

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.5  
第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律 ..... 张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)  
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征 ..... 王红丽,景盛翱,乔利平(2010)  
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征 ..... 沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)  
郑州-新乡冬季PM<sub>2.5</sub>中元素浓度特征及其源分析 ..... 闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)  
我国PM<sub>2.5</sub>浓度分阶段改善目标情景分析 ..... 贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)  
安阳市典型工业源PM<sub>2.5</sub>排放特征及减排潜力估算 ..... 杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)  
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单 ..... 赵庆炎,韩士杰,张轶舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)  
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性 ..... 乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)  
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势 ..... 刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)  
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征 ..... 李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)  
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布 ..... 黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)  
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价 ..... 刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)  
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价 ..... 范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)  
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征 ..... 陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)  
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义 ..... 袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)  
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素 ..... 黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)  
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素 ..... 周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)  
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析 ..... 秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)  
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力 ..... 黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)  
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素 ..... 李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)  
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险 ..... 李如忠,鲍琴,戴源(2178)  
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析 ..... 徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)  
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应 ..... 蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)  
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估 ..... 张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)  
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征 ..... 马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)  
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析 ..... 刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)  
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征 ..... 樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)  
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响 ..... 黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)  
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析 ..... 吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)  
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系 ..... 王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)  
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析 ..... 刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)  
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应 ..... 毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)  
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能 ..... 伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)  
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制 ..... 吕娟,许志伟,王言(2278)  
铝代水铁矿协同吸附砷的机制 ..... 黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)  
新型材料磁性氧化铁的除氯效能 ..... 方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)  
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制 ..... 祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)  
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化 ..... 吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)  
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征 ..... 马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)  
15℃ SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能 ..... 孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)  
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响 ..... 王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)  
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响 ..... 杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)  
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液 ..... 刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)  
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响 ..... 黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)  
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异 ..... 秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)  
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响 ..... 王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)  
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制 ..... 刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)  
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响 ..... 刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)  
地膜覆盖和施氮对菜地CH<sub>4</sub>排放的影响 ..... 倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)  
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响 ..... 王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)  
不同施肥模式对热区晚稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响 ..... 田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)  
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响 ..... 曾蔓蔓,慈思,樊晶晶,李江文,翁吴璐,李松(2435)  
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价 ..... 宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)  
超富集植物藿香蓟(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力 ..... 张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)  
种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险 ..... 焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)  
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应 ..... 舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)  
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价 ..... 吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)

## 崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素

周巾枚<sup>1,2</sup>, 蒋忠诚<sup>1\*</sup>, 徐光黎<sup>2</sup>, 覃小群<sup>1</sup>, 黄奇波<sup>1</sup>, 张连凯<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 桂林 541004; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074)

**摘要:**以崇左响水地区为研究区域,于2016年丰水期、枯水期、平水期在研究区内采集210个地下水样品并测定,分析岩溶地下水的主要离子化学特征和季节变化,运用多元统计分析法研究地下水主要离子的控制因素.结果表明,研究区岩溶地下水为弱碱性淡水,优势离子均为 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 为主,分别占全部阳离子和阴离子的75%、70%以上, $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 和 $\text{NO}_3^-$ 平均质量浓度表现为丰水期>平水期>枯水期, $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、pH值、TDS、 $\text{TZ}^+$ 和 $\text{TZ}^-$ 未出现明显的季节性变化.受碳酸盐岩地层的控制,地下水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型为主,丰水期和平水期少部分水点为 $\text{HCO}_3\text{-Cl-Ca}$ 和 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$ 型水,平水期出现 $\text{Cl}\cdot\text{NO}_3\text{-Ca}$ 型水,枯水期可见 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水,反映出少部分水点受地层中白云岩和铁质泥岩溶解、人类源 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{Cl}^-$ 的影响.地下水中 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 主要来源于碳酸盐岩灰岩的溶解, $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 来源于大气输入与人为活动的贡献, $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 来源于地层中白云岩、铁质泥岩溶解.地下水化学成分主要受水岩相互作用的控制,碳酸盐岩含水层中的地下水主要受碳酸盐岩溶解因子控制,村庄和人口密集区的地下水主要受大气输入与人为活动因子控制.

**关键词:**离子化学特征;控制因素;多元统计;岩溶地下水;崇左响水地区

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2143-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201810021

## Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo

ZHOU Jin-mei<sup>1,2</sup>, JIANG Zhong-cheng<sup>1\*</sup>, XU Guang-li<sup>2</sup>, QIN Xiao-qun<sup>1</sup>, HUANG Qi-bo<sup>1</sup>, ZHANG Lian-kai<sup>1</sup>

(1. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** To investigate the major ionic characteristics, seasonal variation, and controlling factors of karst groundwater at Xiangshui, Chongzuo, 210 groundwater samples were collected and measured in wet season, dry season, and flat season in 2016. The controlling factors of karst groundwater were analyzed by using multivariate statistical analysis method. The results showed that the groundwater samples were weakly alkaline fresh water and rich in  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{HCO}_3^-$ , which accounted for more than 75% and 70% of total ion concentration. The average concentrations of  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ , and  $\text{NO}_3^-$  decreased in the order of wet season > flat season > dry season. None of the concentrations of  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , pH, TDS,  $\text{TZ}^+$ , and  $\text{TZ}^-$  showed significant seasonal variation. The hydrochemical characteristics were found to be of  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  type and mainly determined by carbonate rock dissolution. Only a small proportion of them were of  $\text{HCO}_3\text{-Cl-Ca}$  and  $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$  type in wet season and flat season,  $\text{Cl}\cdot\text{NO}_3\text{-Ca}$  type appeared in flat season, and  $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$  type appeared in dry season, reflecting the influence of dolomite and ferric mudstone dissolution in the stratum, and of  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{Cl}^-$  input from anthropogenic activities. Groundwater  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{HCO}_3^-$  mainly came from limestone dissolution;  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ , and  $\text{NO}_3^-$  came from atmospheric precipitation and human activities; while  $\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  came from dolomite and ferric mudstone dissolution. The chemical composition of groundwater was controlled by water-rock interaction, the groundwater in the carbonate aquifer was controlled by carbonate rocks dissolution, and the groundwater in villages and densely populated areas was affected by atmospheric precipitation and human activity.

**Key words:** ionic chemical characteristics; controlling factors; multivariate statistical analysis; karst groundwater; area of Xiangshui, Chongzuo

地下水是地球中水循环的重要组成部分,其水化学特征是研究地下水资源时空变化的重要内容,对水资源开发利用、生态环境保护以及人类生存与发展至关重要.岩溶区地下水化学特征主要受区域地层岩性、水文情势、大气输入及人类活动的影响,由于特殊的地表地下双层水文结构,地下水极易受到污染,且污染后很难恢复和治理<sup>[1~6]</sup>.近年来,随着农业和工业的飞速发展,人类活动加强,含水层遭到破坏,造成岩溶地下水严重污染<sup>[7,8]</sup>.广西崇左地区以农业为主,甘蔗是主要的经济作物,甘蔗种植大部分分布在岩溶区,地下河和岩溶

泉发育,防污性能极其脆弱,因此极易对地下水造成污染,进而威胁岩溶生态环境,危害人民身体健康.为了合理保护岩溶区地下水资源,免受人类活动的污染,掌握岩溶地下水主要离子化学特征及控制因素,有效区分自然过程与人为因素对地下水化学特征的影响程度是必要的.

