

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究	孙建林, 常文静, 陈正侠, 曾辉 (1513)
北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究	崔彤, 程婧晨, 何万清, 任培芳, 聂磊, 徐东耀, 潘涛 (1523)
2006~2010 年珠三角地区 SO ₂ 特征分析	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邓涛, 徐婉筠, 冉靛, 赵春生 (1530)
环境空气 PM _{2.5} 连续监测系统手工采样比对测试	王强, 钟琪, 迟颖, 张杨, 杨凯 (1538)
燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放	裴冰 (1544)
南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应	方峰, 王磊, 席雪飞, 胡佳俊, 付小花, 陆兵, 徐殿胜 (1550)
基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算	冯驰, 金琦, 王艳楠, 赵丽娜, 吕恒, 李云梅 (1557)
贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析	吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 罗进, 蒋浩 (1565)
东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析	高磊, 陈建耀, 王江, 柯志庭, 朱爱萍, 许凯 (1573)
河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究	刘肖, 杨琰, 彭涛, 赵景耀, 任小凤, 张银环, 聂旭东, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (1582)
石漠化治理对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定同位素的影响	肖时珍, 熊康宁, 蓝家程, 张晖, 杨龙 (1590)
旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异	赵瑞一, 梁作兵, 王尊波, 于正良, 江泽利 (1598)
有机氯农药在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移特征及对地下水的影响	孙玉川, 王永启, 梁作兵, 袁道先 (1605)
山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究	曹霏霏, 杨丽原, 庞绪贵, 王炳华, 王云倩 (1615)
摇蚊幼虫扰动下沉沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应	史晓丹, 李勇, 李大鹏, 王忍, 邓猛, 黄勇 (1622)
南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响	郝卓, 高扬, 张进忠, 徐亚娟, 于贵瑞 (1630)
不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响	黄雪娇, 刘晓晨, 李振轮, 石纹豪, 杨珊 (1639)
荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响	汪小雄, 姜成春, 李锦卫, 汪晓军 (1648)
黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用	陈亚楠, 袁玲 (1655)
饮用水中消毒副产物 1,1-二氯丙酮的形成机制	丁春生, 孟壮, 徐洋洋, 缪佳 (1662)
水中利谷隆氯化降解动力学和消毒副产物生成特性	凌晓, 胡晨燕, 程明, 谷建 (1668)
化学消毒的中和剂对水中内毒素活性检测的影响	张灿, 刘文君, 史云, 安代志, 白森, 徐稳 (1674)
牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性	马锋锋, 赵保卫, 刁静茹, 钟金魁, 李安邦 (1678)
丁二酸改性茶油树木屑吸附铅的研究	张晓峰, 陈迪云, 彭燕, 刘永胜, 熊雪莹 (1686)
SPG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响	张静, 肖太民, 张晶, 曹丽亚, 杜亚威, 刘春, 张磊 (1694)
TiO ₂ 诱导下左旋氧氟沙星的可见光降解及其机制	郭宏生, 刘亚楠, 乔琪, 魏红, 董呈幸, 薛洁, 李克斌 (1700)
新型高分子絮凝剂对废水中 Cr(VI) 的捕集性能	王刚, 杜凤龄, 常青, 徐敏 (1707)
基于 OUR-HPR 测量在线估计活性污泥合成 PHA 量	曾善文, 王泽宇, 高敬, 刘东, 张代钧, 卢培利 (1713)
分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制	黄帅, 刘宏波, 殷波, 马惠君, 符波, 刘和, 白洁 (1720)
通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响	张喻, 韩融, 陆文静, 王洪涛, 明中远, 王强, 夏伟 (1727)
生物可降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究	吴青, 崔延瑞, 汤晓晓, 杨慧娟, 孙剑辉 (1733)
百乐克 (BIOLAK) 活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析	田美, 刘汉湖, 申欣, 赵方庆, 陈帅, 姚永佳 (1739)
异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性	梁贤, 任勇翔, 杨垒, 赵思琪, 夏志红 (1749)
菌株 <i>Arthrobacter</i> sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学	任磊, 史延华, 贾阳, 姚雪松, Ruth Nahurira, 弥春霞, 闫艳春 (1757)
短短芽孢杆菌及其芽孢对苣的降解	刘芷辰, 叶锦韶, 彭辉, 刘则华, 邓庭进, 尹华, 廖丽萍 (1763)
垃圾填埋场抗生素抗性基因初探	李蕾, 徐晶, 赵由才, 宋立岩 (1769)
不同构型人工湿地基质中土著菌的耐药性及整合子丰度调查	麦晓蓓, 陶然, 杨扬, 张敏, 林剑华, 满滢 (1776)
硝酸盐和甲烷对覆土中苯系物厌氧氧化的影响	柳蓉, 龙焰, 王立立, 何婷, 叶锦韶 (1785)
山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 李洪建, 李君剑, 武江星 (1793)
施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响	姜继韶, 郭胜利, 王蕊, 刘庆芳, 王志齐, 张彦军, 李娜娜, 李如剑, 吴得峰, 孙棋棋 (1802)
宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估	张文超, 吕森林, 刘丁戎, 刘品威, 米持真一, 王效举, 王青耀 (1810)
宝鸡市街道尘埃磁学特征空间分布及环境意义	张俊辉, 王瑾, 张健, 房妮, 夏敦胜 (1818)
长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征	毛霞丽, 陆扣萍, 孙涛, 张小凯, 何丽芝, 王海龙 (1827)
矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响	李君剑, 刘峰, 周小梅 (1836)
三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究	肖烨, 黄志刚, 武海涛, 吕宪国 (1842)
钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应	黄昭露, 陈泉源, 周娟, 谢墨函 (1849)
石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应	杨茜, 吴蔓莉, 聂麦茜, 王婷婷, 张明辉 (1856)
可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究	卫泽斌, 陈晓红, 吴启堂, 谭蒙 (1864)
绿洲土 Pb-Zn 复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性	金诚, 赵转军, 南忠仁, 王胜利, 武文飞, 王厚成 (1870)
硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收的影响	王丹, 李鑫, 王代长, 饶伟, 杜光辉, 杨军, 化党领 (1877)
臭氧对几种楠木气体交换参数的影响	李苗苗 (1888)
某货车侧翻水污染事件的环境损害评估方法探索	蔡锋, 赵士波, 陈刚才, 鲜思淑, 杨清玲, 周贤杰, 余海 (1902)
《环境科学》征订启事 (1543) 《环境科学》征稿简则 (1756) 信息 (1667, 1726, 1809, 1848)	

贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析

吕婕梅¹, 安艳玲^{1*}, 吴起鑫^{1,2}, 罗进³, 蒋浩³

(1. 贵州大学喀斯特环境与地质灾害防治教育部重点实验室, 贵阳 550003; 2. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 3. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 对清水江流域丰水期河水离子浓度及组成特征分析表明, 流域水化学组成以 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 离子为主, 其次为 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} ; TDS 均值 $213.96 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 高于世界流域均值。根据海盐校正分析得出, 研究区大气降水中海盐输入对流域水化学的贡献率为 2.23%, 低于世界河流均值 3%。Gibbs 图结合离子比值分析表明, 流域水化学主要受碳酸盐岩风化影响, 越往下游硅酸盐岩化学风化贡献越明显, 碳酸和硫酸同时参与了流域岩石风化过程。离子来源分析表明, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 离子主要来自于白云石、方解石等碳酸盐岩风化溶解, Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 主要来源于硅酸盐岩风化; SO_4^{2-} 和 NO_3^- 主要来源于大气酸沉降和城镇废水输入。人为活动影响分析表明上游工矿企业活动对清水江流域水化学影响明显。

关键词: 水化学; 化学风化; 离子来源; 影响因素; 清水江流域

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1565-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2015.05.008

Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province

LÜ Jie-mei¹, AN Yan-ling^{1*}, WU Qi-xin^{1,2}, LUO Jin³, JIANG Hao³

(1. Key Laboratory of Karst Environment and Geohazard Prevention, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550003, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 3. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: According to the ion content and chemical characteristic analysis of Qingshuijiang River water during wet season, the result shows that the chemical composition of the river water is dominated by Ca^{2+} , HCO_3^- ; Mg^{2+} , and SO_4^{2-} . The TDS concentration ($213.96 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) is significantly higher than the average value of rivers worldwide. Seawater correction approach (Cl^- normalized seawater ratios) was applied to estimate the contribution proportions of local precipitation to the solutes, and it is found that the contribution ratio of precipitation (2.23%) is lower than the average value (3%) of global catchments. Furthermore, Gibbs graph combining major ion element ratio analysis indicates that the catchment hydrochemistry is mainly originated from carbonate rock weathering, which becomes increasingly distinct as the river goes downstream. Both carbonic acid and sulfuric acid play crucial roles in the chemical weathering. Ion source analysis demonstrates that Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- are mainly derived from chemical weathering of carbonate mineral (Dolomite and Calcite); Na^+ , K^+ and Cl^- are primarily contributed by silicate mineral weathering; SO_4^{2-} and NO_3^- stemmed are mainly from acid atmospheric deposition and from urban sewage input. Anthropogenic analysis suggests that the chemical composition of Qingshuijiang River is greatly impacted by the upriver industrial and mining enterprises activities.

Key words: water chemistry; chemical weathering; ion sources; impact factors; Qingshuijiang River

流域水体的水化学对其所流经地区的环境具有指示意义, 如反映流域岩石风化、土地利用变化、大气沉降输入、人为活动等的影响^[1,2]。从 20 世纪以来, 学者开始对世界各大洲主要河流水化学进行研究, 并探讨流域水化学的主要控制机制^[3]。我国河流水化学的研究始于 20 世纪 60 年代, 如乐嘉祥等^[4]利用 1957~1960 年间近 500 条河流 900 多个站点约 4 000 次的水化学资料, 总结了我国各地区的河流水化学特征、空间变化规律。陈静生等^[5]对 1958~1990 年间的长江水系 191 个站点的水质资料进行分析, 提出长江流域主要离子化学成分受碳酸盐矿物的风化控制; 流域的水质酸化趋势主要受燃煤导致的酸沉降和农田化肥的流失影响^[6]。西南

喀斯特河流大量研究表明河水溶质主要受碳酸盐岩溶解控制^[7,8], 硫循环中形成的硫酸广泛参与了流域碳酸盐矿物的溶解^[9,10]。

清水江流域属于长江流域洞庭水系沅江上游河段, 是长江流域上游重要支流之一, 是贵州省第二大河流。随着西部大开发的发展和城镇化建设的推进, 清水江流域水质和水化学发生明显改变。

收稿日期: 2014-08-22; 修订日期: 2014-12-25

基金项目: 贵州省科技厅社发攻关项目(黔科合 SY 字[2013]3133); 国家自然科学基金项目(41325010); 贵州省科技厅项目(黔科合 Z 字[2012]4012); 贵州省自然科学基金项目(黔科合 J 字[2013]2130 号); 贵州大学博士基金项目(Z045015)

作者简介: 吕婕梅(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为流域水环境变化, E-mail: lvjm0728@163.com

* 通讯联系人, E-mail: re.ylan@gzu.edu.cn

目前,对清水江流域水体的研究仅限于部分河段的水质分析^[11],而关于工业企业、农业发展和城镇化对流域整体水化学的影响却鲜见研究.本研究通过对清水江流域河水主量元素分析,辨识河水溶质的主要来源,探讨地质岩性、人为活动对流域水化学的影响,以为清水江流域保护提供科学参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

清水江位于贵州省东南部,地处东经 107°16'57"~109°35'24",北纬 25°19'20"~27°31'40"之间,发源于黔南布依族苗族自治州,地跨扬子准地台与华南褶皱带两个大地一级构造单元.流域内出露地层从元古代的四堡群、下江群,震旦系至古生代的寒武系、奥陶、志留、泥盆、石炭、二叠系,到中生代的三叠、侏罗、白垩系及新生代的第三系、第四系均有出露.流域上游地区为岩溶地貌区,主要分布碳酸盐岩,中下游为贵州省岩溶地貌面积最少的非岩溶区,局部有石灰岩分布,大部分老地层多硅化,主要由碎屑岩组成.流域岩性见图 1.

清水江流域全长 452.20 km,流域面积 17 157 km²,占贵州省总面积的 9.74%,天然落差 1 274.70 m;属亚热带季风湿润气候区,气候温暖湿润,年平均气温 14~18℃,多年平均降雨量为 1 050~1 500 mm.其主要支流有重安江、巴拉河、

六洞河、南哨河、亮江、鉴江河.河源至重安江汇口为上游,重安江至锦屏六洞河汇口为中游,锦屏以下至贵州-湖南省界为下游.流域上游都匀、福泉、凯里地区矿产资源丰富、工业发达、尤其是重安江上游福泉地区已经建成中国大型的磷矿和磷化工基地;中游是主要的林业区,也是优质杉木的主要生产地;下游为主要的农业区,种植粮食作物以水稻、玉米为主.

1.2 样品的采集与分析

本次采样时间为丰水期(2013 年 8 月),共采集样品 44 个(图 1),其中干流样品 23 个,支流样品 21 个.采集的河水样品当天过滤(0.45 μm Millipore 滤膜),过滤后的样品装入洗干净的聚乙烯瓶中;水体 pH、电导(EC)、溶解氧(DO)、水温(*t*)采用便携式多参数测试仪(德国 WTW)现场测定, HCO₃⁻ 用 0.025 mol·L⁻¹ HCl 现场滴定,误差在 ±5% 以内.用于阳离子(Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺)分析的水样加入超纯盐酸酸化至 pH<2,避光密封保存,用于阴离子(F⁻、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻)分析的样品直接密封避光保存. Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、NO₃⁻、F⁻、SO₄²⁻ 用离子色谱仪(DIONEX, ICS-1100, IonPac AG-19 阴离子柱, IonPac CS-12A 阳离子柱)分析测定,测试精度好于 ±5%, SiO₂ 采用钼酸黄分光光度法测定,总磷(TP)采用钼锑抗光度法测定.

