个无色聚乙烯塑料袋, 放置的相对高度为1.5 m. 降雨开始时将其取出, 放置在固定位置, 并套上塑料袋. 降雨结束后立刻取回样品放置在低温室内(约-10℃). 样品以冷冻状态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℃的低温室保存. 分析前2d将样品取出在室温(约23℃)下自然融化, 然后进行主要离子浓度的测量. K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度是用Dionex-600型离子色谱仪测定的, Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 浓度是用Dionex-300型离子色谱仪测定的, 其精度可达 $ng \cdot g^{-1}$ 级, 测试数据误差 $<5\%$. 研究区相关的气候和社会经济统计数据由丽江市气象局和统计局提供.

相关分析法和趋势分析法是大气降水化学研究的重要方法. 研究区位于我国季风区, 水汽以海洋源为主, 夏季风期降水占年总降水量的90%以上^[17], 因此本研究还选择了海盐示踪法作为研究方法之一^[18, 19]. 为了追踪水汽来源, 运用了美国大气实验室开发的HYSPLIT4 (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)模型, 它是用来仿真追踪气团传输路径的完整模拟系统(<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>, NOAA Air Resources Laboratory), 能够反映气团的传输轨迹, 主要基于等极投影、郎伯特投影和墨卡托投影背景的格点数据完成一定时间间隔的模拟. 本研究中, 运用NOAA/NCEP在分析格点数据模拟了采样期间气团的传输轨迹, 以确定研究区120h内气团的传输轨迹.

3 结果与讨论

3.1 浓度特征

如表1所示, 该区夏季降水中离子浓度的大小顺序为 $SO_4^{2-} > Ca^{2+} > Cl^- > NO_3^- > Na^+ > K^+ > Mg^{2+}$, 其中 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 是降水中的高浓度离子, 分别占离子总浓度的65.5%和15.6%, 而 Cl^- 、 NO_3^- 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 分别占离子总浓度的7.3%、4.2%、3.2%、2.9%、1.3%. SO_4^{2-} 浓度显著高于其它阴离子, 占阴离子总浓度的85%, 表明该区降水中的致酸物质主要是硫酸盐, 这与我国大气污染主要是硫酸型相一致^[20]. 阳离子中 Ca^{2+} 浓度最高, 占阳离子总浓度的68%, 因为该区是石灰岩分布区^[18]. 丽江

夏季降水中阴、阳离子总浓度极不平衡,阴离子总浓度占离子总浓度的 76.94%,阴离子总浓度是阳离子总浓度的 3.34 倍,这是大气污染性质和离子来源的不同造成的.如图 2 所示,该区 13 次降水中阴离子总浓度显著高于阳离子总浓度,反映出阴离子特

别是 SO_4^{2-} 是该区降水离子浓度的主要贡献者,也证明了离子总浓度日变化的极度不平衡.在 5 月 28 ~ 31 日总共 4 d 的连续降水过程中,阳离子总浓度和阴离子总浓度逐渐降低,这是连续降水的洗涤作用使空气越来越洁净而引起的.

表 1 丽江夏季降水离子浓度及其与其它地区的对比/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$										
Table 1 Ionic concentration of rainwater in Lijiang City and comparison with other regions in China/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$										
地区	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	总阴离子浓度	总阳离子浓度	$\text{SO}_4^{2-}:\text{NO}_3^-$
丽江	1.40	0.80	12.61	0.62	0.57	0.23	3.01	14.81	4.43	15.76
雪坑 ^[18]	0.09	0.32	0.39	0.02	0.02	0.04	1.77	1.80	1.85	1.22
成都 ^[13]	1.51	5.39	15.71	0.22	0.83	0.33	5.57	22.61	6.95	2.91
南京 ^[21]	6.00	2.22	13.21	0.53	0.49	0.89	6.75	21.43	8.66	5.95
湘潭 ^[22]	0.73	2.47	5.33	0.16	0.37	1.52	13.88	8.53	15.93	2.16
重庆 ^[14]	1.88	2.92	21.51	0.56	0.83	0.52	7.17	26.31	9.09	7.37
柳州 ^[23]	1.01	5.27	39.37	0.96	0.81	1.16	8.47	45.65	11.40	7.47
泸州 ^[24]	5.06	14.32	51.53	5.95	7.69	1.55	17.42	70.91	32.61	3.60
芜湖 ^[25]	1.21	2.95	11.08				5.04	15.24		3.76

