

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.10

第40卷 第10期

目次

京津冀区域重污染期间 PM_{2.5}垂直分布及输送 肖致美, 徐虹, 李鹏, 唐遵, 陈魁, 杨宁, 郑乃源, 杨文, 邓小文 (4303)

肇庆市一次典型污染天气的污染物来源解析 常树诚, 廖程浩, 曾武涛, 杨柳林, 俞绍才, 陈雪, 郑剑平 (4310)

聊城市冬季 PM_{2.5}中水溶性化合物的昼夜变化特征及来源解析 衣雅男, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 王心培, 刘晓迪, 伏梦璇, 魏本杰 (4319)

沈阳市国三和国四排放标准不同车型柴油车 PM_{2.5}和 PM₁₀排放因子及碳组分源谱 赵雪艳, 王静, 祝胜男, 卞思思, 张宇, 王歆华, 殷宝辉, 杨文, 白志鹏 (4330)

城市生活垃圾露天焚烧排放 PM_{2.5}中重金属污染特征及其暴露健康风险 程轲, 季婉婉, 郝炜伟, 王艳, 易鹏, 支国瑞, 张佳羽, 张洋, 张诗澜 (4337)

某工业城市大气颗粒物中 PAHs 的粒径分布及人体呼吸系统暴露评估 王娟, 郭观林, 秦宁, 侯荣, 杨敏, 康艺瑾, 段小丽 (4345)

南京城市大气氨-铵的高频演化及其气粒转化机制 邵生成, 常运华, 曹芳, 林煜棋, 范美益, 谢锋, 洪一航, 章炎麟 (4355)

广州地区大气棕色碳气溶胶吸收特性 李铸杰, 谭浩波, 郑军 (4364)

郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析 张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 张瑞芹, 张猛, 于世杰, 李一丹 (4372)

基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数 梁小明, 陈来国, 孙西勃, 赵伟, 卢清, 孙家仁, 陈朋龙, 叶代启 (4382)

北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱 方莉, 刘明文, 陈丹妮, 李国昊, 王迪, 邵霞, 聂磊 (4395)

民用固体燃料源的 IVOCs 排放特征及燃烧温度的影响 卢雅静, 冯艳丽, 钱哲, 韩勇, 陈颖军 (4404)

利用地面观测资料和 AIRS 卫星资料评估 MACC 再分析臭氧数据中国地区的适用性 王闰芳, 马晓丹, 赵天良, 王红磊, 丁涵, 郑小波 (4412)

镁铝水滑石衍生复合氧化物的 COS 水解性能 魏征, 张鑫, 张凤莲, 蒋国霞, 张雨萌, 周化兵, 郝郑平, 解强 (4423)

长江源区大气降水化学特征及离子来源 汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 丁永建, 胡召富, 王利辉, 杨贵森 (4431)

连续极端降雨对东江流域水质影响分析 车蕊, 林澍, 范中亚, 李文静, 曾凡棠, 毛本健, 石雷, 黄志伟 (4440)

基于湖泊与出入湖水水质关联性研究:以鄱阳湖为例 黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽, 张波涛, 冯明雷, 陈宏文, 李晓秀, 王圣瑞 (4450)

金泽水库上游来水及库区水质变化时空分布特征 刘明坤, 童俊, 胡波, 朱慧峰, 白晓慧 (4461)

太湖不同介质电导率时空变化特征 王瑞, 代丹, 张弛, 邓义祥, 何成达, 于涛 (4469)

大型浅水湖泊磷模型参数不确定性及敏感性分析 施媛媛, 李一平, 程月, 程一鑫 (4478)

基于 MODIS 影像的洪泽湖水生植被覆盖时空变化特征及影响因素分析 李娜, 施坤, 张运林, 龚志军, 查勇, 张毅博 (4487)

草型湖区沉积物营养盐分布与污染评价 张杰, 汪院生, 郭西亚, 朱金格, 邓建才 (4497)

太湖草型湖区沉积物中生物易降解物质组成与分布规律 祁闯, 方家琪, 张利民, 司泽君, 黄和笑, 王卓森, 李翔, 王磊, 王国祥 (4505)

淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系 杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 吴晓敏, 徐慕, 王丽卿, 张玮 (4513)

岩溶区不同土地利用地下水碳同位素地球化学特征及生态意义 任坤, 潘晓东, 曾浩, 焦友军, 彭聪, 梁嘉鹏 (4523)

岩溶地下水化学对城镇化进程的时序响应 杨应增, 何守阳, 吴攀, 吴起鑫, 韩志伟, 罗维 (4532)

巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析 唐金平, 张强, 胡漾, 邵江, 何文君, 张宇 (4543)

δ-MnO₂/沸石纳米复合材料同时去除地下水中的铁锰氨氮 马文婕, 陈天虎, 陈冬, 刘海波, 程鹏, 张泽鑫, 陶琼, 张玉珠 (4553)

不同香蒲预处理方式对水平潜流人工湿地脱氮的强化效果 熊家晴, 卢学斌, 郑于聪, 王晓昌 (4562)

不同控制策略下短程硝化启动及运行工况优化 刘安迪, 赵凯亮, 刘宏, 黄利, 倪蓉, 陈永志 (4569)

启动三级 PN/A 颗粒污泥反应器处理高浓度氨氮废水 吉晓庆, 齐泽坤, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳 (4578)

聚丙烯环生物滴滤塔去除实际市政污水厂硫化氢性能及微生物群落分析 孙事昊, 贾沛沛, 陈凯琦, 彭永臻, 张亮 (4585)

典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素 冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 邢智, 魏威, 余江 (4594)

5 种典型有机磷酸酯在水-土壤界面吸附特征及影响因素 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4604)

Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 在 BS-12 两性修饰膨润土上的吸附及其交互作用 卜帅宾, 孟昭福, Sambath Yek, 张梦飞, 王腾, 任爽, 张凌恺 (4611)

滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价 洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞 (4620)

贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价 唐启琳, 刘秀明, 刘方, 汪花, 王世杰 (4628)

渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术 李娜, 贺红周, 冯爱煊, 李伟, 蒋珍茂, 魏世强 (4637)

不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选 陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 郭春霞, 钱晓雍, 顾海蓉, 胡双庆, 赵庆节, 王振旗, 付侃 (4647)

小麦和水稻对纳米硒的吸收和转运 王雅琦, 朱丽娜, 李奎, 王琪, 王康, 郭岩彬, 李花粉 (4654)

微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响 廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 王晓琳, 蒋丽娟 (4661)

药渣生物炭基质联合麦饭石对土壤-黑麦草体系的调控与机制 肖亮亮, 丁园 (4668)

磺胺甲噁唑污染土壤中微生物群落结构与抗生素抗性基因的分布特征 张海丰, 史明明, 孙艳梅, 程首涛, 高浩泽, 王旭明 (4678)

生活垃圾渗滤液处理过程中抗生素抗性基因的变化特征 黄福义, 周曙仝聃, 颜一军, 苏建强, 朱永官, 张炯 (4685)

有机肥施用量对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响 邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 李熠凡, 鲁璐, 王旭东, 张阿凤, 王彦丽 (4691)

灌水和生物炭施用对水稻土呼吸温度敏感性的影响 周鹏, 祁乐, 牛海东, 王子芳, 高明 (4700)

柑橘/大蒜盖套作下土壤 CO₂ 排放及其效率对秸秆还田量的响应 游璟, 倪九派, 黄容, 张洋, 谢德体 (4708)

增温及秸秆施用对豆-麦轮作土壤微生物量碳氮及细菌群落结构的影响 张婷婷, 陈书涛, 王君, 王朝辉, 胡正华 (4718)

O₃ 胁迫下冬小麦总初级生产力的损耗模拟 徐静馨, 郑有飞, 王圣, 王立稳, 赵秀勇, 麦博儒 (4725)

2000~2015 年中国地级市化肥使用量的时空变化特征 潘晓东, 李品, 冯兆忠, 段昌群 (4733)

《环境科学》征订启事 (4394) 《环境科学》征稿简则 (4449) 信息 (4584, 4593, 4653)

巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析

唐金平^{1,2}, 张强^{1,2*}, 胡漾³, 邵江⁴, 何文君¹, 张宇¹

(1. 成都理工大学环境与土木工程学院, 成都 610059; 2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059; 3. 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059; 4. 四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院, 成都 610041)

摘要: 为研究我国南、北岩溶发育过渡带地下水的水文地球化学特征及形成机制. 采集巴中市北部双峰垭地区 25 组地下水样品, 运用描述性统计分析、变异系数、Schoeller 图、舒卡列夫分类、Piper 图解、Gibbs 与离子比例系数等方法对研究区岩溶水化学及分布特征进行分析, 并探讨控制地下水化学演化的主要过程. 结果表明, 研究区南、北地下水存在一定的差异, 北区地下水阴阳离子以 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主, 水化学类型以 HCO_3^- -Ca-Mg 型为主, 南区地下水阴阳离子以 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 为主, 水化学类型以 HCO_3^- -Ca 型为主; 地下水水文地球化学演化过程均受水-岩作用和阳离子交替吸附作用的控制, 但对比之下南区蒸发结晶作用比北区更加强烈, 北区大气降雨作用更加显著; 气候与岩性的差异是导致研究区南、北部地下水化学存在差异的主要原因.