2 结果与分析

清水江流域水化学参数及主量元素浓度统计分

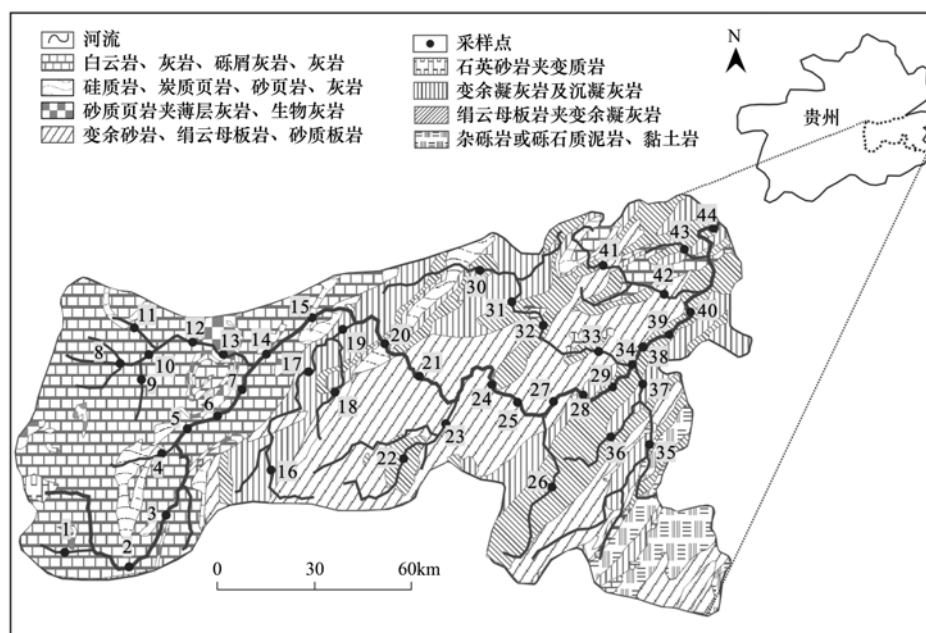


图 1 研究区采样点分布示意

Fig. 1 Sampling sites of the Qingshuijiang River basin

析结果(表1)显示,流域丰水期河水温度均值 25.90℃,pH 值介于 5.96~9.90 之间,平均值为 8.00,中性偏弱碱性,部分地方偏弱酸性.流域水体 TDS 介于 44.30~432.88 mg·L⁻¹之间,样品差异性较大,平均值 213.96 mg·L⁻¹,上游流域 TDS 值较高,中下游流域相对较低.河水中阳离子浓度依次为 Ca²⁺ > Mg²⁺ > Na⁺ > K⁺,阴离子浓度变化为 HCO₃⁻ > SO₄²⁻ > Cl⁻ > NO₃⁻ > F⁻; Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 平均浓度为

0.77 mmol·L⁻¹和 0.46 mmol·L⁻¹,分别占阳离子总量的 58% 和 30%,HCO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 平均浓度 1.97 mmol·L⁻¹和 0.35 mmol·L⁻¹,分别占阴离子总量的 70% 和 22%.阳离子总浓度(TZ⁺ = 2Ca²⁺ + 2Mg²⁺ + Na⁺ + K⁺)与阴离子总浓度(TZ⁻ = HCO₃⁻ + 2SO₄²⁻ + NO₃⁻ + Cl⁻ + F⁻)平衡较好(*r* > 0.99).河流水体的无机电荷平衡 NICB[$NICB = (TZ^+ - TZ^-)/TZ^+$]均值为 -4.48%,水体阴阳离子电荷基本平衡.

表 1 清水江流域丰水期水化学数据

Table 1 Hydrochemical indicators of waters from the Qingshuijiang River basin in wet season				
项目	单位	范围	均值	中值
<i>t</i>	℃	21.7~30.60	25.90	25.75
pH	—	5.96~9.90	8.00	8.00
TDS	mg·L ⁻¹	44.30~432.88	213.96	165.74
SiO ₂	mg·L ⁻¹	1.86~14.46	7.73	7.46
TP	mmol·L ⁻¹	0.00~0.33	0.03	0.00
Ca ²⁺	mmol·L ⁻¹	0.09~1.62	0.77	0.60
Mg ²⁺	mmol·L ⁻¹	0.04~1.12	0.46	0.26
Na ⁺	mmol·L ⁻¹	0.04~0.36	0.18	0.18
K ⁺	mmol·L ⁻¹	0.02~0.09	0.04	0.04
HCO ₃ ⁻	mmol·L ⁻¹	0.37~4.61	1.97	1.50
SO ₄ ²⁻	mmol·L ⁻¹	0.04~1.05	0.35	0.24
Cl ⁻	mmol·L ⁻¹	0.03~0.18	0.10	0.10
NO ₃ ⁻	mmol·L ⁻¹	0.00~0.54	0.09	0.03
F ⁻	mmol·L ⁻¹	0.00~0.08	0.01	0.01

3 讨论

3.1 大气降水海洋输入对水化学组成的影响

清水江流域属山区雨源型河流,主要靠地表径流补给,采样时期为流域雨水集中的夏季,因此有必要估算流域大气降水远距离输送海盐物质对河水溶质的贡献.通过海盐校正的方法,根据流域大气降水中 Cl⁻ 浓度及流域蒸发量和降水量估算大气降水对流域水化学的最大贡献^[12],降水中其它离子用标准海水离子的浓度比(Na⁺/Cl⁻ = 0.86, Mg²⁺/Cl⁻ = 0.21, K⁺/Cl⁻ = 0.004, Ca²⁺/Cl⁻ = 0.04, SO₄²⁻/Cl⁻ = 0.11)进行计算^[13].清水江流域黔南地区多年平均降雨量为 1 220.50 mm,多年平均蒸发量为 629.40 mm^[14].由于缺乏研究区大气降水中 Cl⁻ 浓度数据,选用大气环境条件与研究区接近的贵阳市大气降水数据作为参考(Cl⁻ 浓度为 0.02 mmol·L⁻¹^[15]);估算结果表明,流域大气降水对流域溶质的贡献约为 2.23%,低于世界河流均值(3%)^[16].前人的研究显示,远离海洋的河流其化学组成基本不受海洋输入的影响^[17],研究区远离海边,河水的 Cl⁻/Na⁺ 比值平均值为 0.59,远低于世

界平均海水比值(Cl⁻/Na⁺ = 1.15^[18]).可见,雨水海洋输入对研究区河水溶质的贡献很小.

3.2 流域岩石风化及其对水化学的影响

Gibbs^[3]对世界大多数河流水化学控制机制进行研究,将影响河流水化学组成的因素分为大气降水、岩石风化以及蒸发-结晶三类,利用 TDS 与 Na⁺/(Na⁺ + Ca²⁺)、Cl⁻/(Cl⁻ + HCO₃⁻)的关系图可以判断河水主离子的主要控制类型.如图 2 所示,在清水江流域河水 Gibbs 图中,流域所有样品基本都落在 Gibbs 图虚线框岩石风化控制区域,显示流域水化学组成主要受岩石风化作用控制.

