

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



2020

Vol.41 No.9
第41卷 第9期

目次

2020年天津市两次重污染天气污染特征分析.....肖致美,徐虹,蔡子颖,李鹏,刘彬,元洁,郑乃源,唐迦,陈魁,邓小文(3879)

基于高分辨率MARGA分析成都市PM_{2.5}中水溶性离子污染特征.....尹寒梅,陈军辉,冯小琼,姜涛,钱骏,刘政(3889)

宿迁市PM_{2.5}中水溶性无机离子的季节特征和来源分析.....
.....马红璐,赵欣,陆建刚,王辉,许纯领,欧阳琰,朱新胜,殷堂兵,漆丹,陆亚秋,汪玖阳,陆声兴(3899)

鼎湖山大气颗粒物中OC与EC的浓度特征及粒径分布.....李安娜,温天雪,华维,杨员,孟泽,胡波,辛金元(3908)

鞍山市道路扬尘碳组分特征及来源解析.....林孜,姬亚芹,林宇,国纪良,马妍,赵静琦(3918)

西安市冬季PM_{2.5}中WSOC的光谱特性和来源解析.....杨毅,张亚楠,刘焕武,田萍萍,李亚飞,雷颖,王一博(3924)

长三角地区气溶胶光学性质与新粒子生成观测.....
.....杜盈盈,陈军,张家洛,甘桂城,刘瑜存,苏明旭,楼晟荣,周敏,陶士康,乔利平(3932)

连云港市挥发性有机化合物的组分特征及来源解析.....崔金梦,王体健,李秋潼,董立文,黄丛吾,曹云擎(3941)

成都市城区大气VOCs季节污染特征及来源解析.....王成辉,陈军辉,韩丽,徐晨曦,王波,李英杰,刘政,钱骏(3951)

德州市夏季臭氧敏感性特征及减排方案.....严茹莎(3961)

超低改造下中国火电排放清单及分布特征.....屈加豹,王鹏,伯鑫,薛晓达,董广霞,崔磊,康明雄,王彤,汤铃,朱法华,李时蓓(3969)

浙江省人为源氨排放清单建立及分布特征.....赵睿东,于兴娜,侯新红,沈丽(3976)

垃圾焚烧烟气中二噁英控制技术的评估与筛选.....赵思岚,奚鹏飞,郭凤艳,邓双,贾建丽(3985)

兰州市两场典型降水事件稳定同位素特征及其水汽来源.....韩婷婷,张明军,王圣杰,杜勤勤,马转转,郭蓉,曹晏风(3993)

然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素.....张涛,王明国,张智印,刘廷,何锦(4003)

河套灌区地下水化学演变特征及形成机制.....崔佳琪,李仙岳,史海滨,孙亚楠,安海军,邢进平(4011)

石期河流域地下水化学特征及物质来源分析.....李笑,于爽,李亮,郭永丽(4021)

长江中下游湖泊水体氮磷比时空变化特征及其影响因素.....季鹏飞,许海,詹旭,朱广伟,邹伟,朱梦圆,康丽娟(4030)

2016~2017年长荡湖流域湖库系统营养盐时空分布机制分析.....李新艳,李恒鹏,姜三元,马培,赖锡军,邓建才,陈东强,耿建伟(4042)

菹草对湖泊水质及浮游植物群落结构的影响.....康丽娟,许海,邹伟,朱广伟,朱梦圆,季鹏飞,陈洁(4053)

金泽水库库区细菌群落构建过程与关键驱动因子分析.....刘明坤,童俊,朱慧峰,白晓慧(4062)

典型氟工业园周边河流沉积物中全(多)氟化合物的分布特征.....孙琳婷,赵祯,唐建辉(4069)

微塑料对河水抗生素抗性基因的影响.....周昕原,王言仔,苏建强,黄福义(4076)

莲花水库水体中抗生素污染特征及生态风险评价.....廖杰,魏晓琴,肖燕琴,李青松,范洪勇,刘学军,庄马展,刘超翔(4081)