关键词: 岩溶地下水; 碳酸盐岩风化; 硅酸盐岩风化; 水化学特征; 巴中北部

中图分类号: X142; X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)10-4543-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.201904068

Hydrochemical Characteristics of Karst Groundwater in the Mountains of Northern Bazhong City, China

TANG Jin-ping^{1,2}, ZHANG Qiang^{1,2*}, HU Yang³, SHAO Jiang⁴, HE Wen-jun¹, ZHANG Yu¹

(1. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 4. Sichuan Province Communications Department Highway Plan, Survey, Design and Research Institute, Chengdu 610041, China)

Abstract: To study the hydrogeochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in a karst development transition zone in southern and northern China, 25 groundwater samples were collected from the Shuangfengya area in the northern part of Bazhong City. Descriptive statistics, coefficients of variation, Schoeller diagrams, Sukalev classification, Piper diagrams, and Gibbs and ion scale coefficients were used to analyze the karst water chemistry and distribution characteristics. The main processes controlling the chemical evolution of the groundwater are also discussed. The research shows that the degree of groundwater mineralization in the study area is generally low, with mostly neutral water and alkaline water. There are some differences in groundwater between the northern and southern regions; the anions and cations in the groundwater in the northern area were mainly HCO_3^- , Ca^{2+} , and Mg^{2+} , with HCO_3^- -Ca-Mg being the main water chemistry type; the anions and cations in the groundwater in the southern area were mainly HCO_3^- , and Ca^{2+} , and HCO_3^- -Ca was the main water chemistry type. The chemical character of groundwater was controlled by rock weathering and alternate cation adsorption, and evaporation crystallization in the southern region was more significant than in the northern region. Furthermore, rainfall in the northern region had a more significant effect on groundwater geochemistry than in the south. The differences in climate and lithology between the northern and southern region are the dominant factors influencing the differences in hydrochemistry.

Key words: karst groundwater; carbonate weathering; silicate weathering; hydrochemical characteristics; Northern Bazhong City

在径流过程中, 地下水与不同的岩石接触并发生各种地球化学作用, 将导致水中的化学成分随之变化, 而表现出不同的化学特征^[1]. 对地下水的化学特征进行研究, 能够重塑该地区的水文地质历史, 反映各种因素对地下水的影响^[2-4]. 我国岩溶面积达 $344.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中北方分布面积约占 29%, 南方分布面积约占 71%. 由于地层岩性、地质构造以及气候等一系列的因素, 我国南北方岩溶发育特征存在较大差异性. 众多学者分别对南、北岩溶地下水发育规律、化学特征以及敏感性等进行了广泛的研究^[5-8]. 罗飞等^[9]对武冈市某岩溶丘陵

地区地下水化学特征与地球化学敏感性进行分析, 武冈地区地下水离子以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主, 且发现岩溶地下水地球化学敏感性较高. 盛婷等^[10]以重庆金佛山水房泉为研究对象, 探明其泉水的主要离子来源与地球化学敏感强度, 发现水房泉水化学类型为 HCO_3^- -Ca 型和 HCO_3^- -Cl-Ca 型, 且水化学对人类活动的影响十分敏感; 樊连

收稿日期: 2019-04-08; 修订日期: 2019-05-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472275); 四川交通科技项目(2013 C10-2)

作者简介: 唐金平(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水文地质和环境地质, E-mail: 928401079@qq.com

* 通信作者, E-mail: zhangqiang-cdut@qq.com

杰等^[11]对重庆南川地区岩溶地下水水化学特征进行分析,发现方解石与白云石的共同溶解是 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的最主要来源;袁建飞等^[12]对毕节市北部岩溶地下水进行分析,结果显示该区域内地下水类型主要有 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型、 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型和 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型,离子主要来源为碳酸盐岩的溶解。Wu 等^[6]对贵州西南盆地岩溶地下水进行研究,该区域内地下水以浅含水层中的 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型和深层含水层中的 $\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型为特征;张超等^[13]对肥城市岩溶水化学时空特征与形成机制进行研究,该地区地下水类型主要为 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型,演化过程主要受方解石和石膏的溶滤作用影响;黄奇波等^[14]对山西柳林岩溶泉地下水的演化规律进行研究,该区域内地下水化学类型随径流途径和深度的不断增加而不断变化;王珺瑜等^[15]对济南泉域岩溶地下水水化学特征与成因进行分析,发现水化学演化受到溶滤作用与人类活动的双重影响;王焰新等^[16]对北方最大岩溶泉之一的娘子关泉水进行分析,表明娘子关泉水的水化学特征受矿坑水的混合作用影响明显。这些研究成果为岩溶地下水研究提供了宝贵的经验与借鉴,但仍未见与南、北岩溶发育过渡带地下水水文地球化学有关的研究报道。

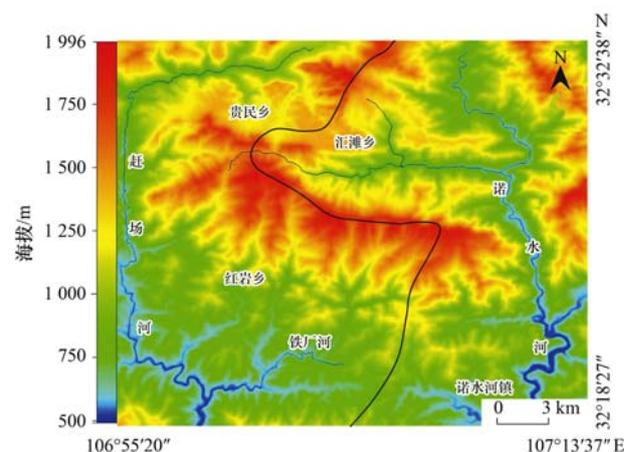
巴中市北部双峰垭地区地处四川与陕西两省交界地段,岩溶地貌、系统均发育完整,几乎所有岩溶地貌类型均在此出露,完整地反映了岩溶地貌形成的全过程,兼具南、北方岩溶发育的特点,是我国南、北方岩溶地貌过渡带具有代表性的区域。该区域内人类活动强度较低,基本可以忽略人为因素对地下水化学演化过程的干扰,是研究南、北过渡带地下水化学特征与演化的理想区域。本文采用地统计学法^[17]和离子比值^[18]等方法对双峰垭地区地下水进行研究,分析其地下水化学特征与形成机制,以期对南、北岩溶过渡带地下水资源的开发利用和保护提供借鉴与依据。

1 研究区概况

研究区位于四川省与陕西省交界处,四川盆地东北部边缘部位,占地面积约 666.1 km^2 。地势总体上呈中间高四周低(图1),呈东~西向展布,发育有大量的复式褶皱及揉皱,如牛角嵌背斜和铁厂河背斜等地形地貌受地质构造和岩性控制明显,峰林、峰丛和石芽较为发育,局部形成岩溶锥形山体和垅岗洼地等地貌。研究区属亚热带湿润季风气候区,多年平均气温 $16.2\text{ }^\circ\text{C}$,多年平均降水量 $1\ 250.7\text{ mm}$,年内降水多集中在夏、秋两季,占全年降水总

量的 78%。受地理位置、地形地貌等因素的影响,降雨量的空间分布特点呈现由南向北随着海拔高程的增加而递增趋势,总体表现为降水量北大于南,而气温南高于北的特征。大气降雨与地表河流的补给是地下水的主要来源,研究区属赶场河与诺水河流域,地表水系发育,诺水河位于研究区东侧,由北向南流动,河谷陡峭,赶场河位于研究区西侧,亦由北至南流动,河流切割较深,多呈“V”字形峡谷。

研究区由中部的志留系砂岩、炭质页岩和砂质页岩(S_2lr 、 S_1ln)组成的隔水层分割为南北两个区域(图2),北部区域(北区)地下水类型主要有碳酸盐岩岩溶水、变质岩裂隙水与岩浆岩裂隙水;地层主要为晋宁期石英闪长岩(δ)、火地垭群麻窝子组(Pt_m)、震旦系灯影组(Zbd)、寒武系郭家坝组(C_1g)与孔明洞组(C_1k)等;岩溶发育程度较低,含水介质主要为溶蚀裂隙。南部区域(南区)地下水类型主要为碳酸盐岩岩溶水与碎屑岩层间裂隙水;地层主要为寒武系中统陡坡寺组(C_2d)和下统孔明洞组(C_1k)、二叠系上统吴家坪组(P_2w)、下统茅口+栖霞组($\text{P}_1\text{m} + \text{P}_1\text{q}$)、三叠系上统须家河组(T_3x)、中统嘉陵江组(T_2j)、下统铜街子组+飞仙关组($\text{T}_1\text{t} + \text{T}_1\text{f}$)、侏罗系中统千佛岩组(J_2q)与白田坝组(J_1b)等;岩溶发育程度中等至强烈,落水洞、溶洞与地下暗河等广泛分布。