阴阳离子三角图可以直观反映水体化学组成特征,辨别其控制端元^[19].在清水江流域阴阳离子三角图中(图 3),阳离子主要分布在 Ca²⁺-Mg²⁺ 线靠近 Ca²⁺ 端元,与我国的长江^[5]、乌江流域^[8]相似;阴离子主要靠近 HCO₃⁻ 端,与乌江流域^[8]相似.与黄河流域^[20]相比,流域明显富含 Ca²⁺、HCO₃⁻,而 Na⁺、K⁺、Cl⁻ 的浓度较低.

不同岩性端元间的对比可以判别流域不同岩石风化对河水溶质的影响^[12],从图 4 清水江流域岩性端元比值图可以看出,流域上游的样品点主要落在

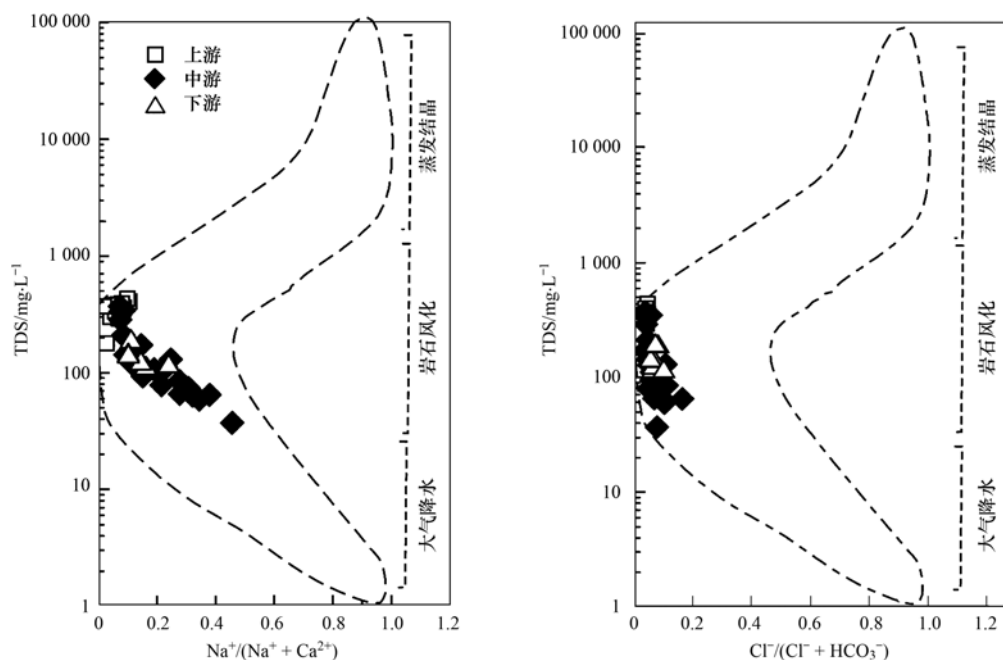


图2 清水江流域丰水期河水 Gibbs 图

Fig. 2 Gibbs plots of waters from the Qingshuijiang River basin in wet season

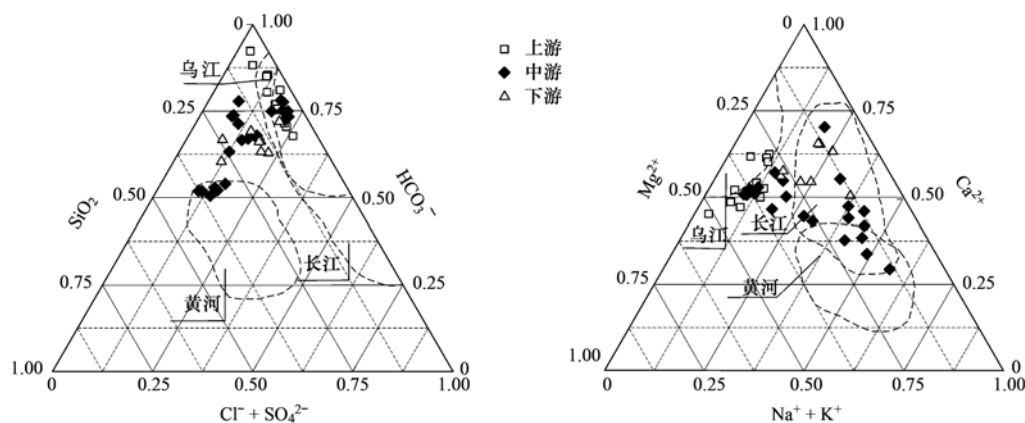
图3 清水江流域丰水期河水阴阳离子三角图^[5, 8, 20]

Fig. 3 Triangle diagrams showing cation and anion compositions in waters from Qingshuijiang River basin in wet season

碳酸盐岩风化区域,中下游流域的样品相对更靠近硅酸盐类岩石风化区域,表明上游流域主要受碳酸盐岩风化影响,中下游流域硅酸盐类岩石风化影响比较大,这与清水江流域岩性分布特征基本吻合。

$2(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$ 浓度比值可用于判别流域不同岩石风化相对强度,比值越大,说明碳酸盐岩相对风化强度越高^[21]。清水江流域干流河水中 $2(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$ 浓度比值介于 2.82 ~ 27.47 之间,全流域平均值 14.04,与以碳酸盐岩风化为主的普莫雍错入湖河流比值相近(2 ~ 25)^[22],远高于受蒸发岩影响的塔克拉玛干沙漠河流比值(0.89)^[21],也高于世界河流均值(2.2)^[23]。

较高的 $2(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$ 比值表明该地区主要受碳酸盐岩风化影响。干流 $2(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$ 浓度比值从上游至下游逐渐降低(图5), SiO_2 的质量浓度从上游至下游逐渐升高,显示从上游至下游,碳酸盐岩风化对干流水化学的影响逐渐减弱,而硅酸盐岩风化影响逐渐增强。

前人的研究显示,主要受方解石、白云石等碳酸盐岩风化控制的地区 $2(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 浓度比值应在 1:1 左右^[24]。如图6所示,清水江流域上游和部分中游地区 $2(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 浓度比值部分数据点分布在 1:1 等值线的下方,部分中游和所有下游地区点基本分布在 1:1 等值线左右,

