

西南地区典型岩溶盆地夏季水文系统 水-岩反应及离子特征分析

朱国锋¹, 张真一², 何元庆^{1,3}, 蒲焘³

(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, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州商学院 图书馆, 甘肃 兰州 730000; 3. 兰州大学 资源环境学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 收集了横断山区丽江盆地 2005 年 7 月 22 至 7 月 28 日部分水体可溶性离子数据, 运用主成分和相关分析等方法, 对我国横断山区丽江盆地 7 个代表性水体进行了化学离子分析。分析结果表明, 水体中的阳离子主要以 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主, 阴离子中 SO_4^{2-} 为优势阴离子。主成分分析法分析结果表明, 岩石岩性对丽江盆地的水体可溶性常规离子构成具有决定性影响, 人类活动对水体离子构成具有较强影响。相关性分析表明 Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} 浓度与岩石的岩性高度相关, Cl^- 和 NO_3^- 浓度与人类活动呈正相关关系。 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 相关性很强, 说明 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 有很强的同源性, 进一步分析表明这与 SO_4^{2-} 的化合物 H_2SO_4 参与并加速碳酸盐矿物和硫酸盐矿物的溶解有关; SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ 之间存在较强的相关性。 Cl^- 与 NO_3^- 具有较好的相关性, 这两种离子与人类活动有关, 说明 Cl^- 与 NO_3^- 有近似的来源且大部分来源于人类活动。

关键词: 丽江盆地; 可溶性离子; 主成分分析法; 相关分析法; 物质迁移

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)06-0021-05

中图分类号: P342, X532

Water-Rock Interaction and Ion Characteristics of Summer Hydrologic Systems in Typical Karst Basins

ZHU Guo-feng^{1,2}, ZHANG Zhen-yi², HE Yuan-qing^{1,3}, PU Tao³

(1. State Key Laboratory of Cryosphere Sciences, Yulong Snow Mountain

Glaciers and Environmental Observation Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China;

2. Library of Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou, Gansu 730000, China;

3. College of Resources and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Different typical water samples were collected from July 22 to July 28 in 2005 in Lijiang Basin of the Hengduan Mountainous Region for chemical characteristics study. Principal component analysis (PCA) and correlation analysis were used for data analysis, the results showed that the dominant cations were Ca^{2+} and Mg^{2+} , whereas SO_4^{2-} were major anions. The analytical results suggested that the orders of water concentration, from high to low, were the glacial lake water, melt water runoff, lake water, surface runoff and groundwater. PCA results showed the lithological characters definitively influenced the ion content of water in the Lijiang basin, which also were effected by human activities. Correlation analysis showed that the concentration of Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} highly correlated with the lithology, whereas Cl^- , and NO_3^- concentration had a positive correlation with human activities. High correlation between Ca^{2+} and Mg^{2+} suggested their strong common source. Further analysis shows that H_2SO_4 participating in and accelerating the carbonate and sulfate mineral dissolution related to the above. Cl^- and NO_3^- with strong correlation were closely related to human activities indicating Cl^- and NO_3^- have similar sources of which most come from human activities.

Keywords: Lijiang Basin; soluble ions; principal component analysis; correlation analysis; mass transfer

收稿日期: 2010-07-30

修回日期: 2011-01-26

资助项目: 国家自然科学基金项目“典型温冰川流域水文径流变化对区域水资源的影响”(40971019); 中国科学院“西部之光”人才培养计划(O828A11001); 国家自然科学基金项目(40801028); 国家重点基础研究发展(973)计划(2007CB411501)

作者简介: 朱国锋(1983—), 男(汉族), 甘肃省平凉市人, 博士研究生, 研究方向为寒区水文与水资源。E-mail: guofeng_zhu@Yahoo.cn。