图例 □ 流域界线(左侧为赶场河流域,右侧为诺水河流域)

图1 研究区地形与水系分布示意

Fig. 1 Topography and hydrology in the study area

2 样品采集与测试

研究小组于2017年8月对双峰垭地区地下水进行野外采集。由于岩溶山区特殊的地形地貌与水文地质条件,取样点多分布于地下水径流区与排泄区,分布位置如图2所示。共采集地下水样25组(南13组和北12组),且取样点编号按照高程升

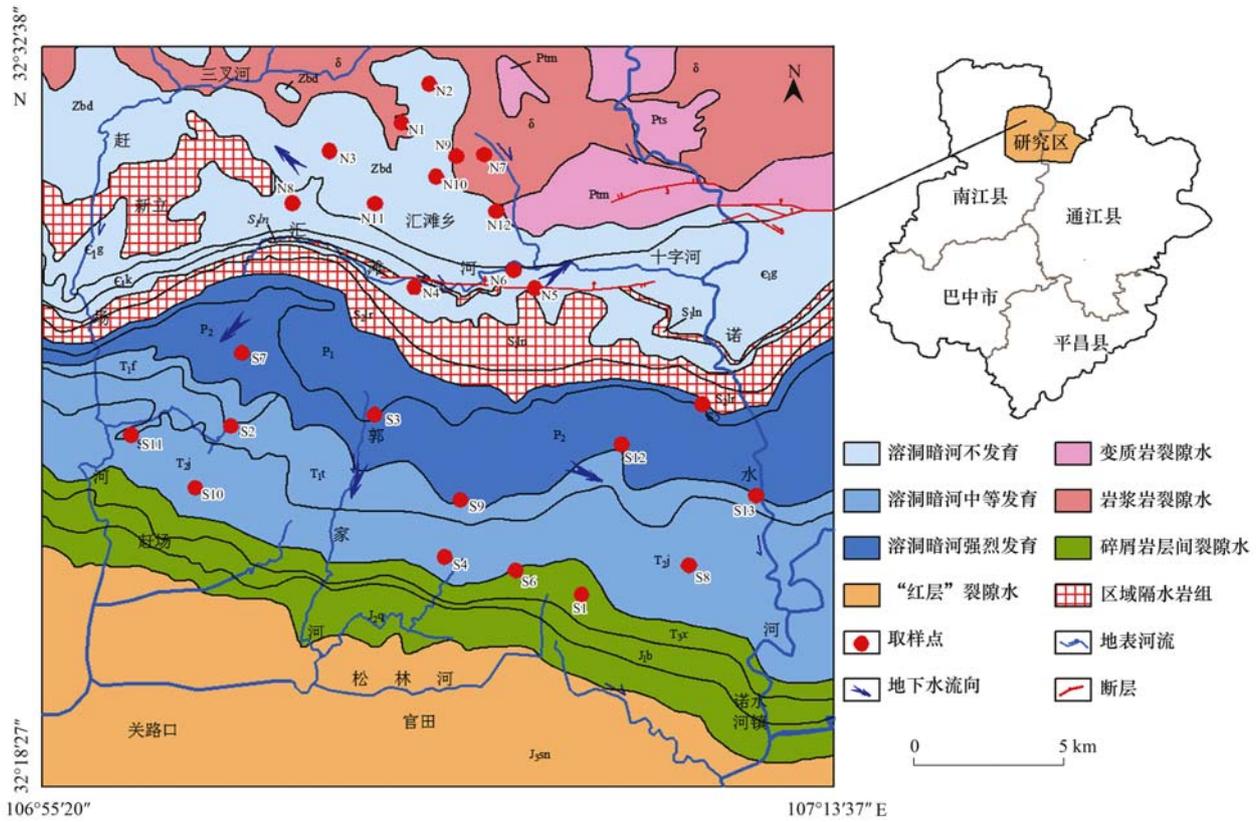


图2 研究区水文地质与取样点位置示意
Fig. 2 Hydrogeology map and sampling sites in the study area

序. pH 指标由调查人员现场完成测定, 用于测定金属阳离子 (Na^+ 和 Ca^{2+} 等) 的水样在使用 $0.45 \mu\text{m}$ 纸过滤后添加高纯硝酸酸化至 $\text{pH} \leq 2$; 用于测定阴离子与 TDS 等指标的水样过滤后直接封装进取样瓶中送至实验室完成检测. 本次测试指标包括 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、TDS 与 pH 等常规指标. 最终化学测试的准确性使用

Aquachem 软件进行离子平衡误差计算, 确保测试误差低于 5%.

3 结果与讨论

3.1 地下水化学特征

地下水化学测试的结果与统计分析如表 1 所示, 并绘制了地下水化学参数的箱线图(图 3).

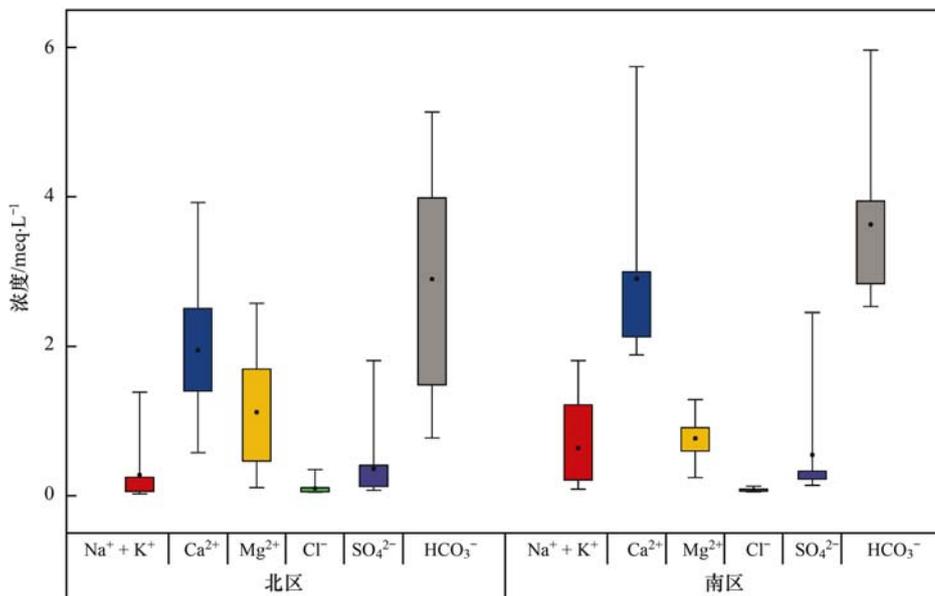


图3 研究区地下水化学参数箱线图

Fig. 3 Box-plot of groundwater chemical parameters in the study area

表 1 岩溶地下水主要离子含量及统计分析

Table 1 Chemical composition and summary statistics for karstic groundwater

分区	编号	高程 /m	Na ⁺ + K ⁺ /meq·L ⁻¹	Ca ²⁺ /meq·L ⁻¹	Mg ²⁺ /meq·L ⁻¹	Cl ⁻ /meq·L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ /meq·L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ /meq·L ⁻¹	TDS /mg·L ⁻¹	pH	
北区	N01	701	0.14	1.96	1.93	0.05	0.13	3.84	191.40	8.31	
	N02	811	0.14	1.58	1.43	0.06	0.12	2.97	150.40	7.95	
	N03	822	0.08	3.43	1.59	0.05	0.08	4.97	247.10	7.9	
	N04	922	1.39	3.92	0.69	0.16	1.81	4.03	334.50	7.9	
	N05	968	0.03	1.70	0.11	0.35	0.48	1.01	102.40	7.78	
	N06	1 159	0.82	1.23	0.88	0.07	0.64	2.22	155.20	7.64	
	N07	1 222	0.22	0.75	0.53	0.06	0.07	1.36	73.40	6.8	
	N08	1 223	0.28	1.68	1.25	0.11	0.22	2.88	157.60	7.66	
	N09	1 254	0.12	0.58	0.23	0.11	0.13	0.78	51.90	6.59	
	N10	1 358	0.03	2.76	2.57	0.08	0.16	5.13	254.00	7.47	
	N11	1 431	0.03	1.58	0.40	0.05	0.34	1.62	104.40	7.75	
	N12	1 710	0.09	2.25	1.81	0.05	0.16	3.94	198.70	8.23	
	平均值	—	—	0.28	1.95	1.12	0.10	0.36	2.89	168.42	7.67
	中值	—	—	0.13	1.69	1.07	0.07	0.16	2.93	156.40	7.77
标准差	—	—	0.39	0.96	0.73	0.08	0.47	1.45	78.65	0.49	
变异系数	—	—	1.40	0.49	0.66	0.82	1.29	0.50	0.47	0.06	
南区	S01	569	1.31	2.21	0.60	0.06	0.28	3.78	212.60	8.05	
	S02	663	0.09	2.33	0.84	0.06	0.17	3.03	161.70	8.02	
	S03	689	1.66	5.74	0.56	0.12	1.88	5.96	436.40	7.22	
	S04	718	0.47	2.79	0.72	0.06	0.18	3.13	200.00	8.01	
	S05	766	0.29	2.13	0.60	0.05	0.24	2.53	153.10	8.09	
	S06	779	0.42	2.91	0.91	0.06	0.30	3.94	216.50	7.72	
	S07	849	1.81	3.89	0.68	0.09	2.45	3.84	365.90	7.55	
	S08	860	0.09	1.89	1.01	0.07	0.39	2.53	150.60	7.99	
	S09	890	0.17	2.05	0.80	0.05	0.14	2.83	149.60	7.68	
	S10	962	0.21	4.30	1.29	0.13	0.22	5.45	288.10	7.25	
	S11	988	0.30	2.99	1.01	0.07	0.29	3.94	215.70	7.77	
	S12	1 012	0.25	2.34	0.24	0.05	0.25	2.53	146.50	8.16	
	S13	1 016	1.22	2.13	0.72	0.10	0.33	3.64	209.90	7.39	
	平均值	—	—	0.64	2.90	0.77	0.07	0.55	3.63	223.58	7.76
中值	—	—	0.30	2.34	0.72	0.06	0.28	3.64	209.90	7.77	
标准差	—	—	0.60	1.08	0.25	0.03	0.70	1.03	86.03	0.31	
变异系数	—	—	0.94	0.37	0.32	0.35	1.28	0.29	0.38	0.04	