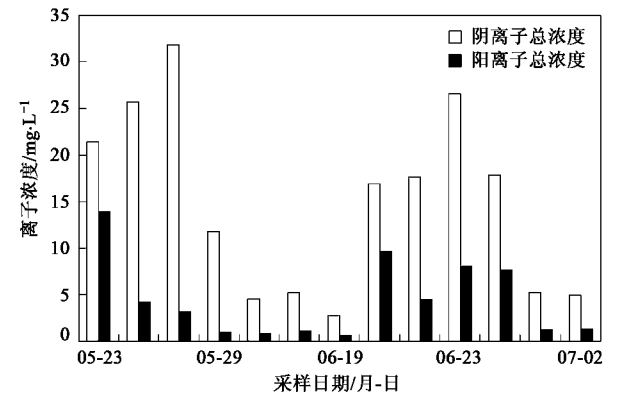


图 2 阴离子总浓度和阳离子总浓度的变化
Fig. 2 Variation of total concentrations between cations and anions

如表 1 所示,除阴离子总浓度高于湘潭市外,丽江夏季降水中阴、阳离子总浓度均低于我国南方的成都、重庆等 7 城市; NO_3^- 浓度显著低于其它 7 个城市; SO_4^{2-} 浓度明显低于成都、重庆、南京、柳州和泸州.这种差异一方面是各区的大气环流背景、大气污染性质、离子具体来源途径不同,另一方面是丽江市经济发展主要依靠环境污染相对较小的旅游业,因为丽江市的产业结构已由 20 世纪 90 年代初的“一、三、二”组合转变为现在的“三、二、一”组合,2006 年以旅游业为主的第三产业产值占丽江 GDP 的 52%^[26].降水中 $\text{SO}_4^{2-}:\text{NO}_3^-$ 不仅可以揭示酸雨特征,也可估计 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 对降水酸度的相对贡献.该区 13 次降水中的 $\text{SO}_4^{2-}:\text{NO}_3^-$ 变化范围为 7.2 ~

37.1,平均值为 15.7,显著高于我国南方的成都、重庆等 7 城市,也明显高于北京(2.96)、金华(3.05)、欧洲(3.14)和北美地区(3.74)的一些城市^[27,28],由此判断 SO_4^{2-} 在该区酸雨形成中的贡献最大,该区酸雨为硫酸型,而其它地区多为硫酸和硝酸复合型.

3.2 离子关系

为了确定降水中阴、阳离子不同的来源机制和相互间潜在的联系,表 2 计算了降水中主要离子组分的相关关系.由于化学性质相似且 SO_2 和 NO_x 在大气中经常一起排放, SO_4^{2-} 和 NO_3^- 通常都表现出较好的相关性,本研究中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的相关系数为 0.74,反映出两者间除了光化学过程和氧化机制相似外,还有一些相似的来源方式.相比较而言, Cl^- 和 NO_3^- 的相关性显著大于 Cl^- 和 SO_4^{2-} ,表明 Cl^- 和 NO_3^- 的来源共性和大气中存在形式相似的可能性相对较大.陆源性离子 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 以及海盐源离子 Na^+ 和 Cl^- 表现为显著相关,表明它们具有相似的来源方式及其机制. Ca^{2+} 与其它阳离子均表现相关性,表明它们在来源或在大气中的存在形式有一定的共性,而它又是局地源贡献的标志,由此推断局地源对阳离子的贡献较大. K^+ 与 Cl^- 和 NO_3^- , Mg^{2+} 与 Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} , Ca^{2+} 与 Cl^- 和 NO_3^- 均表现出相关性,降水中这些离子的相关性主要是大气中酸性物质 H_2SO_4 、 HNO_3 和 HCl 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等碱性碳酸盐之间的化学反应造成的.特别说明的是, K^+ 与 Cl^- 和 Na^+ 表现出显著相关,而 Cl^- 和 Na^+ 是

海源贡献的代表,由此推断, K^+ 的来源与海洋性水汽(季风)输送的关系较大.为了探究天气状况对夏季降水离子浓度的影响,将离子浓度与同期气温、降水和平均风速进行相关分析,发现浓度与气温无明

显相关关系,而与降水和平均风速表现负相关(表2).因为降水量愈大,稀释作用愈明显,浓度愈低;风速愈大,空气中气溶胶的量相对较少,空气相对比较洁净,因此降水中的离子浓度降低.