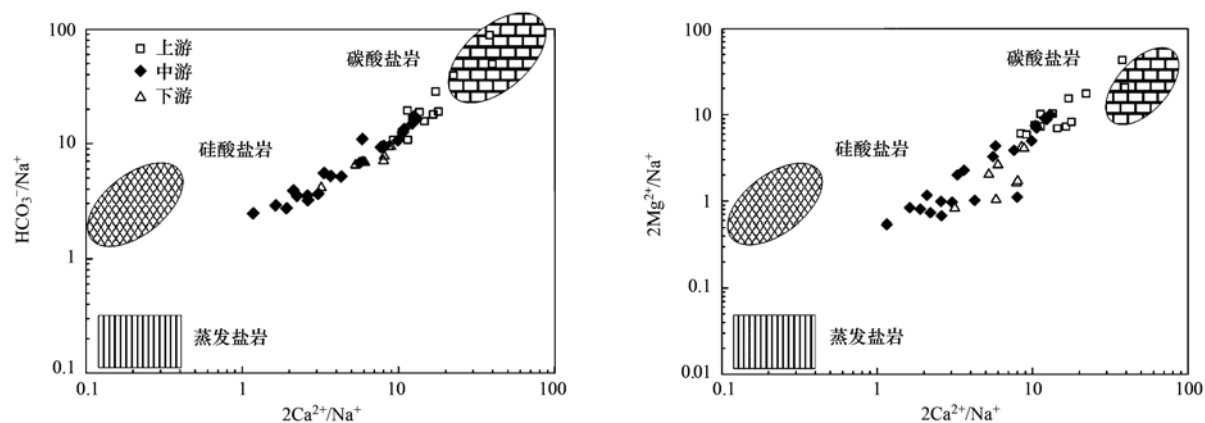


图4 清水江流域河水 $2\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^{+}$ 和 $\text{HCO}_3^{-}/\text{Na}^{+}$ 与 $2\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$ 浓度比值

Fig. 4 Plots of $\text{HCO}_3^{-}/\text{Na}^{+}$ and $2\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^{+}$ vs. $2\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$ of waters from Qingshuijiang River basin

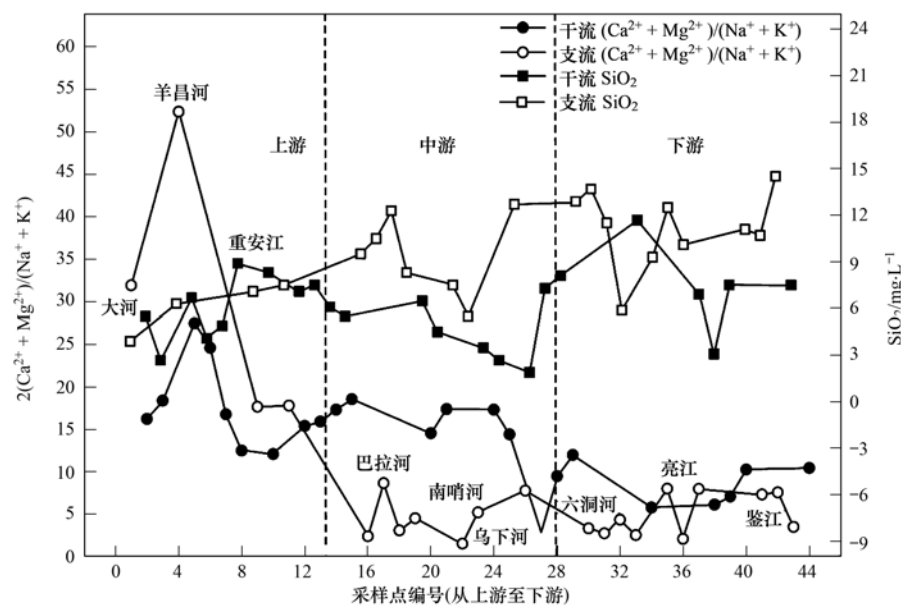


图5 清水江流域河水 $2(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$ 趋势

Fig. 5 Spatial distribution of $2(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$ of waters from Qingshuijiang River basin

表明流域中上游地区部分点 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子相对 HCO_3^{-} 有富余,碳酸盐岩风化还有其他酸的参与.在 $2(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 与 $(\text{HCO}_3^{-} + 2\text{SO}_4^{2-})$ 比值图上(图6),样品点均均分布 1:1 等值线附近(图6),说明硫酸和碳酸共同参与的风化基本可以解释流域内所有岩石的风化过程.

H_2CO_3 风化碳酸盐岩, $2(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^{-}$ 的浓度比值为 1, H_2SO_4 风化碳酸盐岩 $2(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^{-}$ 的浓度比值为 2, $2\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^{-}$ 浓度比值为 1^[25, 26]. 如图 7 所示,清水江流域样品点大部分都落在硫酸与碳酸共同风化碳酸盐岩之间.清水江流域内都匀市、凯里市是贵州省主要的“酸雨

控制区”之一, SO_2 是首要大气污染物^[27]. 赵晓韵等^[27]对 2012 年 3 月至 2013 年 2 月间都匀地区大气降水的研究表明,都匀大气降水中 SO_4^{2-} 浓度为 $0.30 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$. 可见,大气沉降的硫酸对清水江流域风化的贡献不可忽略.

3.3 流域主要离子来源

3.3.1 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^{-} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^{-} 来源

相关性较好的离子通常具有相同的来源或经过了相同的化学反应过程^[28],清水江流域丰水期各离子相关性见表 2. Ca^{2+} 与 HCO_3^{-} 、 Ca^{2+} 及 Mg^{2+} 、 Mg^{2+} 与 HCO_3^{-} 分别在 0.01 检测水平下显著相关,反映了流域内碳酸盐岩的溶解;流域河水中(Ca^{2+}

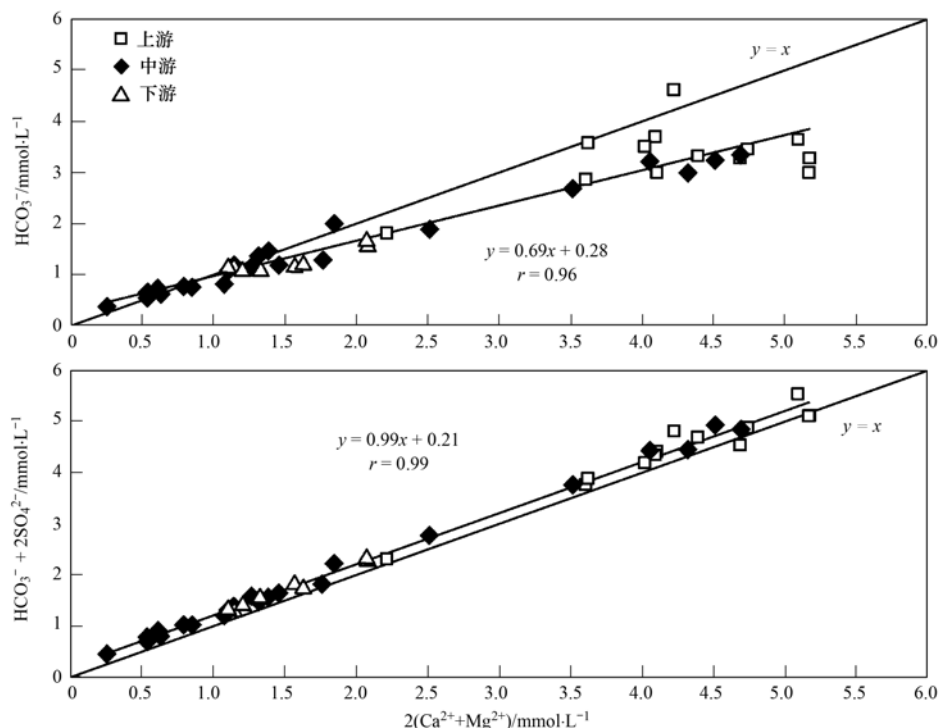


图6 清水江流域河水中 HCO_3^- 和 $(\text{HCO}_3^- + 2\text{SO}_4^{2-})$ 与 $2(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 的浓度关系