收稿日期: 2018-10-08; 修订日期: 2018-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571203); 中国地质科学院基本科研业务费项目(YYPF201725); 中国地质调查项目(DD20160301)

作者简介: 周巾枚(1993~),女,博士研究生,主要研究方向为水文地质及岩溶生态学, E-mail: jinmzhou@163.com

\* 通信作者, E-mail: zhjiang@karst.ac.cn

目前,学者对广西崇左地区的水化学研究集中在水质评价方面<sup>[9,10]</sup>,因子分析被广泛用于评价人为活动、水岩作用过程和土壤等因素对岩溶地下水化学特征的影响<sup>[11,12]</sup>,但是对区域性地下水化学特征、控制因素及各控制因素影响程度方面的定量研究较少.本文针对崇左响水地区岩溶地下水主要离子不同时期的特征及控制因素进行了研究,分析了研究区丰水期、枯水期和平水期的地下水主要离子的化学特征,运用主成分分析法和因子分析方法讨论了地下水主要离子的控制因素,以期研究区地下水资源的合理开发利用和有效保护提供理论依据和科学指导.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

崇左响水地区(22°10'~22°20'N, 107°00'~107°15'E),总面积约475.6 km<sup>2</sup>,位于广西崇左市中西部,隶属崇左市江州区、龙州县、宁明县管辖.属亚热带季风气候区,多年平均气温为21.3~22.5℃,年无霜期长达340多天,多年平均降雨量1199 mm,降雨时期分布不均匀,降雨量变化明显,6~9月降雨量为749.5 mm,占全年降雨量的63.5%,5、10、11月降雨量为325.3 mm,占全年降雨量的27.1%,12月~次年4月降雨量为123.9 mm,占全年降雨量的10.3%.属左江流域,地表河流主要为左江干流、黑水河,以及由岩溶水调节的季节性小河,流长81.6 km.地表河径流量在时间上的分配与降雨是一致的,6~9月集中了年径流量80%左右,12月~次年4月径流量很小,因此,6~9月为丰水期,12月~次年4月定为枯水期,5、10、11月为平水期<sup>[13-15]</sup>.研究区西部为峰丛洼地、谷地,北中部为峰林谷地、平原,东部为峰丛坡地,东南部为低山丘陵地貌,地势南北部较高,中东部较低,由西北向东部倾斜,海拔高度150~500 m.出露地层从老到新依次为石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系及第四系,碳酸盐岩地层主要为泥盆系下统至三叠系下统,面积为433.04 km<sup>2</sup>,占研究区面积的91%,岩性以灰白色-灰色中厚-厚层灰岩为主,广泛分布于研究区,在研究区西北角分布少量白云岩,二叠系上统合山组地层(P<sub>3</sub>h)为紫红色薄层状铁质泥岩、豆状铁铝岩,褶皱断裂发育.碳酸盐岩含水岩组是最重要的含水岩组,地下水类型主要为裂隙溶洞水,岩溶发育强烈,受地质构造的控制,地下河主要沿断层以及向斜轴部发育.地下水主要接受降雨补给,左江自西向东穿过研究区中南部,构成当地地下水最低排泄基准面,分别由南、

北、西方向往中部的左江排泄.经济作物以甘蔗为主,甘蔗生长期施肥和喷洒农药、蔗糖加工业、铝土矿、煤矿、铁矿开采对地下水造成污染,威胁到人身健康<sup>[16]</sup>.

### 1.2 样品采集与测试

本研究于2016年的3、5、6、7、8和11月分别在研究区采集地下水样品9、47、24、48、28和54个,共计210个地下水样品,样品均定深采自地下水水面以下50 cm处,其中,丰水期(6~9月)100个地下水样品,枯水期(12月~次年4月)9个地下水样品,平水期(5、10和11月)101个地下水样品.采集于同一采样点的丰水期、枯水期和平水期的地下水样品有9组,采集于同一采样点的丰水期和平水期的地下水样品有37组.研究区地理位置和采样点分布见图1.

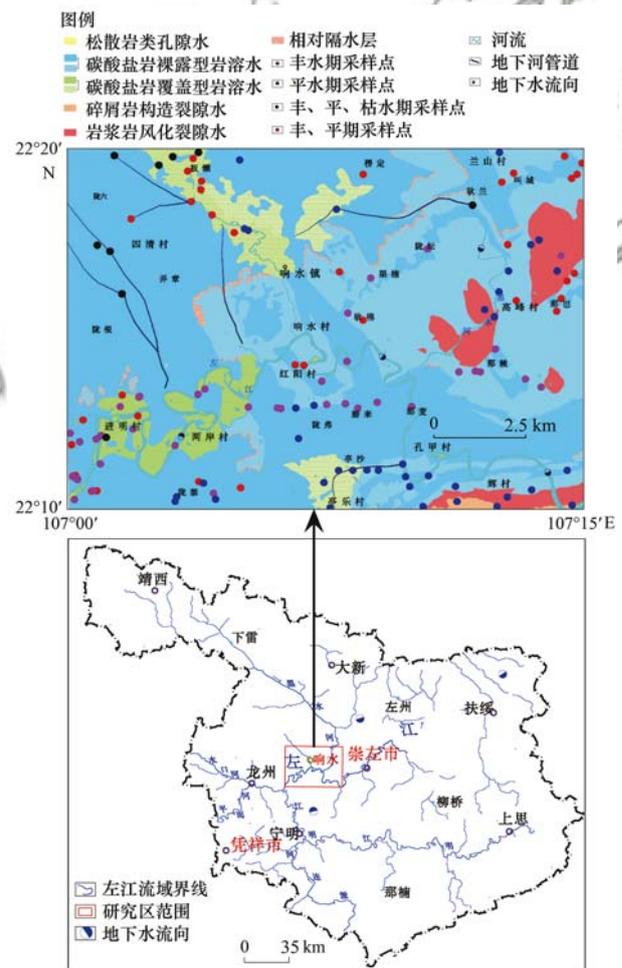


图1 研究区地理位置和采样点分布示意

Fig. 1 Location of the study area and distribution of sampling sites

样品测试采用仪器现场测试和样品室内测试相结合的研究方法.现场测试使用Multi340i便携式水质多参数分析仪(德国WTW公司)测定各水点的水温、电导率和pH值,测试精度分别为0.1℃、1 μS·cm<sup>-1</sup>和0.01个pH单位;使用碱度

试剂盒(德国 Merck 公司)测定地下水的  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度和  $\text{HCO}_3^-$  浓度, 精度分别为  $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $0.1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ . 地下水样品采集前用去离子水清洗聚乙烯瓶 3 次, 所采水样润洗 3 次, 水样采集后在现场用  $0.45 \mu\text{m}$  水系微孔滤膜过滤, 滤液装入 100 mL 聚乙烯瓶中. 用于测定的阳离子 ( $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  和  $\text{Mg}^{2+}$ ) 水样立即加入超纯硝酸酸化使其  $\text{pH} < 2$ , 带回实验室后放置于  $4^\circ\text{C}$  冰箱中密封保存; 用于测定阴离子 ( $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$ ) 的水样直接于  $4^\circ\text{C}$  冰箱中密封保存. 采用全谱直读等离子体光谱仪 (IRIS Intrepid II XSP, 美国热电) 测定水样阳离子  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  和  $\text{Mg}^{2+}$  质量浓度, 检测依据为 GB/T 5750.6-2006, 各离子的最低检测质量浓度分别为  $0.02$ 、 $0.005$  和  $0.013 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 采用离子色谱仪 (ICS-1100, 美国戴安) 测定水样阴离子  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度, 检测依据为 DZ/T 0064.51-93, 各离子的最低检测质量浓度分别为:  $0.1$ 、 $0.05$ 、和  $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 阴阳离子的误差控制在 10% 以内.