表 2 离子浓度及其与气象参数的相关分析¹⁾
Table 2 Correlation analysis of ionic concentrations and meteorological parameters

	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
Cl^-	1	0.76 ^{**}	0.51 [*]	0.94 ^{***}	0.89 ^{***}	0.51 [*]	0.8 ^{**}
NO_3^-		1	0.74 ^{**}	0.54 [*]	0.6 ^{**}	0.55 [*]	0.68 ^{**}
SO_4^{2-}			1	0.25	0.42	0.60 ^{**}	0.48
Na^+				1	0.95 ^{***}	0.4	0.73 ^{**}
K^+					1	0.53 [*]	0.78 ^{**}
Mg^{2+}						1	0.82 ^{***}
Ca^{2+}							1
气温	0.21	0.19	0.26	0.05	0.03	0.24	0.12
降水	-0.55 [*]	-0.53 [*]	-0.52 [*]	-0.5 [*]	-0.6 [*]	-0.52 [*]	-0.57 [*]
平均风速	-0.66 ^{**}	-0.73 ^{**}	-0.47 [*]	-0.55 [*]	-0.54 [*]	-0.05	-0.26

1) *** 表示置信度 < 0.000 1, ** 表示置信度 < 0.001, * 表示置信度 < 0.05

3.3 离子来源

如果忽略火山及其它天然源的贡献,大气降水 中离子组分的主要来源包括海水溅射、岩石、土壤风化和人为活动^[29].本研究运用海盐示踪法(经判断, 该区海盐示踪离子为 Na^+)计算了降水中海洋源和 非海洋源的贡献,该区 13 次降水中 Na^+ 是海洋源贡 献; Cl^- 非海洋源贡献比例的变化范围为 16.4% ~ 82%,平均值为 50.3%; NO_3^- 在大气中反应机制较 为复杂,被认为是陆源物质贡献^[19]; SO_4^{2-} 非海洋源 贡献比例的变化范围为 94.2% ~ 99.7%,平均值为 98.8%; K^+ 非海洋源贡献比例的变化范围为 93% ~ 98%,平均值为 96%; Mg^{2+} 非海洋源贡献比例的变化 范围为 10% ~ 93%,平均值为 46.7%; Ca^{2+} 非海 洋源贡献比例的变化范围为 98.4% ~ 99.8%,平均 值为 99.3%.由此判断该区夏季降水中 Na^+ 为海洋 源贡献, NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Ca^{2+} 是陆源物质输入, Mg^{2+} 和 Cl^- 离子海、陆源物质的贡献相当.

为了分析城市人类活动对降水化学的影响,对 比了夏季降水与玉龙雪山白水 1 号冰川积累区雪坑 中的离子浓度,发现丽江夏季降水中的离子浓度显 著高于玉龙雪山白水 1 号冰川 4 900 m 雪坑中的离 子浓度, SO_4^{2-} 浓度前者是后者的 32.3 倍(表 1).玉 龙雪山白水 1 号冰川区位于丽江市以北 25 km 处, 比丽江市海拔高 2 500 m,4 900 m 处的冰川积累区更 是人迹罕至,污染微弱,因此冰川区雪坑化学离子浓

度基本代表了丽江市的大气环境本底值.丽江市区 由于近年来旅游业的迅猛发展,外来人口不断增加, 服务于旅游业的燃煤供暖设施、汽车等迅速增加.据 统计,丽江市各类机动车辆由 2003 年的 44 899 辆增 加到了 2006 年的 56 760 辆,其中用于载客的各类轿 车数量由 2003 年的 17 082 辆增加到了 2006 年的 29 450 辆;星级酒店的数量由 1999 年的 30 家增加 到了 2006 年 178 家.机动车辆及各种旅游服务设施 使用的化石燃料燃烧后,释放出硫化物(主要是 SO_2)、氮氧化物(NO_x)等大气污染物质,使大气环境 发生变化并影响生物地球化学循环,导致大气污染 加重,环境状况恶化,由此推断城市经济活动引起的 各类污染是影响该区大气环境的主要原因之一.