岩溶盆地发育的不均匀程度高,常形成裂隙—溶隙—管道的复杂岩溶系统,岩溶水与降水、地表水之间转化迅速,易受污染,地球化学敏感性和生态环境脆弱性突出^[1-5]。这类盆地是岩溶水的汇集排泄区,由于水土资源条件优越,成为我国西南地区人类活动的密集区^[6-7]。丽江盆地水资源主要形成于盆地北部的玉龙雪山,水文系统具有典型的岩溶水文运动规律和特点,即产生于高山径流形成区的水资源由于岩溶地质条件具有良好的通透性,使大量的水分直接渗入地下被保护起来,避免了无效蒸散损耗,同时河床巨大的透水能力使地表水很快转化为地下水^[7-8]。丽江盆地位于典型的季风性气候影响区,其地表水和地下水离子化学构成不同程度的受到基岩岩性、季风性降水、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—人相互影响的理想区域。7月份各水体受大气环流、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^[9]。近年来,丽江盆地水资源供需矛盾逐渐突出。了解流域地表水与地下水的转化规律,对于流域水资源的科学管理、缓解流域水资源供需矛盾以及流域生态环境建设都具有举足轻重的作用。前人对岩溶地区径流、地下水、环境特征等方面已经进行了较为深入细致的研究^[1-11],但是对水体化学特征形成机理的探讨有限。本研究选择典型岩溶盆地丽江盆地为研究区域,以可溶性离子为研究对象,探讨了丽江盆地水—岩物质运移特征和水体中可溶性常规离子的地球化学演化,为探究该地区的水—岩物质运移规律和保护岩溶地区水资源积累基础数据。

1 研究区气候、水文、地质背景及人类活动概况

丽江盆地位于云南省西北部,云贵高原西缘,藏滇地槽与扬子准地台两个构造单元的结合部,总体地势呈 S 型南北走向。平均海拔 2 400 m,地形平均坡降 8%^[10]。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 月降水约占全年降水量的 90%,年内温度变化不大,干湿季分明,水分蒸发以 4—6 月份为最盛,7—8 月份是一年中水分盈余最多时期。6—10 月盆地西北部的玉龙雪山经历剧烈消融期,对地下水、径流、湖泊都产生深刻的影响。同时该区域冰川 12 月至翌年 4 月冰雪融水较少,对低海拔地区水体影响较小^[9]。玉龙雪山南端的 5 条冰川(冰川总面积 2.44 km²),向南注入丽江盆地,在盆地

内径流呈散流状,最后于盆地最南端汇入漾弓江。同时盆地处在青藏高原边缘第一、二阶梯的过渡带,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,盆地内泉眼分布较多,泉水在地表形成径流,是地表径流的稳定补给。盆地地下水类型有分布于丽江盆地白沙一带的扇形平原和城南一带松散岩类孔隙水,分布于象山等地的碳酸盐岩分布区的碳酸盐岩类溶水及分布于丽江盆地北东及西部山麓的基岩裂隙水^[10]。盆地位于低纬度人类活动发达区,水体化学离子的浓度及构成不同程度地受到人类活动的扰动^[9]。

2 样品采集与分析

2.1 样品采集

于 2005 年 7 月 22—30 日在玉龙雪山地区对不同水体进行了系统采样。不同水体共采集样品 4 个用于分析。每个样品体积大约在 90~110 ml。地下水的采样时间为 2005 年 7 月 22 日(玉峰寺),2005 年 7 月 24 日(甘海子),2005 年 7 月 22 日(黑龙潭);湖水的采样时间为 2005 年 7 月 30 日(牦牛坪),2005 年 7 月 23 日(拉市海),2005 年 7 月 28 日(文海),2005 年 7 月 23 日(团山水库),2005 年 7 月 23 日(文笔山水库);地表径流的采样时间为 2005 年 7 月 23 日(木家桥),2005 年 7 月 28 日(文海入口)。

2.2 样品测试

样品存放于 -15 °C 的低温室保存。分析前两天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。采用 Dionex-600 型离子色谱仪测定 K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ 浓度;用 Dionex-300 型离子色谱仪测定 Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻ 浓度,精度可达 ng/g 级,测试数据误差小于 5%(表 1)。