## 2 结果与分析

根据地下水主要离子化学组成 (表 1), 其中, 标准化的非有机质电离平衡  $\text{NICB} = (\text{TZ}^+ - \text{TZ}^-) \times 100 / (\text{TZ}^+ + \text{TZ}^-)$ , 地下水主要离子在丰水期、枯水期和平水期表现出一定的差异性. 地下水中  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{NO}_3^-$  平均质量浓度均表现为丰水期  $>$  平水期  $>$  枯水期, 丰水期平均质量浓度最大的

原因是丰水期大量降雨引起左江上游生活、农业污水下渗, 带入较多  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{NO}_3^-$  渗入地下水;  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{pH}$  值、地下水溶解性总固体 (TDS)、地下水总阳离子当量浓度 ( $\text{TZ}^+ = \text{K}^+ + \text{Na}^+ + 2\text{Mg}^{2+} + 2\text{Ca}^{2+}$ ) 和总阴离子当量浓度 ( $\text{TZ}^- = \text{Cl}^- + \text{HCO}_3^- + 2\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-$ ) 均未出现明显的季节性变化, 表明地下水径流长, 地下水对碳酸盐岩的溶解作用时间较长, 水岩作用时间长, 水岩反应充分,  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  枯水期平均质量浓度最大的原因是枯水期水流量最小, 稀释作用最弱;  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{pH}$ 、TDS、 $\text{TZ}^+$  和  $\text{TZ}^-$  变异系数在丰水期、枯水期、平水期总体上相近, 且均少于 50%, 表明其在时间及空间上变化均较小,  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  变异系数均较大, 体现出其在地下水中空间分布差异较大. 地下水  $\text{pH}$  平均值为 7.20, 整体呈现弱碱性, 这与岩溶区石灰岩和白云岩溶解有关; TDS 范围为  $45.96 \sim 530.26 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 表明地下水为淡水, 平均值为  $291.58 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 远远高于世界平均值  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 显示了岩溶区剧烈的化学侵蚀作用与水岩作用有关;  $\text{TZ}^+$  范围为  $0.54 \sim 9.61 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为  $5.47 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{TZ}^-$  范围为  $0.91 \sim 9.51 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为  $5.48 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$ , 地下水阴阳离子当量浓度与世界地下水 ( $\text{TZ}^+$  为  $0.3 \sim 10 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 相吻合, 但平均值均大于世界平均值 ( $\text{TZ}^+ = 1.25 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[17~19]</sup>, 原因是研究区碳酸盐岩地层的比例较高.

表 1 地下水主要离子化学组成

Table 1 Major ionic concentrations in groundwater

统计量	时期	pH	质量浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$								TDS	$\text{TZ}^+$ / $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{TZ}^-$ / $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$	NICB /%
			$\text{K}^+$	$\text{Na}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{NO}_3^-$				
平均值	丰水期	7.11	2.31	4.31	98.44	4.67	13.51	10.61	267.78	27.65	295.52	5.56	5.43	1.03
	枯水期	7.54	0.48	0.61	94.27	8.57	6.65	8.97	290.32	17.05	281.88	5.47	5.41	0.54
	平水期	7.26	2.05	3.66	95.64	4.71	13.29	13.81	261.35	24.19	288.54	5.39	5.34	0.30
	全年	7.20	2.11	3.84	96.91	4.86	13.11	12.07	265.65	25.53	291.58	5.47	5.39	0.66
最大值	丰水期	7.72	22.52	40.49	166.50	17.84	71.50	50.76	426.18	122.64	530.26	9.61	9.51	4.09
	枯水期	7.91	0.93	0.92	141.40	16.40	12.26	17.91	395.13	32.67	378.31	7.23	7.17	1.47
	平水期	7.68	20.04	28.14	172.60	16.89	53.84	82.84	438.52	102.02	530.26	9.12	9.41	2.74
	全年	7.91	22.52	40.49	166.50	17.84	71.50	82.84	438.52	122.64	530.26	9.61	9.51	4.09
最小值	丰水期	6.55	0.21	0.64	15.53	1.01	2.30	1.45	40.82	nd	62.60	1.09	1.08	-2.28
	枯水期	7.16	0.12	0.22	45.59	1.67	1.51	6.36	158.52	3.31	158.09	3.11	3.07	-0.35
	平水期	6.20	0.19	0.34	2.05	0.74	2.12	3.47	36.28	nd	45.96	0.54	0.91	-25.61
	全年	6.20	0.12	0.22	2.05	0.74	1.51	1.45	36.28	nd	45.96	0.54	0.91	-25.61
标准差	丰水期	0.20	3.08	6.70	40.32	3.73	13.62	7.39	95.24	27.01	114.44	2.08	2.01	1.28
	枯水期	0.29	0.28	0.28	29.07	5.47	3.29	3.45	67.76	8.88	60.58	1.13	1.13	0.56
	平水期	0.22	2.90	5.07	37.85	3.79	12.41	12.25	93.21	26.72	111.36	1.94	1.98	3.14
	全年	0.24	2.95	5.84	38.60	3.91	12.80	10.05	93.10	26.39	110.88	1.98	1.96	2.37
变异系数 /%	丰水期	2.86	133.58	155.26	40.96	80.02	102.46	69.66	35.57	97.68	38.72	37.35	36.98	124.93
	枯水期	3.91	57.13	45.46	30.84	63.87	49.50	38.50	23.34	52.11	21.49	20.74	20.82	103.85
	平水期	3.03	141.27	138.42	39.57	80.53	91.85	88.70	35.67	110.47	38.59	36.04	37.13	1039.65
	全年	3.37	139.70	152.06	39.83	80.46	97.62	83.21	35.04	103.36	38.03	36.10	36.39	361.60