研究区北区地下水 pH 值介于 6.59~8.31, 均值 7.67. 根据文献[19]的分类, 约 83.3% 的水样为中性水 ($6.5 < \text{pH} < 8$), 16.7% 为碱性水 ($\text{pH} > 8$); TDS 含量介于 51.9~334.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 普遍较低, 均属于淡水范畴^[19]; 阴阳离子浓度 ($\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$) 关系为 $\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Cl}^-$; 阴离子以 HCO_3^- 为主, 占阴离子总浓度的 86%, 阳离子以 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主, 分别占阳离子总浓度的 58% 和 33%. 研究区南区地下水 pH 值介于 7.22~8.16, 均值 7.76, 约 61.5% 的水样为中性水, 38.5% 为碱性水; TDS 含量介于 146.5~436.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 同属于淡水范畴; 阴阳离子浓度 ($\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$) 关系为 $\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$; 阴离子以 HCO_3^- 为主, 占阴离子总浓度的 85%, 阳离子以 Ca^{2+} 为主, 占阳离子总浓度的 67%.

从变异系数看^[20], 南区主要离子的变异系数与北区相比偏小, 反映出南区含水层岩性的空间差异性相比于北区更低. 在各区域内部对比, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量的变异系数均较小, 反映出碳酸盐岩的广泛分布, 而 SO_4^{2-} 和 Na^+ 的变异系数偏大, 则可能与岩浆岩或菱铁矿的分布格局有关. 可通过 Schoeller 图^[21]反映地下水的化学变化趋势与形成过程的相似性(图 4). 南区地下水各参数的变化趋势基本一致, 表明该区域内地下水的化学演化过程应相似, 进一步说明南区内含水层的岩性相对单一; 北区地下水各参数的变化差异性较大, 基本不处于平行的状态, 说明北区内地下水的化学演化过程更为复杂.

按照苏卡列夫地下水化学类型分类, 北区地下水化学类型包括 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Na}$ 和 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 分别占北区样本数的

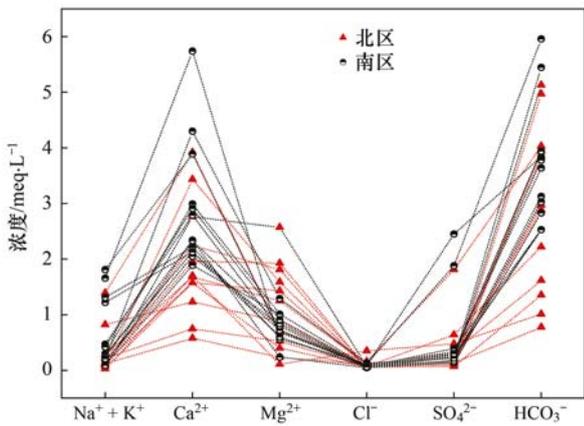


图 4 研究地下水主要离子 Schoeller 图

Fig. 4 Schoeller diagram for the major ions of groundwater in the study area

67%、17%、8% 和 8%；南区地下水化学类型有 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 分别占南区样本数的 54%、23%、15% 和 8%。在 Piper 图^[22,23] 的主菱形图与阴离子三角图中(图 5)，离子的分布不存在明显的差异，反映出研究区内地下水化学组分来源与碳酸盐岩溶解关系密切。研究区地下含水层岩性以碳酸盐岩为主，岩溶发育明显，地下水循环较为迅速，表明地下水化学类型与含水层岩性及地质条件具有密切地联系。在阳离子三角图中，南区地下水更偏向于 Ca^{2+} 端元，而北区则倾向于 $0.5 \times \text{Mg}^{2+}$ 端元。这表明南、北区内地下水的阳离子来源可能存在着一定的差异。

3.2 控制因素

地下水化学组分的演化往往受到水-岩作用、

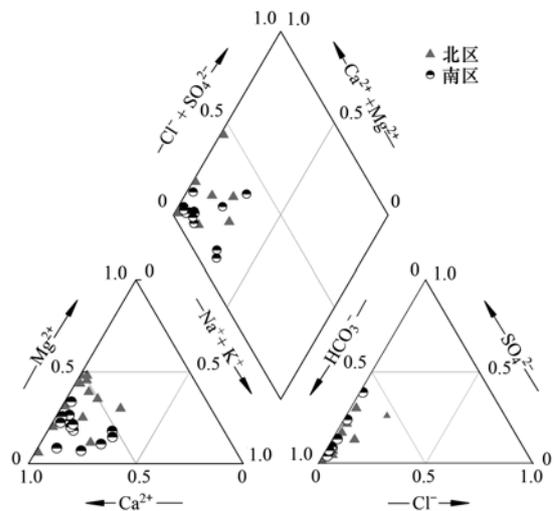


图 5 南/北部研究区地下水 Piper 图

Fig. 5 Piper diagram for groundwater in the southern and northern parts of the study area

蒸发浓缩、大气降雨和人类活动的影响^[2,24]。根据实地调查，研究区属深切切割高山峡谷地貌，人类活动强度较低，生活饮用是该区内地下水的最主要用途，基本可以忽略人为因素对地下水化学演化过程的影响。因此，人类活动对地下水的影响，本文不予讨论。Gibbs 等^[25,26] 对世界主要水体化学组分进行研究并绘制 Gibbs 图(图 6)，以反映水-岩作用、蒸发浓缩和大气降雨等对水化学演化过程的影响程度。

地下水在 Gibbs 图上的分布显示出研究区地下水的形成主要是受到了岩石风化作用的影响。相对而言，南区地下水倾向于蒸发结晶作用，而北区地下水更偏向于大气降雨作用。这表明气候的差异对