为了探究远源物质的来源,对该区 13 次降水气 团来源做了后向轨迹分析(图 3),表明采样期间气 团主要来自于印度洋,沿途主要经过南亚、东南亚和 我国东南沿海地区,期间出现了 2 次(5 月 26 日和 7 月 2 日)西风环流南支沿青藏高原地区进入研究区 的情况.由此判断远源污染物质(主要是硫酸盐类污 染)主要以 2 种方式输入,第 1 个途径是我国西南地 区的许多工业区(例如攀枝花市等)的大气污染物质 借助于局地气流、盛行风等输入;第 2 个途径是南 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,这些地区是西南季风和东南季风的必 经之地(图 3). Ca^{2+} 主要是该区岩石、土壤风化的产 物,因为该区以石灰岩为主; K^+ 主要是区内和季风

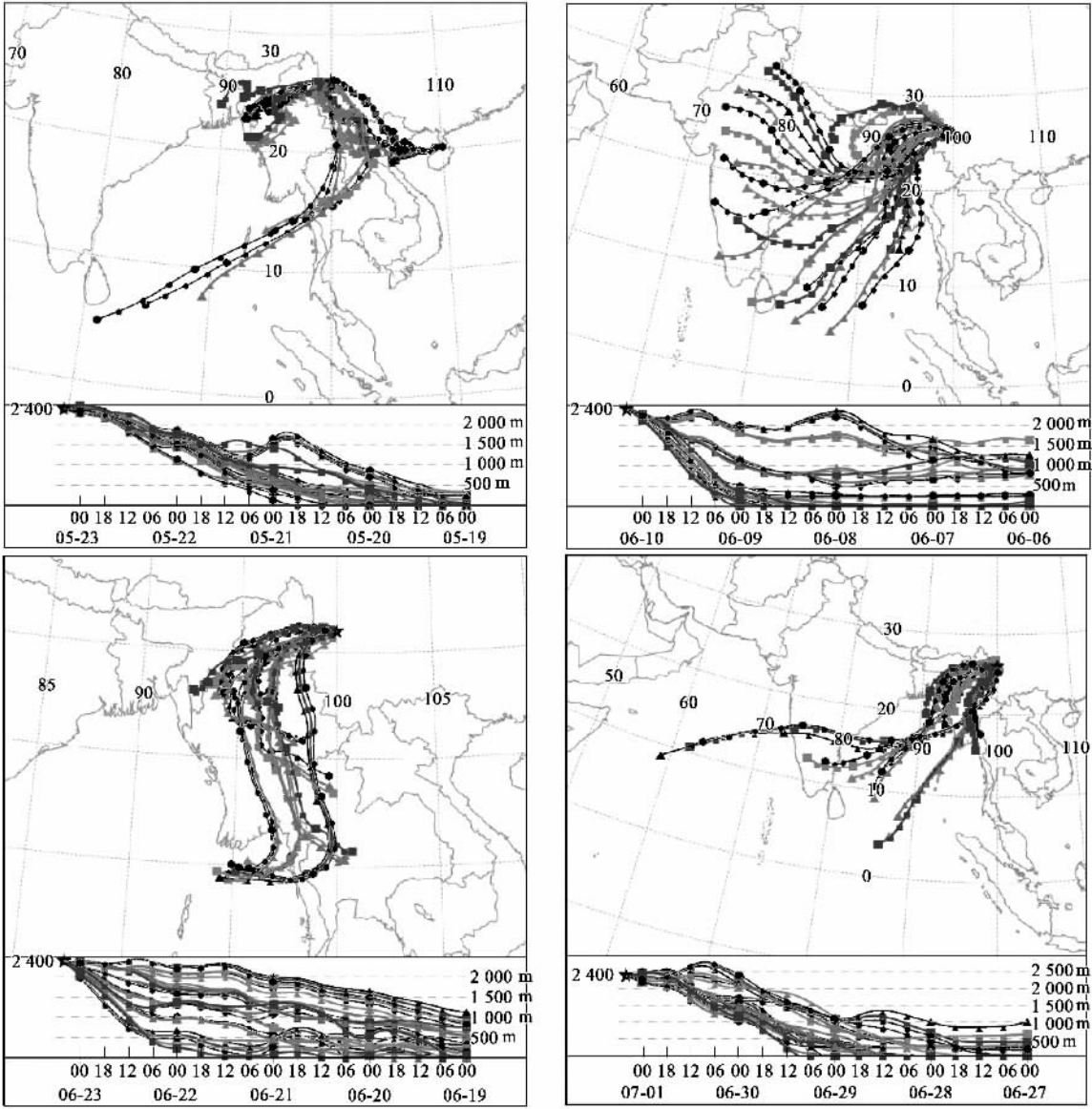


图 3 研究区降水气团的典型后向轨迹

Fig.3 Typical backward trajectories ending at Lijiang City

通道上植被系统、农业活动的贡献。

4 结论

(1) 该区夏季降水中离子浓度的大小顺序为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$, 其中 