由 Piper 三线图可知岩溶地下水主要离子组成总体特征<sup>[20,21]</sup>。根据研究区岩溶地下水主要离子 Piper 图(图 2), 对于阴离子, 丰水期、枯水期和平水期均位于 Piper 图阴离子的左下角, 说明丰水期、枯水期和平水期的离子组成表现出较高的一致性,  $\text{HCO}_3^-$  为优势离子, 分别占全部阴离子的 32.70% ~ 95.87%、68.42% ~ 90.15% 和 36.26% ~ 95.27%, 说明碳酸盐岩风化是水质子的主要来源<sup>[22]</sup>, 其次为  $\text{NO}_3^-$ , 分别占全部阴离子的 0.10% ~ 58.47%、3.96% ~ 23.19% 和 0.52% ~ 40.11%,  $\text{Cl}^-$  浓度比  $\text{NO}_3^-$  略小, 分别占全部阴离子的 0.50% ~ 19.05%、0.65% ~ 3.51% 和 0.76% ~ 46.82%, 其余为  $\text{SO}_4^{2-}$ 。对于阳离子, 丰水期、枯水期和平水期均位于阳离子三角图的左侧, 表明优势阳离子均为  $\text{Ca}^{2+}$ , 分别占全部阳离子的 47.73% ~ 97.83%、78.58% ~ 98.35% 和 15.48% ~ 98.36%, 说明碳酸盐岩风化为主要化学风化类型<sup>[23]</sup>, 其次为  $\text{Mg}^{2+}$  含量, 分别占全部阳离子的 0.82% ~ 16.29%、1.16% ~ 19.37% 和 0.84% ~ 16.05%,  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  含量最低。

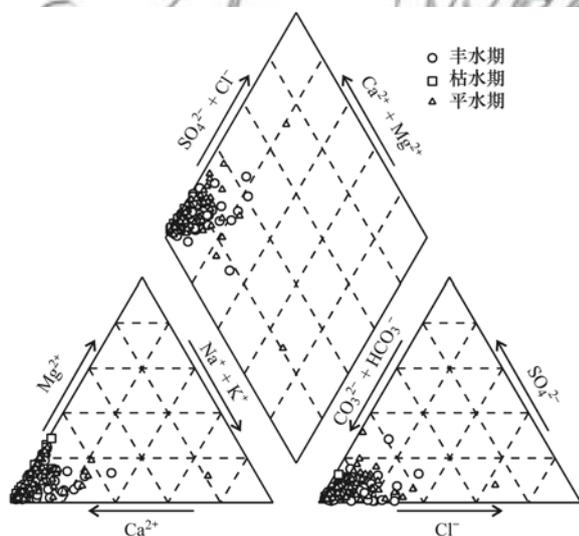


图 2 地下水主要离子 Piper 图

Fig. 2 Piper diagram of major ionic concentrations in groundwater

由于受岩溶区碳酸盐岩地层的控制, 丰水期、枯水期和平水期大部分水点的地下水化学类型为  $\text{HCO}_3-\text{Ca}$  型; 丰水期和平水期水点均出现  $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}-\text{Ca}$  和  $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4-\text{Ca}$  型,  $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}-\text{Ca}$  型水的形成主要受农业和家庭使用的  $\text{NaCl}$  的影响<sup>[24]</sup>, 水点靠近地下水排泄区, 水分流失, 盐分积累, 使得地下水含有较多  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4-\text{Ca}$  型水的形成与研究区二叠系上统合山组 ( $\text{P}_3\text{h}$ ) 紫红色薄层状铁质泥岩  $\text{FeS}_2$  溶解有关, 随着溶滤作用的进行, 较易溶的  $\text{SO}_4^{2-}$  盐类被溶入地下水<sup>[25]</sup>; 平水期水点仍有  $\text{Cl} \cdot$

$\text{NO}_3-\text{Ca}$  型, 与工业和家庭使用的  $\text{NaCl}$  和农用肥料的大量输入、大气输入、人畜的排泄物、“三废”、大面积的生物燃烧、土壤有机氮和  $\text{NH}_4^+$  离子的硝化作用转入而来有关<sup>[26]</sup>; 丰水期地下水  $\text{Cl}^-$  和  $\text{NO}_3^-$  平均质量浓度高于平水期,  $\text{Cl} \cdot \text{NO}_3-\text{Ca}$  型水未在丰水期出现, 是由于丰水期各水点中  $\text{Cl}^-$  和  $\text{NO}_3^-$  的毫克当量浓度未达到舒卡列夫分类要求的 25%, 平水期因  $\text{Cl} \cdot \text{NO}_3-\text{Ca}$  型水点数量较少, 从整体上仍表现为丰水期地下水  $\text{Cl}^-$  和  $\text{NO}_3^-$  平均质量浓度高于平水期; 枯水期水点出现  $\text{HCO}_3-\text{Ca} \cdot \text{Mg}$  型, 石炭系、二叠系、三叠系下统北泗段上统马平组白云岩、白云质灰岩、白云石化灰岩与地下水相互作用, 经溶滤作用后, 使地下水含较多的  $\text{Mg}^{2+}$  有关<sup>[27]</sup>。

### 3 讨论

#### 3.1 地下水主要离子的来源

Gibbs 模型能够清楚表示地下水中各种离子的大气输入、水岩作用及蒸发浓缩效应等起源机制和变化的趋势过程<sup>[28~31]</sup>。根据研究区岩溶地下水的 Gibbs 图(图 3), 岩溶地下水丰水期、枯水期和平水期均位于 Gibbs 图的中间位置, 说明地下水在丰水期、枯水期和平水期水化学组成、变化及起源机制具有一致性, 水岩相互作用的控制起主导作用, 主要原因是研究区内碳酸盐岩出露面积达到 91%, 地下水对碳酸盐岩的溶解作用时间较长, 水岩作用时间长, 碳酸盐岩溶蚀风化速率快<sup>[32]</sup>。

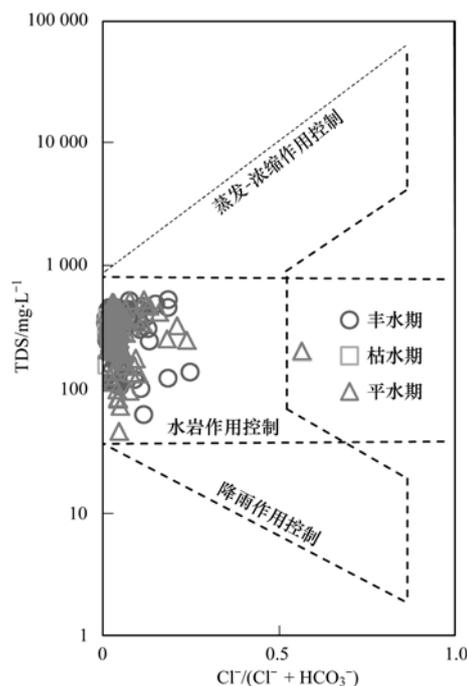
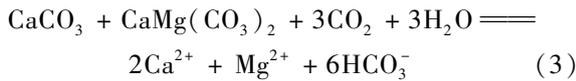
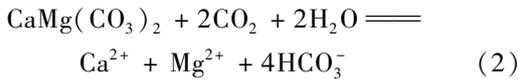


图 3 地下水的 Gibbs 图

Fig. 3 Gibbs diagram of groundwater

根据方解石、白云石和地下水的溶蚀作用方程 (1) ~ (3), 知纯方解石达到溶解平衡时  $Mg^{2+}/Ca^{2+} = 0$ , 纯白云石达到溶解平衡时  $Mg^{2+}/Ca^{2+} = 1$ , 岩溶作用中方解石和白云石达到平衡溶解时, 溶液中的  $Mg^{2+}/Ca^{2+} = 0.5$ .