2.3 离子平衡

离子平衡的理想状态是: $\sum_{\text{阳离子}} = \sum_{\text{阴离子}}$, $\sum_{\text{阳离子}} = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Na}^{+}] + [\text{K}^{+}] + [\text{NH}_4^{+}]$, $\sum_{\text{阴离子}} = [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^{-}] + [\text{Cl}^{-}] + \text{其它弱酸离子}$, 即溶液中阳离子电荷总和与阴离子电荷总和的平衡。本研究中阳离子平均浓度为 7.56 mg/L,不计弱酸根离子的情况下阴离子平均浓度为 2.15 mg/L,梯度淋洗法检测发现有机酸含量很低,基本可以忽略,所以可以肯定主要是 HCO₃⁻ 与过剩阳离子平衡,采用酚酞和甲基橙双指示剂中和滴定法(国家行业标准 LY/T1275)测定,亦发现存在有大量 HCO₃⁻。目前没有直接方法能够测量 HCO₃⁻,根据离子平衡原理估计其平均浓度可能在 5.41 mg/L 左右,与 Ca²⁺ 浓度属一个量级。

表 1 丽江盆地不同水体 7 种主要离子平均浓度

mg/L

样点	类型	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
文海	冰蚀湖	0.03	0.01	0.16	0.17	0.08	0.37	0.84
文海入口	融水径流	0.06	0.01	0.07	0.55	0.09	1.27	2.18
文笔水库	湖	0.22	0.21	0.60	0.45	0.15	1.73	1.63
木家桥	径流	0.90	0.53	1.03	0.85	0.24	1.17	2.38
拉市海	地下水	0.29	0.01	1.32	0.44	0.12	2.85	2.39
玉峰寺	地下水	0.16	0.00	6.02	3.40	0.37	3.87	6.04
黑龙潭	地下水	0.63	0.88	1.89	2.35	0.45	5.79	10.72

注:数据由庞洪喜提供。

3 结果与讨论

3.1 水体中离子浓度的主要控制因素分析

从表 2—3 可以看出,第一主成分与 K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, SO₄²⁻ 存在较强的正相关关系,其相关系数分别为 0.991, 0.951, 0.913, 0.881 和 0.671, 占累计方差贡献率的 66.295%。这 5 种离子都与水体所在区域的岩石岩性密切相关,代表岩石源。第二主成分与 Cl⁻ 和 NO₃⁻ 存在较强的正相关关系,其相关系数分别为 0.745 和 0.726, 占累计方差贡献率的 24.416%。这两种离子与人类活动的关系较为密切,可以看做是人类活动源。SO₄²⁻ 与第一主成分正相关,但是相关性不强,而与第二主成分为负相关,说明硫酸根离子的来源较复杂。

表 2 离子浓度的主要控制因素提取

成份	特征值			提取平方和载入		
	合计	方差%	累积%	合计	方差%	累积%
1	4.641	66.295	66.295	4.641	66.295	66.295
2	1.709	24.416	90.710	1.709	24.416	90.710
3	0.502	7.176	97.887			
4	0.124	1.777	99.664			
5	0.021	0.295	99.959			
6	0.003	0.041	100			
7	5.697E-17	8.139E-16	100			

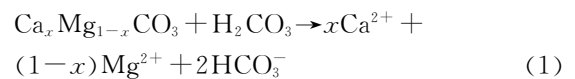
3.2 水—岩离子交换机理

水体物质来源对水体中离子化学组成有着决定性的作用,地表水和地下水中的物质来源主要有 3 种,分别为矿物的溶解,大气沉降物输入和污染物输入。不同的化学反应过程对水体中离子化学组成的变化产生着深刻影响,影响水化学组成变化的化学反应涉及矿物的溶解平衡,氧化还原和生物作用等^[11-12]。对水体阴、阳离子的来源,传输机制及其在水体中的次生变化机制等问题的研究,不但能反演出当地的气候与环境特征,而且能提供地理圈层之间相互作用的证据,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^[13]。

表 3 主成分载荷

项目	主成份	
	主成分 1	主成分 2
Cl ⁻	0.496	0.745
NO ₃ ⁻	0.669	0.726
SO ₄ ²⁻	0.671	-0.656
Na ⁺	0.881	-0.434
K ⁺	0.991	0.009
Mg ²⁺	0.913	-0.084
Ca ²⁺	0.951	0.037