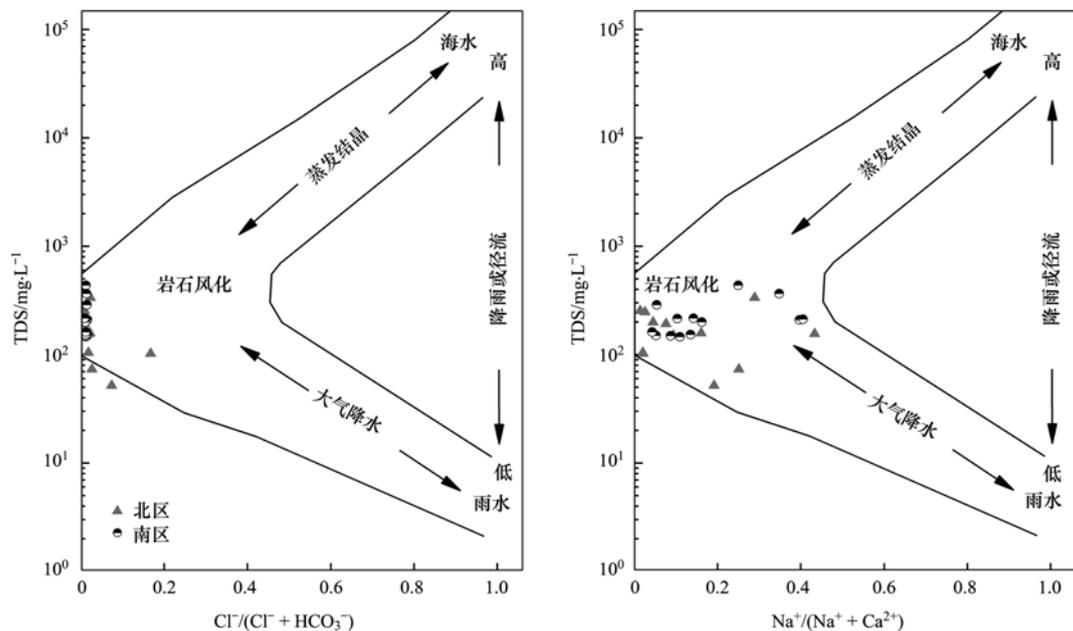


图 6 研究区地下水 Gibbs 图

Fig. 6 Gibbs plots for groundwater in the study area

地下水的化学演变具有一定的影响作用, 气温越高, 蒸发结晶作用越强烈; 降雨越丰富, 大气降雨的影响更突出。

阳离子交替吸附作用对地下水化学演化亦具有一定的控制影响。通常, 阳离子交替吸附是 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与 Na^+ 、 K^+ 之间的交换, 由此可用 $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]^*$ (即 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}$) 与 $[\text{Na}^+ + \text{K}^+]$ (即 $\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-$) 的当量变化来反映该过程^[27]。图 7 中北区地下水均很好地分布于 $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]^* / [\text{Na}^+ + \text{K}^+]^* = -1$ 比值线上, 说明该区域内地下水均发生了阳离子的交换。而南区中有少部分的地下水偏离 -1 比值线, 这可能受到了外来物源的影响。利用氯碱指数^[28]来进一步反映阳离子交替吸附作用的方向和强度。在图 8 中, 南区地下水 CAI-I 与 CAI-II 均为负值, 说明发生的是岩土体中的 Na^+ 、 K^+ 与水体中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的交换。北区大部分地下水(75%)氯碱指数均为负值, 但少数(25%)地下水 CAI-I 与 CAI-II 均为正值, 表明有反向的离子交换过程进行。从交换强度上看, 阳离子交替吸附作用在南区地下水中相对于北区更加显著, 意味着南部地区可能存在更多松散堆积物。当然, 地下水的酸碱性和对阳离子的交替吸附作用也有一定的影响, 南区地下水 pH 值相对北区更低, 因此这也可能是导致这一现象的因素之一。

3.3 离子比值

Gibbs 图显示出地下水化学的演化主要受到了水-岩相互作用的控制。风化物源一般包括碳酸盐岩、硅酸盐岩与蒸发岩盐^[29]。在图 9 中碳酸盐岩风化作用类型控制的水样点落于比值接近 $\text{HCO}_3^- / \text{Na}^+ = 120$ 、 $\text{Ca}^{2+} / \text{Na}^+ = 50$ 而 $\text{Mg}^{2+} / \text{Na}^+ = 10$ 的区域内; 硅酸盐岩风化作用控制的水样点落于比值分别接近 2 ± 1 、 0.35 ± 0.15 与 0.24 ± 0.12 附近区域;

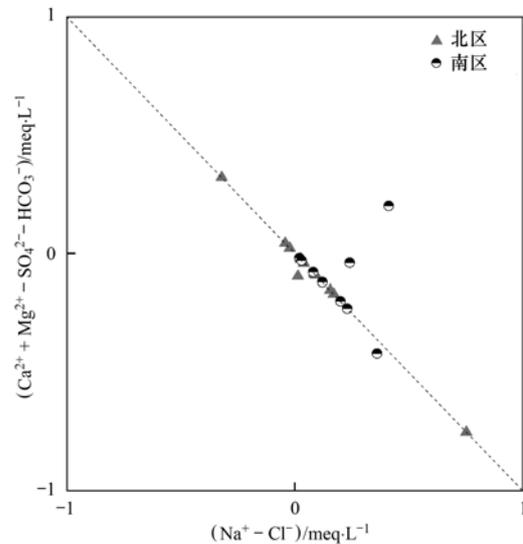


图 7 研究区地下水阳离子交替吸附作用

Fig. 7 Cation exchange and adsorption of groundwater in the study area

而蒸发盐岩通常位于图 9 中左下角。研究区地下水均分布于硅酸盐岩与碳酸盐岩风化端元之间, 表明该区域内蒸发盐岩风化对地下水的化学演化影响较低。同时, 南区 $\text{HCO}_3^- / \text{Na}^+$ 与 $\text{Mg}^{2+} / \text{Na}^+$ 相对略低于北区, 说明南区硅酸盐岩的风化相对于北区更加强烈。

有研究表明, 来源于碳酸盐岩与硅酸盐岩中的微量含钙矿物对地下水的化学组成具有重要的控制意义^[30,31]。但与碳酸盐岩相比, 硅酸盐岩与酸的反应活性很低, 因此可忽略硅酸盐岩风化所产生的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 等离子^[32]。在自然界中, 碳酸与硫酸均广泛参与了岩石的风化过程。若仅碳酸参与溶解, 则 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 HCO_3^- 当量比应为 1, SO_4^{2-} 与 HCO_3^- 当量比应为 0; 反之, 仅硫酸参与溶解的条件下, $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 HCO_3^- 当量比为 2, SO_4^{2-} 与 HCO_3^- 当量比应为 1^[33,34]。图 10(a)中地下

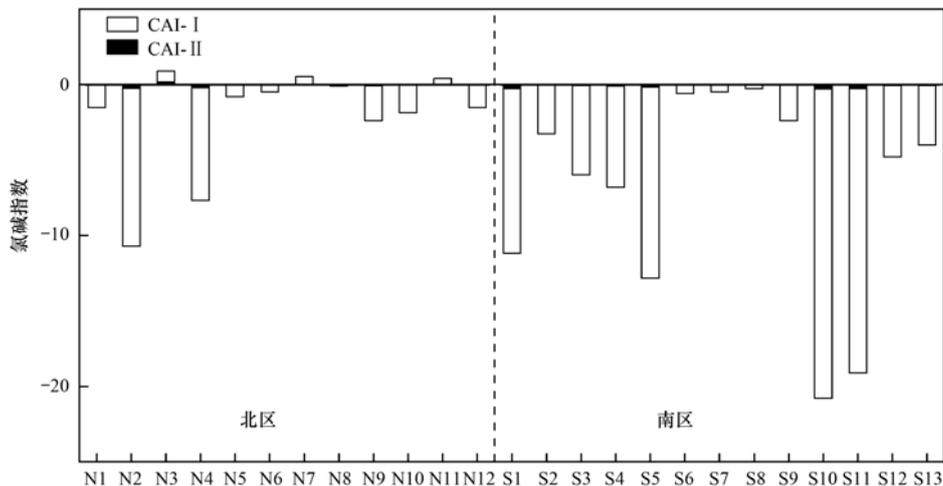


图 8 研究区地下水氯碱指数

Fig. 8 Chlor-alkali index of groundwater in the study area

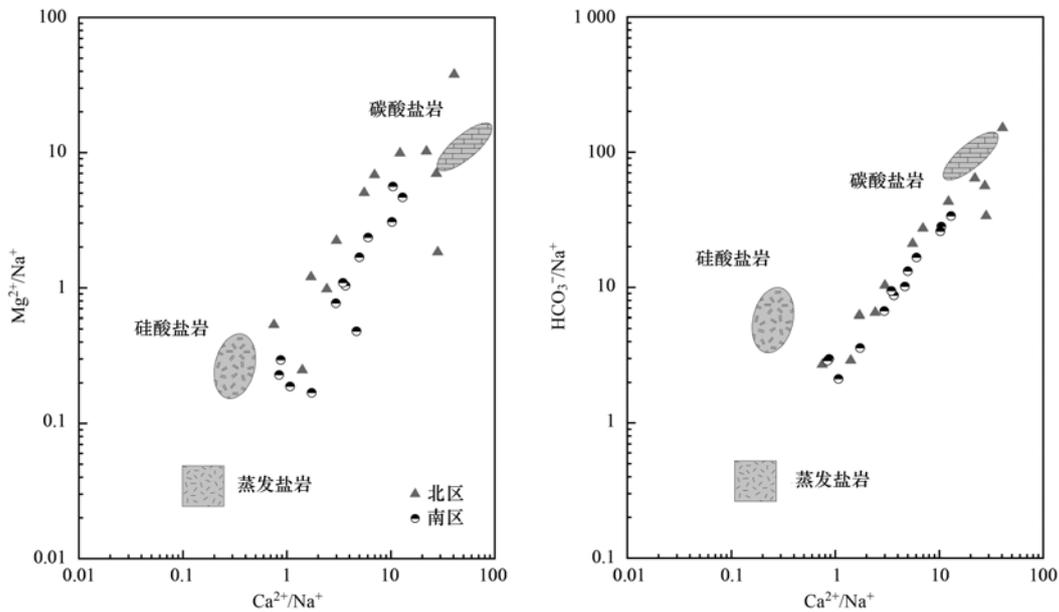
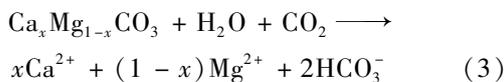
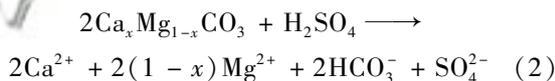
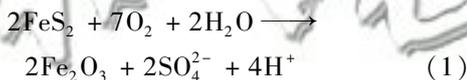


图9 研究区岩石风化溶解相对贡献

Fig. 9 Relative contribution of weathering and dissolution of rocks

水分布于 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^- = 1$ 比值线附近但略偏向于左侧, 表明 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的来源为碳酸盐岩的风化溶解, 且主要是风化过程为碳酸风化碳酸盐岩. SO_4^{2-} 与 HCO_3^- 当量比值介于 0~1 之间[图 10(b)], 且 SO_4^{2-} 含量多小于 $1 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$, 较低的离子浓度说明硫酸的来源并不广泛, 主要是大气沉降或地层中少量含硫矿物的氧化:



在南区地下水中 HCO_3^- 与 SO_4^{2-} 的含量相对北区更高[图 10(b)], 说明两者之间存在一定风化差异. 当地下水中仅白云岩溶解时, $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+} = 1$; 仅石灰石溶解时, $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+} = 0$; 当两者同时参与溶解时, $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+} = 0.5$ ^[35]. 在图 10(c) 中, 南区地下水几乎均分布于 0.5 比值线以下, 说明石灰石的风化溶解在该区域内占主要的贡献地位; 而北区地下水的分布较为分散, 说明白云岩与石灰石的风化溶解贡献程度相似, 进而反映出北区地下含水层岩性相对南区更加复杂和多样化.