根据研究区岩溶地下水  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  与  $HCO_3^-$  的变化关系(图 4), 丰水期、枯水期和平水期地下水中的溶解组分的主要来源表现出一致性, 均以方解石的溶蚀产物为主, 说明地下水中溶解组分的主要来源受季节影响小, 主要与地质背景条件有关, 研究区主要出露泥盆系下统至三叠系下统碳酸盐岩地层, 岩性以灰岩为主, 少量白云岩分布在研究区西北部, 白云岩分布范围和质量分数均较小.

根据郭昆兴等<sup>[33]</sup>在西南地区的观测结果推测, 崇左市大气输入的  $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Cl^-$ 、 $NO_3^-$  和  $SO_4^{2-}$

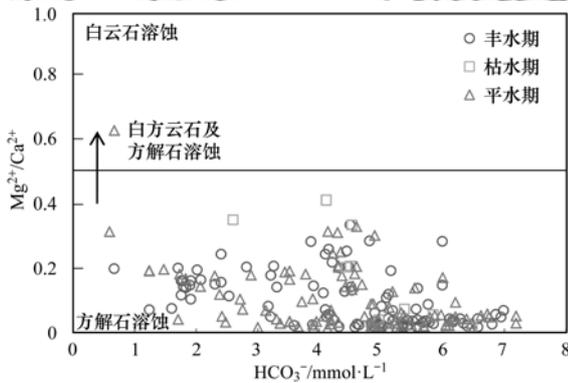


图 4 地下水中  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  与  $HCO_3^-$  的变化关系

Fig. 4 Variations of  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  vs.  $HCO_3^-$  in groundwater

质量浓度分别为 0.276、0.117、0.497、1.240 和 2.880  $mg \cdot L^{-1}$ . 研究区大部分水点的  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Cl^-$  和  $NO_3^-$  质量浓度明显高于大气输入值, 是当地大气输入值的 14 ~ 28 倍,  $SO_4^{2-}$  浓度是当地大气输入值的 4 倍. 说明  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Cl^-$ 、 $NO_3^-$  和  $SO_4^{2-}$  除来源于大气输入外, 还有其它来源. 根据研究区岩溶地下水中  $Cl^-$  与  $K^+$  的关系、 $Cl^-$  与  $Na^+$  的关系、 $Cl^-$  与  $NO_3^-$ 、 $Cl^-$  与  $SO_4^{2-}$  的关系(图 5),  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $NO_3^-$  与  $Cl^-$  存在较好的相关性, 说明  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Cl^-$  和  $NO_3^-$  有其它近似相同的来源, 造成  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Cl^-$  和  $NO_3^-$  质量浓度较高的主要来源为人类活动, 工业和家庭中 NaCl 和农用肥料的大量使用;  $Cl^-$  与  $SO_4^{2-}$  不具有相关关系, 表明大气输入不是  $SO_4^{2-}$  的主要来源, 结合研究区地质条件, 二叠系上统合山组( $P_3h$ )紫红色薄层状铁质泥岩含较多的铁矿物, 如赤铁矿( $Fe_2O_3$ )、褐铁矿( $2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$ )和针铁矿(是由含铁的矿物如黄铁矿  $FeS_2$ 、菱铁矿、磁铁矿、含铁硅酸盐等, 经氧化和分解而形成的盐类再经水解作用的产物)等,  $SO_4^{2-}$  主要来源于地层中铁质泥岩  $FeS_2$  溶解.

### 3.2 地下水离子特征控制因素

本研究采用主成分分析法和因子分析法分析研究区地下水的主要离子组成与环境之间的关系, 以便深入了解岩溶地下水主要离子组成与周围环境参数(如岩性)的关系, 进而掌握地下水化学过程<sup>[34,35]</sup>.

#### 3.2.1 因子载荷分析

根据地下水主要离子主成分方差累积量和主成分分析(表 2 和表 3), 按公共因子的特征值标准大于 1 筛选, 得到 3 个主要的公共因子, 累积方差占总方差的 74.407%. 第 1 因子占 36.986%, 与

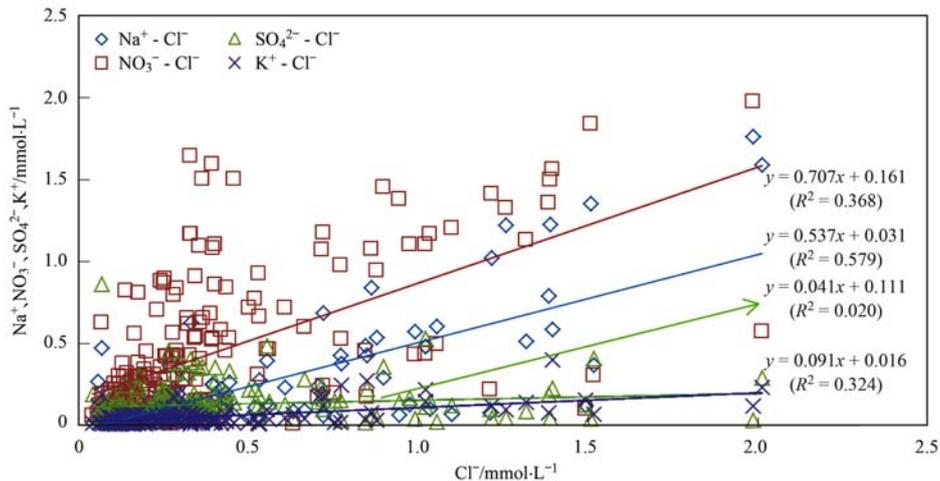


图 5 地下水中  $Cl^-$  与  $K^+$  的关系、 $Cl^-$  与  $Na^+$  的关系、 $Cl^-$  与  $NO_3^-$ 、 $Cl^-$  与  $SO_4^{2-}$  的关系

Fig. 5 Variations of  $Cl^-$  vs.  $K^+$ ,  $Cl^-$  vs.  $Na^+$ ,  $Cl^-$  vs.  $NO_3^-$ , and  $Cl^-$  vs.  $SO_4^{2-}$  in groundwater

Ca<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 相关性较大,代表碳酸盐岩的溶解,说明碳酸盐岩的溶解是控制研究区地下水化学成分的主要机制,第2因子占23.699%,与Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、K<sup>+</sup>和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>相关性较大,代表大气输入与人为活动的贡献,第三因子占13.722%,与Mg<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>相关性较大,代表地层中白云岩溶解与铁质泥岩FeS<sub>2</sub>溶解.第1因子中Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>和SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的载荷值分别为0.007、0.168、0.574、-0.454、-0.081和0.302,说明第1因子对Na<sup>+</sup>、

Cl<sup>-</sup>的贡献率较小,Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>主要来源于大气输入与人为活动的贡献,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>除来源于大气输入与人为活动的贡献外,碳酸盐溶解的贡献不可忽略,这与地层中含生物碎屑灰岩有关,碳酸盐岩溶解对Mg<sup>2+</sup>的贡献主要表现在地层中白云岩溶解,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的贡献主要表现在地层中硫化矿物FeS<sub>2</sub>溶解;第2因子中Ca<sup>2+</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>的载荷值分别为0.168和0.007,说明第2因子对Ca<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>的贡献率较小,Ca<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>主要来源于碳酸盐岩溶解.