相关性分析显示(表 4), Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 相关性最强,说明 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 有很强的同源性。丽江盆地的基岩构造以碳酸盐岩为主,造岩矿物主要为方解石 [CaCO₃] 和白云石 [Ca(CO₃)₂], 膏岩层和碎屑沉积岩分布也较为广阔。这两种矿物的溶解是盆地内各水体 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 的主要来源,其反应原理为。



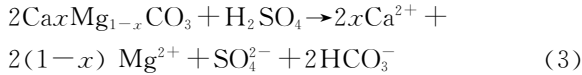
SO₄²⁻ 与 K⁺, Na⁺ 呈正相关关系主要是由于该地区的水体中 K⁺ 和 Na⁺ 离子主要来源有 5 个, (1) 水体对氯化物盐类或钠、钾的铝硅酸盐矿物(如长石、云母等)的溶滤作用^[11]; (2) 硅酸盐矿物的溶解^[11]; (3) 水的蒸发或与黏土矿物进行离子交换^[14]; (4) 人为输入; (5) 海盐输入。海盐示踪法显示着两种离子的海气来源均不到 35%。所以其主要来源应该为水体与岩体的物质交换。SO₄²⁻ 的化合物硫酸参与矿物溶解,其强氧化作用一定程度上加速了其它离子的溶解。



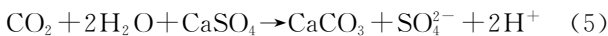
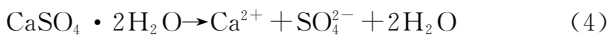
相关性分析显示,各水体中 Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻ 存在较好的相关性,这与 SO₄²⁻ 化合产生的硫酸对碳酸盐矿物和硫酸盐矿物的溶解的影响有关^[15-17], 如反应式(2)—(3)。实验数据显示盆地内水体含有较多 SO₄²⁻ 离子, SO₄²⁻ 离子浓度从低到高依次为:融水径流 < 冰蚀湖湖水 < 湖水 < 径流 < 地下水(表 1)。当硫酸参与碳酸盐矿物的溶解时,水化学的组成则可能 Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻, HCO₃⁻ 型(反应式(3))。

表 4 不同水体中可溶性常量离子相关性矩阵

项目	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
Cl ⁻	1.000						
NO ₃ ⁻	0.821	1.000					
SO ₄ ²⁻	-0.008	-0.056	1.000				
Na ⁺	0.155	0.277	0.910	1.000			
K ⁺	0.510	0.681	0.677	0.888	1.000		
Mg ²⁺	0.289	0.544	0.577	0.769	0.859	1.000	
Ca ²⁺	0.375	0.684	0.511	0.792	0.924	0.945	1.000



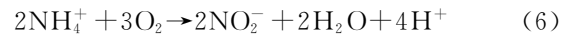
较好的相关性同时说明 Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻ 这 3 种离子有很好的同源性,这可能是由于白云石和方解石的化学组成决定的,说明硫酸盐的蒸发盐矿物,如石膏、硬石膏的溶解对地表和地下水中离子浓度贡献较大。石膏的溶解产生大量的 Ca²⁺ 和 SO₄²⁻ 离子,因此 Ca²⁺, Mg²⁺ 和 SO₄²⁻ 离子的相关性都很好,这可能是由于石膏、硬石膏溶解过程中同离子效应作用的结果(反应式(4)),使得 Mg²⁺ 随着 SO₄²⁻ 含量的增加而增加^[11,18],主成分分析显示 SO₄²⁻ 与第一主成分正相关,但是相关性不强,而与第二主成分表现为负相关关系,说明 SO₄²⁻ 离子的来源比较复杂,部分 SO₄²⁻ 可能来源于近域人类活动和长距离水汽输送^[12]。SO₄²⁻ 参与白云石的溶解造成 Mg²⁺ 和 SO₄²⁻ 正相关的原因之一。Marfia 等^[19] 提出在溶解 CO₂ 存在情况下,石膏溶解过程中导致白云岩溶解的不一致,由于在水中 CaSO₄ 的溶解度大约是 CaCO₃ 的溶解度的 299 倍^[19],因此反应式(5)得以进行下去。岩溶地下水从石膏岩层中将 SO₄²⁻ 优先溶解出来,然后很快再与碳酸盐矿物反应,而使硫酸盐离子与 Ca²⁺, Mg²⁺ 同时增加。