Fig. 6 Plots of HCO_3^- and $(\text{HCO}_3^- + 2\text{SO}_4^{2-})$ vs. $2(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ of waters from Qingshuijiang River basin

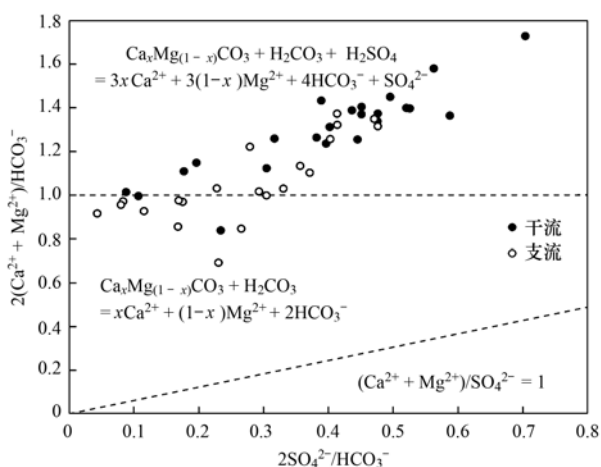


图7 清水江流域河水中 $2(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 与 $2\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 浓度比值关系

Fig. 7 Plots of $2(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ vs. $2\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ of waters from Qingshuijiang River basin

+ Mg^{2+}) 与 HCO_3^- 的相关性 ($r = 0.96, P < 0.01$) 和 Mg^{2+} 与 HCO_3^- 的相关性大于 Ca^{2+} 与 HCO_3^- 的相关性 (表2), 表明流域河水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 离子主要来自于白云石的溶解, 其次是方解石^[29], 即流域河水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 主要来自于白云石和方解石等碳酸盐岩的风化溶解。 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 相关性良好, 往往反映了二者共同为人为来源, 如化

石燃料导致的酸沉降、城镇污水排放等^[19, 30]。前面讨论已经表明, 研究区酸沉降对清水江流域 SO_4^{2-} 的影响不可忽视。因此, 大气酸沉降和上游密集的城镇可能是流域内 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 的重要来源。

3.3.2 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、Si 主要来源

清水江流域丰水期 SiO_2 质量浓度介于 $1.86 \sim 14.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 平均值 $7.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 流域 SiO_2 浓度也可能受到生物作用的影响, 如东西伯利亚沼泽地中的一些小流域, $\text{Si}/(\text{Na}^+ - \text{Cl}^- + \text{K}^+)$ 比值约 $0.2 \sim 0.5$ ^[31, 32]。清水江流域 $\text{Si}/(\text{Na}^+ - \text{Cl}^- + \text{K}^+)$ 比值介于 $0.56 \sim 11.79$ 之间, 平均值为 2.70 , 可以看出, 流域 SiO_2 受生物作用影响很小, 主要来源于硅酸盐岩风化。

清水江流域河水中 Na^+ 、 K^+ 浓度较低, 仅占阴阳离子总量的 5.01% 及 1.01% 。河水中 SiO_2 仅与阳离子 ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)、 Na^+ 存在相关性, 与 Na^+ 、 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ 在 0.05 检测水平下显著相关 ($r = 0.38, P < 0.05$; $r = 0.34, P < 0.05$), 与 K^+ 相关性很小。清水江流域中下游地区为流域碎屑岩地区, 大部分地层多硅化, 可知河水中的 Na^+ 、 K^+ 有可能来自于钠、钾硅酸盐岩的风化。通常河水中的 Na^+ 来自于石盐的溶解和硅酸盐风化, K^+ 离子来源于钾长石和云母的风化^[18]。清水江流域 Na^+ 、 K^+ 与 Cl^- 在

表 2 清水江流域河水主要离子相关性¹⁾

	Table 2 Correlation coefficients (<i>r</i>) of ionic concentrations of waters from Qingshuijiang River basin									
	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	SiO ₂
F ⁻	1.00									
Cl ⁻	0.86**	1.00								
NO ₃ ⁻	0.45**	0.55**	1.00							
SO ₄ ²⁻	0.72**	0.66**	0.76**	1.00						
HCO ₃ ⁻	0.51**	0.59**	0.67**	0.70**	1.00					
Na ⁺	0.51**	0.63**	0.49**	0.46**	0.09	1.00				
K ⁺	0.60**	0.84**	0.55**	0.68**	0.54**	0.63**	1.00			
Mg ²⁺	0.59**	0.54**	0.75**	0.78**	0.96**	0.16	0.49**	1.00		
Ca ²⁺	0.67**	0.71**	0.74**	0.90**	0.91**	0.29	0.71**	0.89**	1.00	
SiO ₂	-0.06	0.05	-0.20	-0.31*	-0.40**	0.38*	0.07	-0.46**	-0.32*	1.00

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$

0.01 检测水平下显著相关($r = 0.63$, $P < 0.01$ 、 $r = 0.84$, $P < 0.01$), 但流域无明显的蒸发岩(KCl、NaCl)出露, 河水中的 Na^+ 、 K^+ 除了岩石风化来源外, 还有一定人为活动来源, 如工业、生活废水排放(含 NaCl), 农业活动钾肥(KCl)的施用等。

3.4 人为活动输入对河流水化学的影响

人为活动排放污染物的特征是富含 K^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 NO_3^- , 其中 K^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 同时又是岩石风化的产物, NO_3^- 则常作为反映人类活动的特征离子^[33]。通常认为, 河水中的 SO_4^{2-} 主要源于硫化物的氧化、工业活动燃煤产生的 SO_2 排放和大气沉降等^[34]。清水江流域上游流域为我国重要的磷化工基地, 磷化工企业排放的废水造成大量的磷、氟进入水体^[35], 因此, 本研究用 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 F^- 及 TP 表征人为活动对流域水化学的影响。

如图 8 所示, 清水江流域干流水中的 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 与 F^- 、TP 变化趋势基本相同, 流域上游都匀、

福泉、三江口地区至重安江段最高, 中下游地区较低。从上游至下游流域河水中的 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 F^- 及 TP 浓度逐渐降低, 说明随着水体自净及中下游森林区域支流的汇入, 工业活动对流域水化学的影响逐渐降低, 水质逐渐改善, 可见上游工业发达地区对清水江流域水化学的影响是非常显著的。

4 结论

(1) 清水江流域丰水期 pH 平均为 8.00, 呈中性偏弱碱性, TDS 均值 $213.96 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 阳离子浓度依次为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$, 阴离子浓度变化为 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{F}^-$ 。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 是主要阳离子, 分别占阳离子总量 58% 和 30%, HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 是主要阴离子, 分别占阴离子总量 70% 和 22%。

(2) Gibbs 图、主量元素三角图和离子比值分析表明, 清水江流域丰水期的水化学组成主要受岩石风化控制; 其中以碳酸盐岩风化贡献为主, 到中下游碎屑地区, 硅酸盐类岩石风化的贡献逐渐增加; 碳酸和硫酸同时参与了流域岩石的风化。