表2 地下水主要离子主成分方差累积量<sup>1)</sup>

Table 2 Variance accumulation of major ionic concentrations in groundwater

成分	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	合计	方差/%	累积/%	合计	方差/%	累积/%	合计	方差/%	累积/%
1	2.959	36.986	36.986	2.959	36.986	36.986	2.442	30.525	30.525
2	1.896	23.699	60.685	1.896	23.699	60.685	2.337	29.202	59.735
3	1.098	13.722	74.407	1.098	13.722	74.407	1.174	14.672	74.407
4	0.914	11.429	85.836						
5	0.556	6.951	92.787						
6	0.347	4.340	97.128						
7	0.228	2.845	99.973						
8	0.002	0.027	100.000						

1) 提取方法:主成分分析

表3 地下水主要离子成分主成分分析<sup>1)</sup>

Table 3 Principal component analysis of major ionic concentrations in groundwater

变量	成分		
	1	2	3
Ca <sup>2+</sup>	0.965	0.168	0.063
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.922	0.007	0.154
Na <sup>+</sup>	0.007	0.903	-0.016
Cl <sup>-</sup>	0.168	0.894	0.050
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.574	0.639	0.035
K <sup>+</sup>	-0.454	0.521	0.274
Mg <sup>2+</sup>	-0.081	-0.023	0.777
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.302	0.117	0.680

1) 提取方法:主成分,采用具有 Kaiser 标准化的正交旋转法

### 3.2.2 因子得分分析

根据研究区岩溶地下水主要离子第1因子与第2因子得分(图6),丰水期、枯水期和平水期的地下水点在右上角、右下角、左上角和左下角均有分布.对比因子得分图(图6)以及采样点位置分布图(图1),不同时期位于因子得分图同一区域的地下水点具有相似的分布规律.丰水期和平水期分布在因子得分图左下角的地下水点数最多,分别占全部水点的35%和33.66%,枯水期分布在右上角的地下水点最多,占44.44%.

丰水期、枯水期和平水期分布在因子得分图左

下角地下水点第1、第2因子得分为负值,说明受第1、第2因子的影响相对较小,从采样点位置分布图(图1)可知,这些水点均位于研究区左江及其支流的上游,第四系桂平组和望高组砂砾石层,离村庄较远,水岩作用时间短,受碳酸盐岩溶解以及大气输入与人为活动的贡献影响较小;分布在左上角的地下水点第2因子得分高,说明地下水化学成分主要受大气输入与人为活动的贡献控制,研究区总体地势西部高、东部低、南北高、中部低,地下水分别由南、北、西这3个方向往中部的左江排泄,取样点分布于靠近研究区西南部丽江汇入左江处、北部黑水河和左江交汇处,处于进明村、红阳村、高峰村等村庄和人口密集区或靠近地下水排泄处,人类活动影响增强,受人为活动的影响较大;分布在右下角的地下水点第2因子得分为负值,水化学成分更多地受第1因子控制,这些水点分布于研究区的碳酸盐地层,与碳酸盐面积所占比例较大有关;分布在右上角的地下水点受第1、第2因子共同影响,这些水点分布于研究区的碳酸盐岩地层以及四清村、孔甲村、辉村等村庄所在地,碳酸盐面积所占比例较大,甘蔗是主要的经济作物,甘蔗生长期需要施肥,农业和家庭使用的NaCl和肥料改变了岩溶地下水的化学组分特征,影响显著<sup>[36-38]</sup>.

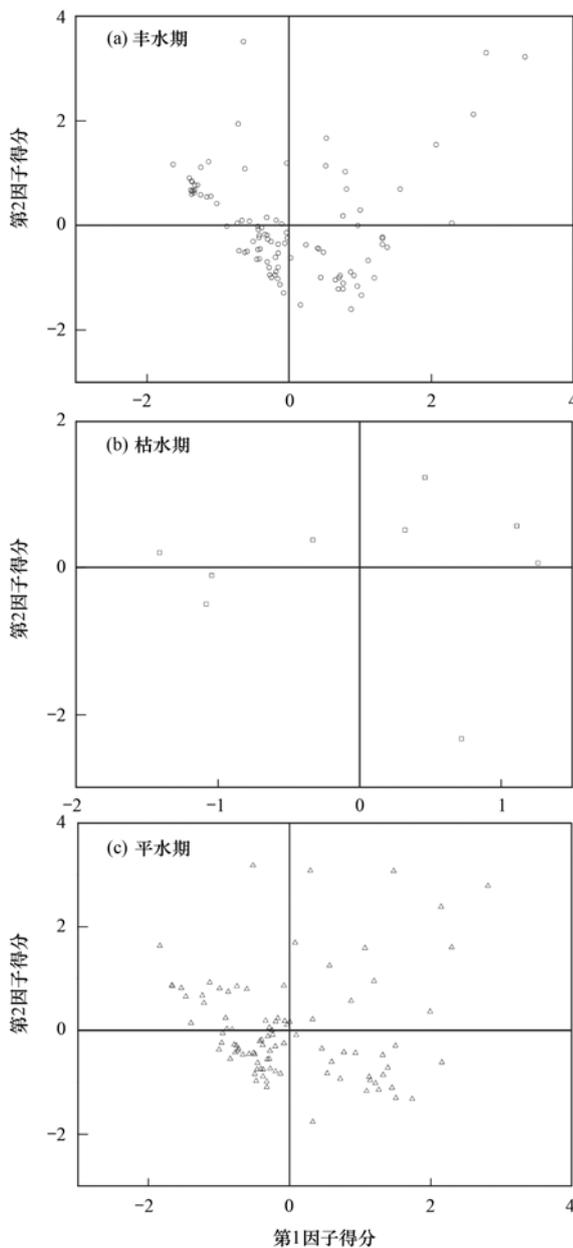


图6 地下水主要离子第1因子与第2因子得分

Fig. 6 Plots of component scores of the first two components for major ions in groundwater

#### 4 结论

(1) 崇左响水地区岩溶地下水为弱碱性淡水, 地下水中  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Cl^-$  和  $NO_3^-$  平均质量浓度均表现为丰水期 > 平水期 > 枯水期, 与丰水期大量降雨引起左江上游生活、农业污水下渗有关,  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $HCO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 、pH 值、TDS、 $TZ^+$  和  $TZ^-$  未出现明显的季节性变化, 与地下水径流长, 水岩作用时间长有关, 优势阳离子均为  $Ca^{2+}$ , 占全部阳离子的 75% 以上, 阴离子以  $HCO_3^-$  为主, 占全部阴离子的 70% 以上,  $NO_3^-$  和  $Cl^-$  次之。

(2) 由于受岩溶区碳酸盐岩地层的控制, 岩溶地下水化学类型主要以  $HCO_3^-$ -Ca 型为主, 除  $HCO_3^-$ -

Ca 型水外, 丰水期和平水期均有少部分水点为  $HCO_3^- \cdot Cl^-$ -Ca 和  $HCO_3^- \cdot SO_4^{2-}$ -Ca 型水, 平水期出现  $Cl^- \cdot NO_3^-$ -Ca 型水, 枯水期可见  $HCO_3^-$ -Ca·Mg 型水, 反映出部分水点受到地层中白云岩与铁质泥岩溶解、人类源的  $NO_3^-$  和  $Cl^-$  的影响。