图 10(d) 地下水多分布于 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) = 1$ 比值线附近且偏下方的位置, 说明还需要少量 Na^+ 和 K^+ 等阳离子的平衡. 图 10(e) 中约 88% 的地下水分布于雨水线 ($\text{Na}^+/\text{Cl}^- = 0.86$) 的上方^[36,37], 说明 Na^+ 和 K^+ 除了来源于大

气降雨外还有其它来源; 12% 的地下水分布于雨水线下方, 北区部分地下水发生反向的阳离子交替吸附作用, 且 Cl^- 的含量没有明显的变化, 因此阳离子的反向交换是导致这一现象的主要原因. Cl^- 的含量介于 $0.05 \sim 0.35 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 较低的含量可以认为其主要来源于大气降水. 由此, 可以用 $\text{Na}^+ + \text{K}^+ - 0.86\text{Cl}^-$ 来表示除大气降雨以外的 Na^+ 和 K^+ , 图 10(f) 中 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+ - 0.86\text{Cl}^-$ 与 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 浓度呈线性相关, R^2 分别为 0.9869(南区)、0.9998(北区), 说明硫酸与碳酸不仅参与了碳酸盐岩的溶解, 同时对其他岩类(如钠长石、钾长石等硅酸盐岩)的溶解也具有一定的贡献. 前文可以知道, 在研究区内蒸发岩盐风化对地下水化学演化的影响可以忽略, 因此硅酸盐岩的溶解与阳离子交替吸附作用是 Na^+ 和 K^+ 的主要来源途径.

4 结论

(1) 研究区地下水矿化度普遍较低, TDS 含量介于 $51.9 \sim 436.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 平均值为 7.71, 多为中性水, 少量为碱性水. 北区地下水矿化度相对低于南区, 水化学类型包括 $\text{HCO}_3^- \text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4 \text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3^- \text{-Ca}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Na}$ 和 $\text{HCO}_3^- \text{-Ca}$, 阴离子以 HCO_3^- 为主, 占阴离子总浓度的 86%, 阳离子以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主, 分别占阳离子总浓度的 58%、33%; 南区地下水化学类型有 $\text{HCO}_3^- \text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3^- \text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3^- \text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 和 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4 \text{-Ca}\cdot\text{Na}$, 阴离子以 HCO_3^- 为主, 占阴离子总浓度的 85%, 阳离子以 Ca^{2+} 为主, 占阳离子总浓度的 67%.

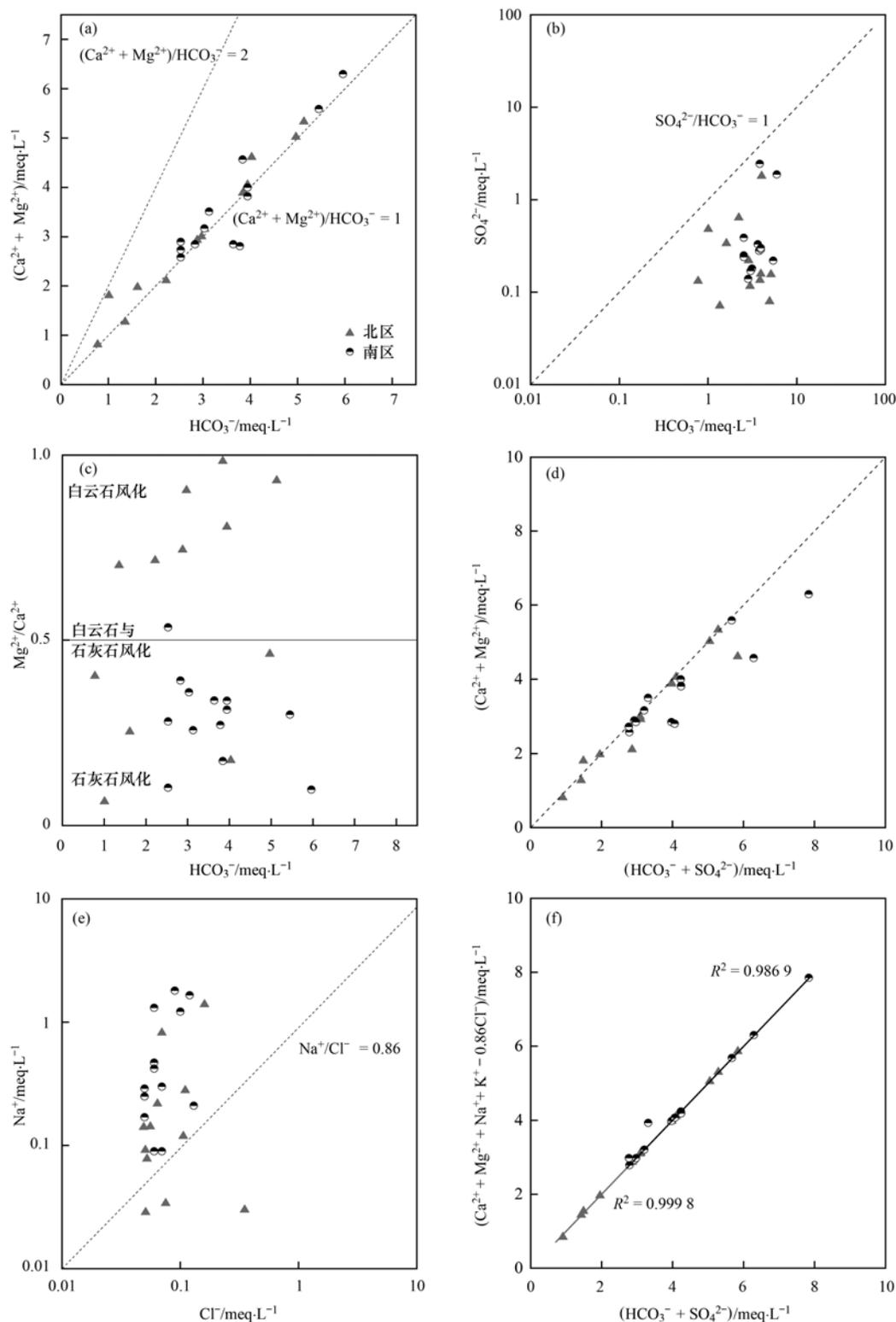


图 10 主要离子比例关系

Fig. 10 Series plots of the proportion of key ions

(2) 研究区地下水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于碳酸岩盐的溶解, 南区以石灰石的风化为主, 北区以白云岩的风化溶解为主、次之为石灰石; Na^+ 和 K^+ 主要来源于钠长石、钾长石等硅酸盐岩的溶解. 碳酸与硫酸均参与了研究区岩石的风化溶解, 含硫矿物的氧化是硫酸的主要来源.

(3) 研究区地下水化学成因主要受到岩石风化作用的控制, 而大气降雨和蒸发结晶的影响相对微弱. 南、北区域对比发现, 气候的差异使得南区地下水化学演化受到蒸发结晶作用的影响比北区更加显著, 而北区大气降雨作用的影响更加突出.