(3) 离子来源解析表明, 清水江流域丰水期河水 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 主要来自于碳酸盐岩的风化溶解, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 受区域酸沉降和城镇污水排放影响, Na^+ 、 K^+ 、 SiO_2 主要来自于硅酸盐岩风化溶解, 有部分 Na^+ 、 K^+ 和 Cl^- 来自于人为活动输入。对整个流域人为活动影响分析表明, 清水江流域上游受工矿企业和城镇影响明显, 从中游至下游, 人为活动影响逐渐减弱。

参考文献:

[1] Meybeck M. Global occurrence of major elements in rivers[J]. Treatise on Geochemistry, 2003, 5: 207-223.
[2] Stallard R F, Edmond J M. Geochemistry of the Amazon. 2. The

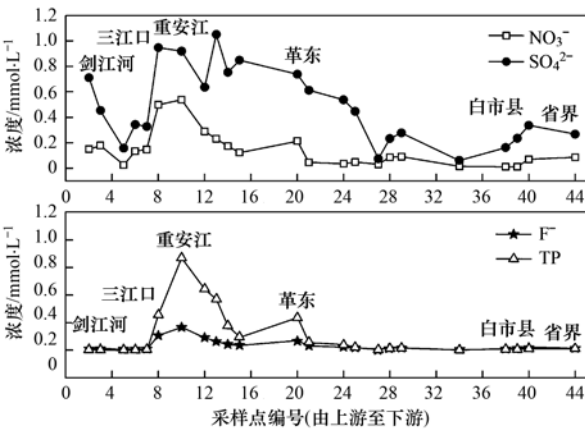


图 8 清水江流域干流水 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 F^- 及 TP 浓度变化趋势

Fig. 8 Spatial distribution of SO_4^{2-} , NO_3^- , F^- and TP of the Qingshuijiang River mainstream

- influence of geology and weathering environment on the dissolved load [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1983, **88** (C14): 9671-9688.
- [3] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. *Science*, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [4] 乐嘉祥, 王德春. 中国河流水化学特征[J]. *地理学报*, 1963, **29**(1): 1-13.
- [5] 陈静生, 王飞越, 夏星辉. 长江水质地球化学[J]. *地学前缘*, 2006, **13**(1): 74-85.
- [6] 陈静生, 夏星辉, 蔡绪贻. 川贵地区长江干支流河水主要离子含量变化趋势及分析[J]. *中国环境科学*, 1998, **18**(2): 36-40.
- [7] 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**(1-2): 1-21.
- [8] 韩贵琳, 刘丛强. 贵州乌江水系的水文地球化学研究[J]. *中国岩溶*, 2000, **19**(1): 35-43.
- [9] Li S L, Liu C Q, Li J, *et al.* Geochemistry of dissolved inorganic carbon and carbonate weathering in a small typical karstic catchment of southwest China: isotopic and chemical constraints [J]. *Chemical Geology*, 2010, **277**(3-4): 301-309.
- [10] Li S L, Calmels D, Han G L, *et al.* Sulfuric acid as an agent of carbonate weathering constrained by $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$: Examples from Southwest China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, **207**(3-4): 189-199.
- [11] 刘以礼, 杨贤, 冯匀强, 等. 贵州清水江水质状况及主要污染物[J]. *北方环境*, 2013, (2): 111-115.
- [12] 李甜甜, 季宏兵, 江用彬, 等. 赣江上游河流水化学的影响因素及 DIC 来源[J]. *地理学报*, 2007, **62**(7): 764-775.
- [13] Grosbois C, Négrel P, Grimaud D, *et al.* An overview of dissolved and suspended matter fluxes in the Loire River Basin: natural and anthropogenic inputs [J]. *Aquatic Geochemistry*, 2001, **7**(2): 81-105.
- [14] 唐红忠, 黄晓俊, 黄桂东. 贵州省黔南地区可利用降水资源的气候变化特征分析[J]. *云南地理环境研究*, 2012, **24**(4): 73-77.
- [15] 肖红伟, 肖化云, 王燕丽. 贵阳大气降水化学特征及来源分析[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(12): 1590-1596.
- [16] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, *et al.* Global silicate weathering and CO_2 consumption rates deduced from the chemistry of large rivers [J]. *Chemical Geology*, 1999, **159**(1-4): 3-30.
- [17] Négrel P, Allègre C J, Dupré B, *et al.* Erosion sources determined by inversion of major and trace element ratios and strontium isotopic ratios in river water: the Congo Basin case [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, **120**(1-2): 59-76.
- [18] 王鹏, 尚英男, 沈立成, 等. 青藏高原淡水湖泊水化学组成特征及其演化[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 874-881.
- [19] 吴起鑫, 韩贵林, 陶发祥, 等. 西南喀斯特农村降水化学研究: 以贵州普定为例[J]. *环境科学*, 2011, **32**(1): 26-32.
- [20] 陈静生, 王飞越, 何大伟. 黄河水质地球化学[J]. *地学前缘*, 2006, **13**(1): 58-73.
- [21] 朱秉启, 杨小平. 塔克拉玛干沙漠天然水体的化学特征及其成因[J]. *科学通报*, 2007, **52**(13): 1561-1566.
- [22] 鞠建廷, 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.
- [23] Ahmad T, Khanna P P, Chakrapani G J, *et al.* Geochemical characteristics of water and sediment of the Indus River, Trans-Himalaya, India: constraints on weathering and erosion [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 1998, **16**(2-3): 333-346.
- [24] 侯昭华, 徐海, 安芷生. 青海湖流域水化学主离子特征及控制因素初探[J]. *地球与环境*, 2009, **37**(1): 11-19.
- [25] 李军, 刘丛强, 李龙波, 等. 硫酸侵蚀碳酸盐岩对长江河水 DIC 循环的影响[J]. *地球化学*, 2010, **39**(4): 305-313.
- [26] Li S Y, Zhang Q F. Geochemistry of the upper Han River basin, China. 1: Spatial distribution of major ion compositions and their controlling factors [J]. *Applied Geochemistry*, 2008, **23**(12): 3535-3544.
- [27] 赵晓韵, 李金娟, 孙哲, 等. 贵州典型酸雨城市大气降水水化学组成特征[J]. *地球与环境*, 2014, **42**(3): 316-321.
- [28] Başak B, Alagha O. The chemical composition of rainwater over Büyükdere Lake, Istanbul [J]. *Atmospheric Research*, 2004, **71**(4): 275-288.
- [29] 王亚平, 王岚, 许春雪, 等. 长江水系水文地球化学特征及主要离子的化学成因[J]. *地质通报*, 2010, **29**(2-3): 446-456.
- [30] Han G L, Liu C Q. Strontium isotope and major ion chemistry of the rainwaters from Guiyang, Guizhou Province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **364**(1-3): 165-174.
- [31] Huh Y, Panteleyev G, Babich D, *et al.* The fluvial geochemistry of the rivers of Eastern Siberia: II. Tributaries of the Lena, Omoloy, Yana, Indigirka, Kolyma, and Anadyr draining the collisional/accretionary zone of the Verkhoyansk and Cherskiy ranges [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, **62**(12): 2053-2075.
- [32] 孙媛媛, 季宏兵, 罗建美, 等. 赣南小流域的水文地球化学特征和主要风化过程[J]. *环境化学*, 2006, **25**(5): 550-557.
- [33] 胡春华, 周文斌, 夏思奇. 鄱阳湖流域水化学主离子特征及其来源分析[J]. *环境化学*, 2011, **30**(9): 1620-1626.
- [34] 王兵, 李心清, 袁洪林, 等. 黄河下游地区河水主要离子和锶同位素的地球化学特征[J]. *环境化学*, 2009, **28**(6): 876-882.
- [35] 马谦, 杨星宇, 徐浩, 等. 福泉地区磷化工对清水江的污染及其治理对策[J]. *贵州化工*, 2004, **29**(4): 31-34.