(3) 岩溶地下水化学组成主要受水岩相互作用的控制, 地下水中的溶解组分的主要来源为方解石的溶蚀产物。地下水中  $Ca^{2+}$ 、 $HCO_3^-$  主要来源于碳酸盐岩灰岩的风化;  $Na^+$ 、 $Cl^-$ 、 $K^+$ 、 $NO_3^-$  主要来自大气输入与人类活动, 农业和家庭使用的 NaCl 和肥料的影响;  $Mg^{2+}$ 、 $SO_4^{2-}$  主要来源于地层中白云岩、铁质泥岩  $FeS_2$  溶解。

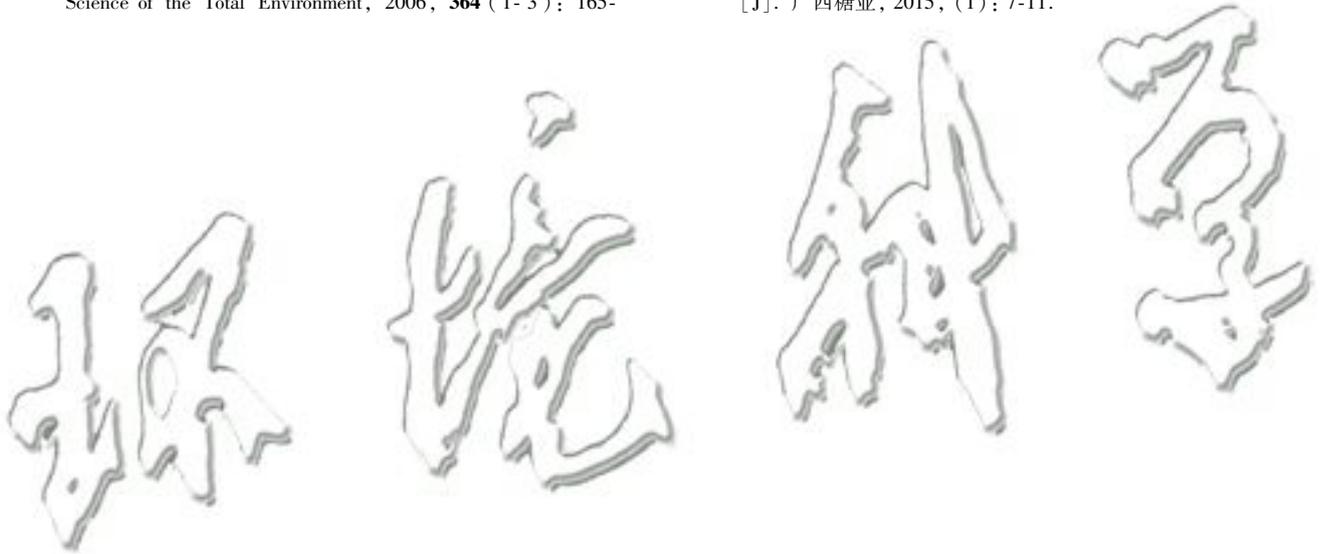
(4) 岩溶地下水在丰水期、枯水期和平水期的地下水化学组成空间分布特征与离子特征控制因素具有相似的规律。碳酸盐岩含水层的地下水主要受碳酸盐岩溶解因子控制, 进明村、四清村、红阳村、高峰村、孔甲村、辉村等村庄和人口密集区的地下水主要受大气输入与人为活动因子控制。

#### 参考文献:

- [1] Timofeeff M N, Lowenstein T K, da Silva M A M, *et al.* Secular variation in the major-ion chemistry of seawater: evidence from fluid inclusions in Cretaceous halites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, **70**(8): 1977-1994.
- [2] Moussa A B, Zouari K, Marc V. Hydrochemical and isotope evidence of groundwater salinization processes on the coastal plain of hammamet-nabeul, North-eastern Tunisia [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2011, **36**(5-6): 167-178.
- [3] 张涛, 蔡五田, 李颖智, 等. 尼洋河流域水化学特征及其控制因素[J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4537-4545.  
Zhang T, Cai W T, Li Y Z, *et al.* Major ionic features and their possible controls in the water of the Niyang River Basin [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4537-4545.
- [4] 詹兆君, 陈峰, 杨平恒, 等. 西南典型岩溶地下河系统水文地球化学特征对比: 以重庆市青木关、老龙洞为例[J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3365-3374.  
Zhan Z J, Chen F, Yang P H, *et al.* Comparison on the hydrogeochemical characteristics of typical karst groundwater system in southwest China, a case of Qingmuguan and Laolongdong in Chongqing [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3365-3374.
- [5] Hindshaw R S, Tipper E T, Reynolds B C, *et al.* Hydrological control of stream water chemistry in a glacial catchment (Damma Glacier, Switzerland) [J]. *Chemical Geology*, 2011, **285**(1-4): 215-230.
- [6] Li S Y, Lu X X, He M, *et al.* Major element chemistry in the upper Yangtze River: a case study of the Longchuanjiang River [J]. *Geomorphology*, 2011, **129**(1-2): 29-42.
- [7] 袁道先. 我国西南岩溶石山的环境地质问题[J]. *大自然探索*, 1996, **15**(4): 21-23.  
Yuan D Y. Environmental geology of karst rock mountain in southwest China [J]. *Exploration of Nature*, 1996, **15**(4): 21-23.
- [8] 于爽, 孙平安, 杜文越, 等. 人类活动影响下水化学特征的影响: 以西江中上游流域为例[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1):