(4) 此外, 阳离子交替作用对地下水的化学组

分亦有一定的影响, 南区氯碱指数均为负值, 北区 75% 的地下水氯碱指数为负值, 表明 Na^+ 和 K^+ 的另一来源为与岩土体中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 发生的离子交换作用。

致谢: 感谢高旭波老师, 秦榛、李太双、时晓、李红叶、曹文瀚、彭琪、朱志强和曾开帅等同门师兄在野外样品采集和室内资料整理及论文写作方面提供帮助。

参考文献:

- [1] 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 等. 新疆喀什三角洲地下水 SO_4^{2-} 化学特征及来源[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3550-3558.
Wei X, Zhou J L, Nai W H, *et al.* Chemical characteristics and sources of groundwater sulfate in Kashgar Delta, Xinjiang[J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3550-3558.
- [2] Xing L N, Guo H M, Zhan Y H. Groundwater hydrochemical characteristics and processes along flow paths in the North China Plain[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, **70-71**: 250-264.
- [3] Adams S, Titus R, Pietersen K, *et al.* Hydrochemical characteristics of aquifers near Sutherland in the Western Karoo, South Africa[J]. Journal of Hydrology, 2001, **241**(1-2): 91-103.
- [4] 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.
- [5] 张雅, 苏春利, 马燕华, 等. 水化学和环境同位素对济南东源饮用水源地地下水演化过程的指示[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2667-2674.
Zhang Y, Su C L, Ma Y H, *et al.* Indicators of groundwater evolution processes based on hydrochemistry and environmental isotopes: A case study of the Dongyuan drinking water source area in Ji'nan City[J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2667-2674.
- [6] Wu P, Tang C Y, Zhu L J, *et al.* Hydrogeochemical characteristics of surface water and groundwater in the karst basin, southwest China[J]. Hydrological Processes, 2009, **23**(14): 2012-2022.
- [7] Pu J B, Yuan D X, Zhang C, *et al.* Hydrogeochemistry and possible sulfate sources in karst groundwater in Chongqing, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, **68**(1): 159-168.
- [8] Wang J L, Jin M G, Jia B J, *et al.* Hydrochemical characteristics and geothermometry applications of thermal groundwater in northern Jinan, Shandong, China[J]. Geothermics, 2015, **57**: 185-195.
- [9] 罗飞, 苏春田, 潘晓东, 等. 典型岩溶丘陵区地下水水化学特征及地球化学敏感性分析——以武冈东部地区为例[J]. 中国岩溶, 2018, **37**(2): 211-217.
Luo F, Su C T, Pan X D, *et al.* Hydrochemical characteristics and geochemical sensitivity of groundwater in typical karst hilly regions: A case study of Eastern Wugang[J]. Carsologica Sinica, 2018, **37**(2): 211-217.
- [10] 盛婷, 杨平恒, 陈峰, 等. 典型岩溶泉主要化学成分来源及地球化学敏感性研究[J]. 中国岩溶, 2018, **37**(6): 827-834.
Sheng T, Yang P H, Chen F, *et al.* Study on sources of chemical elements and geochemical susceptibility of a typical karst spring[J]. Carsologica Sinica, 2018, **37**(6): 827-834.
- [11] 樊连杰, 裴建国, 邹胜章, 等. 重庆市南川区南部岩溶地下水水文地球化学特征[J]. 中国岩溶, 2017, **36**(5): 697-703.
Fan L J, Pei J G, Zou S Z, *et al.* Hydrogeochemical characteristics of karst groundwater in southern Nanchuan district of Chongqing[J]. Carsologica Sinica, 2017, **36**(5): 697-703.
- [12] 袁建飞, 邓国仕, 徐芬, 等. 毕节市北部岩溶地下水水文地球化学特征[J]. 水文地质工程地质, 2016, **43**(1): 12-21.
Yuan J F, Deng G S, Xu F, *et al.* Hydrogeochemical characteristics of karst groundwater in the northern part of the city of Bijie[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, **43**(1): 12-21.
- [13] 张超, 张保祥, 张吉圣, 等. 肥城市岩溶水水化学特征及形成机制[J]. 中国岩溶, 2018, **37**(5): 698-707.
Zhang C, Zhang B X, Zhang J S, *et al.* Analysis of hydrochemical characteristics and formation mechanism of karst water in Feicheng City[J]. Carsologica Sinica, 2018, **37**(5): 698-707.
- [14] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 等. 柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2132-2142.
Huang Q B, Qin X Q, Liu P Y, *et al.* Regional evolution and control factors of karst groundwater in Liulin Spring catchment[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2132-2142.
- [15] 王珺瑜, 王家乐, 靳孟贵. 济南泉域岩溶水水化学特征及其成因[J]. 地球科学, 2017, **42**(5): 821-831.
Wang J Y, Wang J L, Jin M G. Hydrochemical characteristics and formation causes of karst water in Jinan Spring Catchment[J]. Earth Science, 2017, **42**(5): 821-831.
- [16] 王焰新, 高旭波. 人类活动影响下娘子关岩溶水系统地球化学演化[J]. 中国岩溶, 2009, **28**(2): 103-112.
Wang Y X, Gao X B. Geochemical evolution of the Niangziguan karst water system under the impact of human activities[J]. Carsologica Sinica, 2009, **28**(2): 103-112.
- [17] Güler C, Kurt M A, Alpaslan M, *et al.* Assessment of the impact of anthropogenic activities on the groundwater hydrology and chemistry in Tarsus coastal plain (Mersin, SE Turkey) using fuzzy clustering, multivariate statistics and GIS techniques[J]. Journal of Hydrology, 2012, **414-415**: 435-451.
- [18] LI P Y, Qian H, Wu J H, *et al.* Geochemical modeling of groundwater in southern plain area of Pengyang County, Ningxia, China[J]. Water Science and Engineering, 2010, **3**(3): 282-291.
- [19] GB/T 14157-1993, 水文地质术语[S].
GB/T 14157-1993, Hydrogeologic terminology[S].
- [20] Zhou F Y, Sun S Q, Molnar J J. Evaluation of the Development of circular agriculture in Sichuan Province based on the coefficient of variation[J]. Asian Agricultural Research, 2015, **7**(3): 56-60.
- [21] Schoeller H. Géochimie des eaux souterraines; application aux eaux des gisements de pétrole[M]. Paris: Société des éditions Technip, 1956.
- [22] Piper A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses[J]. Eos, Transactions, American Geophysical Union, 1944, **25**(6): 914-928.
- [23] Zhou P P, Wang Z M, Zhang J Y, *et al.* Study on the hydrochemical characteristics of groundwater along the Taklimakan Desert Highway[J]. Environmental Earth Sciences,

- 2016, **75**(20): 1378.
- [24] 唐金平, 张强, 胡漾, 等. 漓江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 3089-3098.
Tang J P, Zhang Q, Hu Y, *et al.* Groundwater chemical characteristics and controlling factors analysis in alluvial fan of Jianjiang River [J]. Environmental Science, 2019, **40**(7): 3089-3098.
- [25] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. Science, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [26] Gibbs R J. Water chemistry of the Amazon River [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1972, **36**(9): 1061-1066.
- [27] Xiao J, Jin Z D, Wang J, *et al.* Hydrochemical characteristics, controlling factors and solute sources of groundwater within the Tarim River Basin in the extreme arid region, NW Tibetan Plateau [J]. Quaternary International, 2015, **380-381**: 237-246.
- [28] Thakur T, Rishi M S, Naik P K, *et al.* Elucidating hydrochemical properties of groundwater for drinking and agriculture in parts of Punjab, India [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, **75**(6): 467.
- [29] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, *et al.* Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers [J]. Chemical Geology, 1999, **159**(1-4): 3-30.
- [30] Oliva P, Dupré B, Martin F, *et al.* The role of trace minerals in chemical weathering in a high-elevation granitic watershed (Estibère, France): chemical and mineralogical evidence [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2004, **68**(10): 2223-2243.
- [31] Meybeck M. Global occurrence of major elements in rivers [J]. Treatise on Geochemistry, 2003, **5**: 207-223.
- [32] 韩贵琳, 唐杨, 谭秋. 喀斯特森林雨水的地球化学特征——以贵州茂兰国家级自然保护区为例 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, **27**(4): 363-368.
Han G L, Tang Y, Tan Q. Geochemical composition of rainwater in karst forest: Case study of Maolan Nature Reserve, Guizhou Province [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2008, **27**(4): 363-368.
- [33] 徐森, 李思亮, 钟君, 等. 赤水河流域水化学特征与岩石风化机制 [J]. 生态学杂志, 2018, **37**(3): 667-678.
Xu S, Li S L, Zhong J, *et al.* Hydrochemical characteristics and chemical weathering processes in Chishui River Basin [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, **37**(3): 667-678.
- [34] Anderson S P, Drever J I, Frost C D, *et al.* Chemical weathering in the foreland of a retreating glacier [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, **64**(7): 1173-1189.
- [35] 蒲俊兵, 袁道先, 蒋勇军, 等. 重庆岩溶地下水水文地球化学特征及环境意义 [J]. 水科学进展, 2010, **21**(5): 628-636.
Pu J B, Yuan D X, Jiang Y J, *et al.* Hydrogeochemistry and environmental meaning of Chongqing subterranean karst streams in China [J]. Advances in Water Science, 2010, **21**(5): 628-636.
- [36] Dixon W, Chiswell B. The use of hydrochemical sections to identify recharge areas and saline intrusions in alluvial aquifers, southeast Queensland, Australia [J]. Journal of Hydrology, 1992, **135**(1-4): 259-274.
- [37] Jiang Y J, Cao M, Yuan D X, *et al.* Hydrogeological characterization and environmental effects of the deteriorating urban karst groundwater in a karst trough valley: Nanshan, SW China [J]. Hydrogeology Journal, 2018, **26**(5): 1487-1497.