相关性分析显示 NO₃⁻ 离子主要来源于人为活动输入,其相关系数为 0.726。农肥,大气输入,工业“三废”,人畜的排泄物和大面积的生物燃烧可能是 NO₃⁻ 的主要来源。另外,NO₃⁻ 还可能经有机氮和 NH₄⁺ 的硝化作用转化而来^[13,20-21](反应式(6))。与人口稀少的农业区相比,人类活动较频繁的丽江市多数地下水和地表水样品中 NO₃⁻ 离子含量较高。说明夏季地表水和地下水因使用农肥及工业和生活废水排放量的增加而受到不同程度污染。

地下水系统中氮以多种形式存在,以 NO₃⁻ 离子存在形式居多,其次为 NH₄⁺ 和 NO₂⁻ 离子,在一定条件下各离子间可相互转化。除上述人为活动输入外,

地下水 NO₃⁻ 还可能经有机氮和 NH₄⁺ 离子的硝化作用转化而来。硝化作用可用反应式(6)~(7)表示。农肥中最常用的尿素[NH₂CONH₂]也可以在细菌的作用下发生一系列复杂的化学反应,最终生成硝酸盐^[22-23]。丰水期地下水中的 NO₃⁻ 和 Ca²⁺ 具有一定正相关,可能性之一是反应式(6)中生成的 H⁺ 对含水层中的碳酸盐岩作用可释放出 Ca²⁺。



相关性分析显示 Cl⁻, NO₃⁻ 具有较好的相关关系,说明 Cl⁻ 和 NO₃⁻ 有近似的来源。大气输入和局部人类活动的贡献可能较大,Cl⁻ 主要源于海气、土壤粉尘和人类活动。NO₃⁻ 的来源主要有海盐、闪电、平流层交换和人类污染等。此外,Na⁺, K⁺ 分别与 NO₃⁻, Cl⁻ 呈正相关关系,说明这些离子可能有近似的来源。

4 结论

(1) 丽江盆地水体中的阳离子主要以 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 为主,其中 Ca²⁺ 占整个阳离子的 49.45%,是最大优势阳离子。阴离子中 SO₄²⁻ 是优势阴离子,占阴离子总量的 73.79%。离子浓度由大到小依次为:冰蚀湖湖水>融水径流>湖水>地表径流>地下水。

(2) 主成分分析表明第一主成分岩石岩性对丽江盆地的水体离子构成有决定性的影响,7 种可溶性常规离子均与岩石的岩性呈正相关关系;Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ 在第一主成分岩石岩性上载荷较高。第二主成分人类活动对丽江盆地的水体离子构成有较强的影响,其方差贡献率为 24.416%。Cl⁻ 和 NO₃⁻ 浓度在第二主成分人类活动上载荷较高。

(3) 相关性分析表明, Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 相关性高达 0.945,说明 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 有很强的同源性。SO₄²⁻ 与 Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺ 呈正相关关系,这与 SO₄²⁻ 的化合物硫酸参与并加速碳酸盐矿物和硫酸盐矿物的溶解有关,同时说明 SO₄²⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ 和 Na⁺ 有一定的同源性。Cl⁻ 和 NO₃⁻ 具有较好的相关关系

且都与人类活动密切相关,说明 Cl^- 和 NO_3^- 有近似的来源且大部分来源于人类活动。

(4) 应予以说明的是,影响水体化学离子构成的因素很多,本研究仅就水—岩物质迁移和人类活动离子输入做了分析,未考虑到海气影响以及水—汽物质运移等因素。

[参 考 文 献]