- 72-79.
- Yu S, Sun P A, Du W Y, *et al.* Effect of hydrochemistry characteristics under impact of human activity: a case study in the upper reaches of the Xijiang River Basin[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 72-79.
- [9] 周婵, 吴曼菲, 钟广智, 等. 2016年广西左江流域水环境主要污染状况的分析及评价[J]. *轻工科技*, 2018, **34**(2): 87-89.
- [10] 张彬, 陈福艳, 黄婷, 等. 广西南宁市和崇左市草鱼养殖水体水质定点监测及分析[J]. *广西农业科学*, 2009, **40**(11): 1481-1485.
- Zhang B, Chen F Y, Huang T, *et al.* Fixed-point monitoring and analysis of water quality in grass carp culture environments[J]. *Guangxi Agricultural Sciences*, 2009, **40**(11): 1481-1485.
- [11] 蒋勇军, 吴月霞, Groves C, 等. 利用因子分析确定岩溶地下河系统水质的影响因素[J]. *水文地质工程地质*, 2009, **36**(4): 1-7.
- Jiang Y J, Wu Y X, Groves C, *et al.* Identification of influencing factors of groundwater quality variation using factor analysis[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2009, **36**(4): 1-7.
- [12] 卢丽, 王喆, 裴建国, 等. 红水河中上游流域岩溶地下水水质影响因素的R型因子分析[J]. *中国岩溶*, 2015, **34**(4): 415-419.
- Lu L, Wang Z, Pei J G, *et al.* R-mode analysis for influencing factors of karst groundwater quality in middle and upper reaches of the Hongshuihe river[J]. *Carsologica Sinica*, 2015, **34**(4): 415-419.
- [13] 李川琳, 黄琳. 左江流域水文特性分析[J]. *广西水利水电*, 2015, (4): 52-55.
- Li C L, Huang L. Analysis of hydrological characteristics of Zuojiang River Basin [J]. *Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering*, 2015, (4): 52-55.
- [14] 吴浩东, 胡衡生. 左江流域花山旅游景区段水环境质量趋势分析[J]. *安徽农业科学*, 2010, **38**(12): 6365-6366, 6378.
- Wu H D, Hu H S. Analysis on the water environmental quality trend in Huashan tour district of Zuo River Basin[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, **38**(12): 6365-6366, 6378.
- [15] 王艳. 左江流域土地利用/覆被变化与生态安全评价[D]. 南宁: 广西师范学院, 2010. 61.
- Wang Y. Land use/cover change and ecological safety evaluation in Zuojiang River Basin [D]. Nanning: Guangxi Normal University, 2010. 61.
- [16] 黄杰彦, 牟永红. 广西左江流域生态经济环境特征及其开发策略[J]. *沿海企业与科技*, 2007, (3): 124-126.
- Huang J Y, Mou Y H. Eco-economic environment characteristics and development strategy of Zuojiang River Basin in Guangxi[J]. *Coastal Enterprises and Science & Technology*, 2007, (3): 124-126.
- [17] Meybeck M. Pathways of major elements from land to ocean through rivers [A]. In: Martin J M, Burton J D, Eisma D (Eds.). *River Inputs to Ocean Systems*[M]. New York: United Nations Press, 1981. 18-30.
- [18] Gaillardet J, Dupré B, Lourat P, *et al.* Global silicate weathering and CO<sub>2</sub> consumption rates deduced from the chemistry of large rivers[J]. *Chemical Geology*, 1999, **159**(1-4): 3-30.
- [19] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 等. 乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1779-1787.
- Huang Q B, Qin X Q, Liu P Y, *et al.* Major ionic features and their controlling factors in the upper-middle reaches of Wujiang River[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1779-1787.
- [20] Piper A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1944, **25**(6): 914-928.
- [21] 韦虹, 吴锦奎, 沈永平, 等. 额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1345-1352.
- Wei H, Wu J K, Shen Y P, *et al.* Hydrochemical characteristics of snow meltwater and river water during snow-melting period in the headwaters of the Ertis River, Xinjiang[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1345-1352.
- [22] Brennan S T, Lowenstein T K. The major-ion composition of silurian seawater[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, **66**(15): 2683-2700.
- [23] Anshumali, Ramanathan A L. Seasonal variation in the major ion chemistry of Pandoh Lake, Mandi District, Himachal Pradesh, India[J]. *Applied Geochemistry*, 2007, **22**(8): 1736-1747.
- [24] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 等. 硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3220-3229.
- Huang Q B, Qin X Q, Liu P Y, *et al.* Influence of sulfuric acid to karst hydrochemical and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  in the upper and middle reaches of the Wujiang River[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3220-3229.
- [25] Singh A K, Mondal G C, Kumar S, *et al.* Major ion chemistry, weathering processes and water quality assessment in upper catchment of Damodar River basin, India [J]. *Environmental Geology*, 2008, **54**(4): 745-758.
- [26] 孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 等. 基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2624-2631.
- Kong X L, Wang S Q, Ding F, *et al.* Source of nitrate in surface water and shallow groundwater around Baiyangdian Lake area based on hydrochemical and stable isotopes [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2624-2631.
- [27] 马燕华, 苏春利, 刘伟江, 等. 水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4690-4699.
- Ma Y H, Su C L, Liu W J, *et al.* Identification of sulfate sources in the groundwater system of Zaozhuang: Evidences from isotopic and hydrochemical characteristics [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4690-4699.
- [28] Négre P. Geochemical study of a granitic area-the Margeride Mountains, France: chemical element behavior and  $87\text{Sr}/86\text{Sr}$  constraints[J]. *Aquatic Geochemistry*, 1999, **5**(2): 125-165.
- [29] 赵江涛, 周金龙, 梁川, 等. 新疆焉耆盆地平原区地下水演化的主要水文地球化学过程分析[J]. *环境化学*, 2017, **36**(6): 1397-1406.
- Zhao J T, Zhou J L, Liang C, *et al.* Hydrogeochemical process of evolution of groundwater in plain area of Yanqi, Xinjiang[J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(6): 1397-1406.
- [30] 张清华, 孙平安, 何师意, 等. 西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1065-1075.
- Zhang Q H, Sun P A, He S Y, *et al.* Fate and origin of major ions in river water in the Lhasa River Basin, Tibet [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1065-1075.
- [31] 寇永朝, 华琨, 李洲, 等. 泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3142-3149.

- Kou Y C, Hua K, Li Z, *et al.* Major ionic features and their possible controls in the surface water and groundwater of the Jinghe River[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3142-3149.
- [32] 孙平安, 于爽, 莫付珍, 等. 不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究: 以广西大溶江、灵渠流域为例[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 123-131.  
Sun P A, Yu S, Mo F Z, *et al.* Hydrochemical characteristics and influencing factors in different geological background: a case study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 123-131.
- [33] 郭昆兴, 韦超葳, 梁自立. 南宁市大气降水化学组成特征分析[J]. *广东化工*, 2017, **44**(3): 52-53, 61.  
Guo K X, Wei C W, Liang Z L. Characteristics of chemical composition of atmospheric precipitation in Nanning [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2017, **44**(3): 52-53, 61.
- [34] 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.
- [35] 刘博, 肖长来, 梁秀娟, 等. 吉林市城区浅层地下水污染源识别及空间分布[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(2): 457-464.  
Liu B, Xiao C L, Liang X J, *et al.* Identification of shallow groundwater pollution factors and spatial distribution in the urban areas of Jilin City[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(2): 457-464.
- [36] 陆杉, 何少清, 农宁娟. 崇左市江州区甘蔗种植业的现状与对策[J]. *广西农学报*, 2013, **28**(1): 74-77.  
Lu S, He S Q, Nong N J. Present situation and countermeasures of sugarcane planting in Jiangzhou district of Chongzuo city [J]. *Journal of Guangxi Agriculture*, 2013, **28**(1): 74-77.
- [37] 黄绍富, 黄杰基. 桂南蔗区土壤肥力现状与甘蔗测土配方施肥[A]. 见: 第二届全国测土配方施肥技术研讨会论文集[C]. 乌鲁木齐: 全国农业技术推广服务中心, 2007: 319-322.
- [38] 庞天, 张荣华, 王勇. 崇左甘蔗肥料使用状况及发展建议[J]. *广西糖业*, 2015, (1): 7-11.



## CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM <sub>2.5</sub> During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM <sub>2.5</sub> Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM <sub>2.5</sub> Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly-and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoideis</i> on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, GUO Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-kan, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiang, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH <sub>4</sub> Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)