CONTENTS

Vertical Distribution and Transport of PM _{2.5} During Heavy Pollution Events in the Jing-Jin-Ji Region	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Peng, <i>et al.</i> (4303)
Source Apportionment of Air Pollutants for a Typical Pollution Event in Zhaoqing	CHANG Shu-cheng, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (4310)
Diurnal Variations and Source Analysis of Water-soluble Compounds in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (4319)
Emission Characteristics of Exhaust PM and Its Carbonaceous Components from China III to China IV Diesel Vehicles in Shenyang	ZHAO Xue-yan, WANG Jing, ZHU Sheng-nan, <i>et al.</i> (4330)
Characteristics of Heavy Metal Pollutants of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste (MSW) and the Associated Exposure Health Risks	CHENG Ke, JI Wan-wan, HAO Wei-wei, <i>et al.</i> (4337)
Size Distribution Characteristics and Inhalation Exposure of Particle-Bound PAHs in an Industrial City	WANG Juan, GUO Guan-lin, QIN Ning, <i>et al.</i> (4345)
High-frequency Evolution of Urban Atmospheric Ammonia and Ammonium and Its Gas-to-Particle Conversion Mechanism in Nanjing City	SHAO Sheng-cheng, CHANG Yun-hua, CAO Fang, <i>et al.</i> (4355)
Optical Absorption Properties of Brown Carbon Aerosols in Guangzhou	LI Zhu-jie, TAN Hao-bo, ZHENG Jun (4364)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Zhengzhou	ZHANG Yi-xiang, YIN Sha-sha, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (4372)
Raw Materials and End Treatment-based Emission Factors for Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent Use Sources	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SUN Xi-bo, <i>et al.</i> (4382)
Source Profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent-based Industries in Beijing	FANG Li, LIU Wen-wen, CHEN Dan-ni, <i>et al.</i> (4395)
Emission Characteristics of IVOCs from the Combustion of Residential Solid Fuels and the Impact of Burning Temperature	LU Ya-jing, FENG Yan-li, QIAN Zhe, <i>et al.</i> (4404)
Evaluation of MACC Reanalysis Ozone Data over China Using Ground-based and AIRS Satellite Observations	WANG Run-fang, MA Xiao-dan, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (4412)
Hydrolysis of COS over MgAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	WEI Zheng, ZHANG Xin, ZHANG Feng-lian, <i>et al.</i> (4423)
Chemical Characteristics and Ionic Sources of Precipitation in the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, WU Jing-kui, <i>et al.</i> (4431)
Effects of Continuous Extreme Rainfall on Water Quality of the Dongjiang River Basin	CHE Rui, LIN Shu, FAN Zhong-ya, <i>et al.</i> (4440)
Correlation Analysis of Water Quality Between Lake Inflow and Outflow: A Case Study of Poyang Lake	HUANG Dong-ling, NI Zhao-kui, ZHAO Shuang, <i>et al.</i> (4450)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of the Water Quality in the Jinze Reservoir and Its Inflow	LIU Ming-kun, TONG Jun, HU Bo, <i>et al.</i> (4461)
Temporal and Spatial Variations in the Conductivity in Different Media in Taihu Lake, China	WANG Rui, DAI Dan, ZHANG Chi, <i>et al.</i> (4469)
Uncertainty and Sensitivity Analysis of Phosphorus Model Parameters in Large Shallow Lakes	SHI Yuan-yuan, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (4478)
Spatio-temporal Variations in Aquatic Vegetation Cover and the Potential Influencing Factors in Lake Hongze Based on MODIS Images	LI Na, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4487)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of a Macrophyte-Dominated Zone in Lake Taihu	ZHANG Jie, WANG Yuan-sheng, GUO Xi-ya, <i>et al.</i> (4497)
Composition and Distribution of Biodegradable Compounds in the Macrophyte Dominated Zone of Lake Taihu	QI Chuang, FANG Jia-qi, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (4505)
Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai	DU Cai-li, YANG Li, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (4513)
Geochemical Characteristics and Ecological Significance of Carbon Isotopes in Groundwater Under the Influence of Different Land Use Types in Karst Areas	REN Kun, PAN Xiao-dong, ZENG Jie, <i>et al.</i> (4523)
Temporal Response of Subterranean Karst Stream Hydrochemistry to Urbanization	YANG Ying-zeng, HE Shou-yang, WU Pan, <i>et al.</i> (4532)
Hydrochemical Characteristics of Karst Groundwater in the Mountains of Northern Bazhong City, China	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (4543)
Removal of Fe(II), Mn(II), and NH ₄ ⁺ -N by Using δ-MnO ₂ Coated Zeolite	MA Wen-jie, CHEN Tian-hu, CHEN Dong, <i>et al.</i> (4553)
Strengthening Effect of Different Cattail Pretreatment Methods on the Denitrification of Horizontal Subsurface Flow in a Constructed Wetland	XIONG Jia-qing, LU Xue-bin, ZHENG Yu-cong, <i>et al.</i> (4562)
Short-cut Nitrification Start-up and Optimization of Operating Conditions Under Different Control Strategies	LIU An-di, ZHAO Kai-liang, LIU Hong, <i>et al.</i> (4569)
Start-up of a Three-stage PNA Granular Sludge Reactor for Treating Wastewater with High Concentrations of Ammonia	Ji Xiao-qing, Qi Ze-kun, Qian Fei-yue, <i>et al.</i> (4578)
Removal of Hydrogen Sulfide Produced in a Municipal WWTP Using a Biotrickling Filter with Polypropylene Rings as the Packing Material and Microbial Community Analysis	SUN Shi-hao, JIA Ti-pei, CHEN Kai-qi, <i>et al.</i> (4585)
Characteristics and Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Typical Industrial Areas of Chengdu	RAN Zong-xin, CHEN Jin-yu, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (4594)
Absorption Characterization and the Identification of Factors Influencing Five Organophosphate Esters in Water-Soil System	HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, WEI Shi-qiang (4604)
Adsorption and Interaction of Cu ²⁺ and Pb ²⁺ on BS-12 Amphoteric Modified Bentonites	BU Shuai-bin, MENG Zhao-fu, Sambath Yek, <i>et al.</i> (4611)
Concentration Characteristics, Source Analysis, and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Peak-cluster Depression Area, Southeast of Yunnan Province	HONG Tao, KONG Xiang-sheng, YUE Xiang-fei (4620)
Cd Accumulation and Risk Assessment for Arable Soils in the Karst Region of Northern Luodian, Guizhou	TANG Qi-lin, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (4628)
Safe Utilization of Paddy Soils Lightly Polluted with Cadmium in Western Chongqing	LI Na, HE Hong-zhou, FENG Ai-xuan, <i>et al.</i> (4637)
Accumulation of Cd in Different Crops and Screening of Low-Cd Accumulation Cultivars	CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, BAI Yu-jie, <i>et al.</i> (4647)
Absorption and Transportation of Selenium Nanoparticles in Wheat and Rice	WANG Ya-qi, ZHU Li-na, LI Kui, <i>et al.</i> (4654)
Effects of Microplastics on the Growth, Physiology, and Biochemical Characteristics of Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	LIAO Yuan-chen, Nazgul-Jahitbek, LI Mei, <i>et al.</i> (4661)
Regulation and Mechanism of a Dregs Biochar Matrix Combined with Maifanite on a Soil-Ryegrass System	XIAO Liang-liang, DING Yuan (4668)
Microbial Community Structure and the Distribution of Antibiotic Resistance Genes in Soil Contaminated by Sulfamethoxazole	ZHANG Hai-feng, SHI Ming-ming, SUN Yan-mei, <i>et al.</i> (4678)
Dynamics of Antibiotic Resistance Genes During the Municipal Solid Waste Leachate Treatment	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, YAN Yi-jun, <i>et al.</i> (4685)
Effects of Manure Application Rates on the Soil Carbon Fractions and Aggregate Stability	SHAO Hui-yun, LI Zi-yue, LIU Dan, <i>et al.</i> (4691)
Effects of Irrigation and Biochar Application on the Respiratory Temperature Sensitivity of Paddy Soil	ZHOU Peng, QI Le, NIU Hai-dong, <i>et al.</i> (4700)
Response of Soil CO ₂ Emissions to Straw-returning in Citrus/Mushroom Intercropping Systems	YOU Jing, NI Jiu-pai, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4708)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Bacterial Community Structure	ZHANG Ting-ting, CHEN Shu-tao, WANG Jun, <i>et al.</i> (4718)
Simulated Ozone Damage on Gross Primary Productivity (GPP) in a Winter Wheat Field	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, WANG Sheng, <i>et al.</i> (4725)
Spatial and Temporal Variations in Fertilizer Use Across Prefecture-level Cities in China from 2000 to 2015	PAN Xiao-dong, LI Pin, FENG Zhao-zhong, <i>et al.</i> (4733)