- [1] 张明阳,王克林,刘会玉,等. 喀斯特生态脆弱区桂西北土地变化特征[J]. 生态学报,2009,29(6):3105-3116.
- [2] 李思亮. 喀斯特城市地下水 C,N 同位素地球化学:污染物迁移和转化研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2005:1-26.
- [3] 韩至钧,金占省. 贵州省水文地质志[M]. 北京:地震出版社,1996:1-508.
- [4] 张明阳,王克林,刘会玉,等. 基于 RS 和 GIS 的喀斯特区域水土流失动态监测与分析:以广西环江县为例[J]. 资源科学,2007,29(3):124-131.
- [5] 杨明德. 论喀斯特环境的脆弱性[J]. 云南地理环境研究,1990,2(1):21-29.
- [6] 王宇. 滇东地区断陷岩溶盆地裸露—覆盖型岩溶水系统特征剖析:以吴家营岩溶水系统为例[J]. 云南地质,1993,12(3):301-315.
- [7] 袁道先,蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆:重庆出版社,1988.
- [8] 韩贵琳,刘丛强. 贵州喀斯特地区河流的研究:碳酸盐岩溶解控制的水文地球化学特征[J]. 地球科学进展,2005,20(4):394-406.
- [9] 朱国锋,何元庆,蒲焘,等. 夏季玉龙雪山及丽江盆地水体主要无机离子特征[J]. 地球科学进展,2011,30(7):868-874.
- [10] 陈美贞. 丽江市城市水资源及地下水脆弱性研究[D]. 云南昆明:昆明理工大学,2006:7-30.
- [11] 郎斌超,刘丛强,赵志琦,等. 贵阳市地表水地下水化学组成:喀斯特水文系统水—岩反应及污染特征[J]. 水科学进展,2005,16(6):826-832.
- [12] Stallard R F, Edmond J M. Geochemistry of the Amazon: Precipitation chemistry and the marine contribution to the dissolved load at the time of peak discharge[J]. Journal of Geophysical Research, 1981, 86:9844-9858.
- [13] Jeong C H. Effect of land use and urbanization on hydrochemistry and contamination of groundwater from Taejon area, Korea[J]. Journal of Hydrology, 2001, 253:194-210.
- [14] Adrian O G. Origin and geochemical evolution of groundwater in a closed-basin clayey aquitard, Northern Mexico[J]. Journal of Hydrology, 2003, 284: 26-44.
- [15] Macpherson G L. Hydrogeology of thin limestones: The Konza Prairie long-term ecological research site, Northeastern Kansas[J]. Journal of Hydrology, 1996, 186(4):191-228.
- [16] Montoroi J P, Grünberger O, Nasri S. Groundwater geochemistry of a small reservoir catchment in Central Tunisia[J]. Applied Geochemistry, 2002, 17: 1047-1060.
- [17] Han G L, Liu C Q. Water geochemistry controlled by carbonate dissolution: A study of the river waters draining karst-dominated terrain, Guizhou Province, China[J]. Chemical Geology, 2004, 204:1-21.
- [18] Hanshaw B B, Back W. Major geochemical processes in the evolution of carbonate-aquifer systems[J]. Journal of hydrology, 1979, 43:287-312.
- [19] Marfia A M, Krishnamurthy R V, Atekwana E A, et al. Isotopic and geochemical evolution of ground and surface waters in a karst dominated geological setting: A case study from Belize, Central America[J]. Applied Geochemistry, 2004, 19(6):937-946.
- [20] Savoie D L, Prospero J M. Comparison of oceanic and continental sources of non-sea-salt sulfate over the Pacific Ocean[J]. Nature, 1989, 339:685-687.
- [21] Xiao H Y, Liu C Q. Sources of nitrogen and sulfur in wet deposition at Guiyang, southwest China[J]. Atmospheric Environment, 2002, 36:5121-5130.
- [22] Agrawal G D, Lunkad S K, Malkhed T. Diffuse agricultural nitrate pollution of groundwaters in India[J]. Water Science and Technology, 1999, 39(3):67-75.
- [23] Tandia A A, Diop E S, Gaye C B. Pollution par les nitrates des nappes phréatiques sous environnement semi-urbain non assaini; Exemple de la nappe de Yeumbeul, Sénégal[J]. Journal of African Earth Sciences, 1999, 29(4):809-822.