CONTENTS

Pollution of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matters of Shenzhen	SUN Jian-lin, CHANG Wen-jing, CHEN Zheng-xia, <i>et al.</i> (1513)
Emission Characteristics of VOCs from Typical Restaurants in Beijing	CUI Tong, CHENG Jing-chen, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (1523)
Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (1530)
Comparison Test Between PM _{2.5} Continuous Monitoring System and Manual Sampling Analysis for PM _{2.5} in Ambient Air	WANG Qiang, ZHONG Qi, CHI Ying, <i>et al.</i> (1538)
Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	PEI Bing (1544)
Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors	FANG Feng, WANG Lei, XI Xue-fei, <i>et al.</i> (1550)
Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body	FENG Chi, JIN Qi, WANG Yan-nan, <i>et al.</i> (1557)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (1565)
Temporal-spatial Variation and Source Identification of Hydro-chemical Characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City	GAO Lei, CHEN Jian-yao, WANG Jiang, <i>et al.</i> (1573)
Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China	LIU Xiao, YANG Yan, PENG Tao, <i>et al.</i> (1582)
Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas	XIAO Shi-zhen, XIONG Kang-ning, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (1590)
Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season	ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (1598)
Vertical Migration Characteristics of Organochlorine Pesticides in Overlying Soil in Karst Terranes and Its Impact on Groundwater	SUN Yu-chuan, WANG Yong-qi, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i> (1605)
Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province	CAO Fei-fei, YANG Li-yuan, PANG Xu-gui, <i>et al.</i> (1615)
Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of <i>Chironomus plumosus</i>	SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1622)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1630)
Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water	HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1639)
Effects of <i>Litchi chinensis</i> Defoliation on Growth and Photosynthesis of <i>Microcystis aeruginosa</i>	WANG Xiao-xiong, JIANG Chen-chun, LI Jin-wei, <i>et al.</i> (1648)
Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to Green Algae	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (1655)
Formation Mechanism of the Disinfection By-product 1,1-Dichloroacetone in Drinking Water	DING Chun-sheng, MENG Zhuang, XU Yang-yang, <i>et al.</i> (1662)
Degradation Kinetics and Formation of Disinfection By-products During Linuron Chlorination in Drinking Water	LING Xiao, HU Chen-yan, CHENG Ming, <i>et al.</i> (1668)
Interference for Various Quench Agents of Chemical Disinfectants on Detection of Endotoxin Activities in Water	ZHANG Can, LIU Wen-jun, SHI Yun, <i>et al.</i> (1674)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Dairy Manure Biochar	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, <i>et al.</i> (1678)
Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid	ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, <i>et al.</i> (1686)
Effect of Membrane Wettability on Membrane Fouling and Chemical Durability of SPG Membranes	ZHANG Jing, XIAO Tai-min, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1694)
TiO ₂ -Induced Photodegradation of Levofloxacin by Visible Light and Its Mechanism	GUO Hong-sheng, LIU Ya-nan, QIAO Qi, <i>et al.</i> (1700)
Performance of Novel Macromolecule Flocculant in the Treatment of Wastewater Containing Cr(VI) Ions	WANG Gang, DU Feng-ling, CHANG Qing, <i>et al.</i> (1707)
On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements	ZENG Shan-wen, WANG Ze-yu, GAO Jing, <i>et al.</i> (1713)
Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production	HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, <i>et al.</i> (1720)
Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test	ZHANG Yu, HAN Rong, LU Wen-jing, <i>et al.</i> (1727)
Extraction of Heavy Metals from Sludge Using Biodegradable Chelating Agent <i>N,N</i> -bis(carboxymethyl) Glutamic Acid Tetrasodium	WU Qing, CUI Yan-rui, TANG Xiao-xiao, <i>et al.</i> (1733)
Biodiversity and Function Analyses of BIOLAK Activated Sludge Metagenome	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin, <i>et al.</i> (1739)
Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL	LIANG Xian, REN Yong-xiang, YANG Lei, <i>et al.</i> (1749)
Biodegradation Characteristics and Kinetics of <i>p</i> -nitrophenol by Strain <i>Arthrobacter</i> sp. CN2	REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, <i>et al.</i> (1757)
Biodegradation of Pyrene by Intact Cells and Spores of <i>Brevibacillus brevis</i>	LIU Zhi-chen, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (1763)
Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill	LI Lei, XU Jing, ZHAO You-cai, <i>et al.</i> (1769)
Investigation of Antibiotic Resistance of Indigenous Bacteria and Abundance of Class I Integron in Matrix of Constructed Wetlands of Different Configurations	MAI Xiao-bei, TAO Ran, YANG Yang, <i>et al.</i> (1776)
Effects of Nitrate and CH ₄ on Anaerobic Oxidation of BETX in Landfill Cover Soils	LIU Rong, LONG Yan, WANG Li-li, <i>et al.</i> (1785)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau	YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (1793)
Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau	JIANG Ji-shao, GUO Sheng-li, WANG Rui, <i>et al.</i> (1802)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment	ZHANG Wen-chao, LÜ Sen-lin, LIU Ding-yu, <i>et al.</i> (1810)
Spatial Distribution of Magnetic Properties of Street Dust in Baoji City and Its Implications of Environment	ZHANG Jun-hui, WANG Jin, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (1818)
Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China	MAO Xia-li, LU Kou-ping, SUN Tao, <i>et al.</i> (1827)
Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas	LI Jun-jian, LIU Feng, ZHOU Xiao-mei (1836)
Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjinag Plain, Northeast China	XIAO Ye, HUANG Zhi-gang, WU Hai-tao, <i>et al.</i> (1842)
Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants	HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan, ZHOU Juan, <i>et al.</i> (1849)
Effects and Biological Response on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil	YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, <i>et al.</i> (1856)
Enhanced Phytoremediation of Heavy Metals from Contaminated Soils Using <i>Sedum alfredii</i> Hance with Biodegradable Chelate GLDA	WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (1864)
Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress	JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (1870)
Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (1877)
Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants	LI Miao-miao (1888)
A Method Research on Environmental Damage Assessment of a Truck Rollover Pollution Incident	CAI Feng, ZHAO Shi-bo, CHEN Gang-cai, <i>et al.</i> (1902)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年5月15日 第36卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 5 May 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行