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 是降水中的主要离子, 分别占总离子浓度的 65.5% 和 15.6%; 13 次降水中阴离子总浓度显著高于阳离子总浓度, 阴、阳离子浓度不平衡. 由于 NO_3^- 浓度极低, 该区夏季降水中 $\text{SO}_4^{2-} : \text{NO}_3^-$ 变化范围为 7.2~37.1, 平均值为 15.7, 显著高于我国其它地区, 表明 SO_4^{2-} 是该区夏季降水酸度中的主要贡献者。

(2) 由于离子在大气中的化学反应和来源的相似性, 夏季降水离子间相关性水平较好; 降水和平均风速对离子浓度的影响明显, 降水量愈大, 风速愈大, 离子浓度愈低, 反之亦然。

(3) 研究区夏季降水中 Na^+ 是海洋源, NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Ca^{2+} 主要是陆源物质输入, Mg^{2+} 和 Cl^- 海、陆源物质的贡献相当; 区内人类经济活动导致的各类污染是大气环境变化的主要原因; 丽江周边工业区的污染物质主要通过局地环流输入, 南亚、东南亚和我国东南沿海工业区的污染物质主要随季风环流输入。

致谢:衷心感谢玉龙雪山站和丽江玉龙雪山省级旅游开发区工作人员在采样工作中的大力协助,并向丽江市气象局、统计局给予的数据支持表示诚挚的谢意。

参考文献:

- [1] 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]. *Sci Total Environ*, 2005, **339**(1-3): 127-141.
- [2] Fujita S, Takahashi A, Weng J H, *et al.* Precipitation chemistry in East Asia[J]. *Atmos Environ*, 2000, **34**(4): 525-537.
- [3] Migliavacca D, Teixeira E C, Pires M, *et al.* Study of chemical elements in atmospheric precipitation in South Brazil [J]. *Atmos Environ*, 2004, **38**(11): 1641-1656.
- [4] Rastogi N, Sarin M M. Chemical characteristics of individual rain events from a semi-arid region in India: Three-year study[J]. *Atmos Environ*, 2005, **39**(18): 3313-3323.
- [5] Kerminen V M. Relative roles of secondary sulfate and organics in atmospheric cloud condensation nuclei production [J]. *J Geo Research*, 2001, **106**(D15): 17321-17333.
- [6] Facchina M C, Mircea M, Fuzzi S, *et al.* Cloud be do enhancement by surface active organic solutes in growing droplets[J]. *Nature*, 1999, **401** (6750): 257-259.
- [7] 牛戣文,何凌燕,胡敏.深圳大气降水的化学组成特征[J]. *环境科学*, 2008, **29**(4): 1014-1019.
- [8] Pena R M, Garcia S, Herrero C, *et al.* Organic acids and aldehydes in rainwater in a northwest region of Spain[J]. *Atmos Environ*, 2002, **36**(34): 5277-5288.
- [9] Kawamura K, Steinberg S, Ng L, *et al.* Wet deposition of low molecular weight mono and carboxylic acids, aldehydes and inorganic species in Los Angeles[J]. *Atmos Environ*, 2001, **35**(23): 3917-3926.
- [10] Kang G, Collett J L, Shin D Y, *et al.* Comparison of the chemical composition of precipitation on the western and eastern coasts of Korea [J]. *Water Air Soil Pollut*, 2004, **151**: 11-34.
- [11] Ramachandran S. PM_{2.5} mass concentrations in comparison with aerosol optical depths over the Arabian Sea and Indian Ocean during winter monsoon[J]. *Atmos Environ*, 2005, **39**: 1879-1890.
- [12] Falkovich A, Ganor E, Levin Z, *et al.* Chemical and mineralogical analysis of individual mineral dust particles [J]. *J Geo Research*, 2001, **106**(D16): 18029-18036.
- [13] 梅自良,刘仲秋,刘丽,等.成都市区酸雨变化及酸雨化学组成分析[J]. *四川环境*, 2005, **24**(3): 52-55.
- [14] 周竹渝,陈德容,殷捷,等.重庆市降水化学特征分析[J]. *重庆环境科学*, **25**(11): 112-114.
- [15] 李可为,吴有恒.贵州地区酸雨情况浅析[J]. *贵州气象*, 2006, **30**(6): 24-25.
- [16] 王红梅.浅析昆明市酸雨污染状况及变化[J]. *云南环境科学*, 2005, **24**(3): 51-54.
- [17] Pang H X, He Y Q, Theakstone W H, *et al.* Soluble ionic and oxygen isotopic compositions of a shallow firn profile, Baishui glacier No. 1, southeastern Tibetan Plateau[J]. *Ann Glacio*, 2007, **46**: 325-330.
- [18] Li Z X, He Y Q, Pang H X, *et al.* Source of major anions and cations of snowpacks in Hailuoguo No.1 Glacier, Mt. Gongga and Baishui No.1 Glacier, Mt. Yulong, China[J]. *J Geo Sciences*. 2008, **18**(1): 115-125.
- [19] 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、阳离子的来源研究[J]. *地理学报*, 2007, **62**(9): 902-1011.
- [20] 王艳,葛福临,刘晓环,等.泰山降水的离子组成特征分析[J]. *中国环境科学*, 2006, **26**(4): 422-426.
- [21] 郑有飞,唐信英,徐建强,等.南京市江北工业区降水酸性及化学成分分析[J]. *环境科学研究*, 2007, **20**(4): 45-51.
- [22] 郭雯.湘潭市酸雨污染状况、化学组成及其防治对策[J]. *环境科学导刊*, 2007, **26**(5): 63-66.
- [23] 梁宏温,温远光,何斌,等.柳州市中心酸雨化学特征及成因分析[J]. *广西农业生物科学*, 2002, **21**(4): 261-265.
- [24] 周以富.泸州市大气降水的化学特征及其防治对策[J]. *四川环境*, 2003, **22**(5): 25-35.
- [25] 王小月,张书贵.芜湖市降水化学成分特征及变化趋势的初步研究[J]. *安徽师范大学学报(自然科学版)*, 2000, **20**(3): 276-279.
- [26] 院玲玲.丽江-玉龙雪山旅游区迁入人口及其对社会经济和自然环境的影响研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2008.
- [27] 张苗云,王世杰,张迎,等.金华市大气降水的化学组成特征及来源解析[J]. *中国环境监测*, 2007, **23**(6): 86-92.
- [28] 林雨菲,刘素美,纪雷,等.黄海春夏季降水中常量离子化学特征分析[J]. *海洋环境科学*, 2007, **26**(2): 116-120.
- [29] 王雪梅,杨龙元,秦伯强,等.太湖流域春季降水化学组成及其来源研究[J]. *海洋与湖沼*, 2006, **37**(3): 249-255.