拟柱孢藻生长及碱性磷酸酶活性对不同磷浓度和磷形态响应的株系间差异.....叶金梅,赵莉,罗旭,彭亮,雷腊梅(4088)

奶水河湿地植物作用及调水水质响应模拟.....李亚娟,杜彦良,毕二平,王亮,陈翠柏(4095)

浅基质层干植草沟运行效果的现场实验.....张佳炜,李田,张庭秀(4105)

海绵城市地块汇水区颗粒污染物的传输.....李佳,谢文霞,姜智绘,单溪环,廖云杰,赵洪涛,李叙勇(4113)

天然黄铁矿吸附去除水中Sb(V):性能与机制.....石松,吴乾元,李新正,黄满红(4124)

过硫酸盐氧化处理含砷磷酸废水.....章晋门,卢钧,刘晓琛,陈泉源(4133)

温度对城市污水厌氧生物滤池运行效果与菌群结构的影响.....刘智斌,刘秀红,周桐,章世勇,李健敏,杨庆(4141)

ABR-MBR耦合工艺启动及优化反硝化除磷性能.....缪新年,汪倩,郭凯成,刘文如,沈耀良(4150)

低温下全自养脱氮颗粒污泥适应低基质效能.....刘雨馨,王建芳,钱飞跃,陈倩苗,乔伟,沈聪(4161)

雄安新区土壤重金属地球化学监测关键问题探讨.....郭志娟,周亚龙,杨峥,赵传冬,成杭新,孔牧,彭敏(4169)

基于土壤重金属及PAHs来源的人体健康风险定量评价:以北京某工业污染场地为例.....
.....吴志远,张丽娜,夏天翔,贾晓洋,李慧颖,王世杰(4180)

基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价.....
.....张富贵,彭敏,王惠艳,马宏宏,徐仁廷,成晓梦,侯召雷,陈子万,李括,成杭新(4197)

云南兰坪铅锌矿区优势植物重金属富集特性及应用潜力.....张龙,张云霞,宋波,吴勇,周子阳(4210)

水培试验下水稻Pb吸收累积关键生育期.....胡雨丹,周航,辜娇峰,霍洋,邓鹏辉,魏宾缤,刘俊,廖柏寒(4218)

田间条件下养分调控八宝景天Cd修复效率.....郭俊梅,杨俊兴,杨军,郑国砥,周小勇,陈同斌,卞建林,孟晓飞,李玉峰(4226)

桉树枝条生物炭输入对桂北桉树人工林酸化土壤的作用效果.....
.....段春燕,沈育伊,徐广平,滕秋梅,张德楠,何成新,张中峰,周龙武,孙英杰(4234)

秸秆直接还田和炭化还田对红壤酸度、养分和交换性能的动态影响.....杨彩迪,卢升高(4246)

土壤微生物群落结构对生活源和工业源再生水灌溉的差异化响应.....王燕,程东会,檀文炳,余红,席北斗,姜永海,党秋玲(4253)

粪肥和有机肥施用对稻田土壤微生物群落多样性影响.....理鹏,吴建强,沙晨燕,叶春梅,黄沈发(4262)

松花江下游沿江湿地土地利用变化对土壤细菌群落多样性的影响.....张拓,徐飞,怀宝东,杨雪,隋文志(4273)

黄土高原草地土壤细菌群落结构对于降水变化的响应.....李娜,王宝荣,安韶山,焦峰,黄倩(4284)

土地利用方式对会仙岩溶湿地土壤真菌群落和功能类群的影响.....程跃扬,靳振江,王晓彤,贾远航,袁武,周军波(4294)

黑土真菌群落互作及其与梯度有机质碳分子结构的关系.....尚秋彤,黄瑞林,倪浩为,隋跃宇,孙波,梁玉婷(4305)

贵州茂兰喀斯特森林不同演替下土壤真核微生物多样性.....王显,龙健,李娟,刘灵飞,廖洪凯,李宜蓉,杨睿(4314)

玉米秸秆生物炭固化细菌对镉砷吸附.....刘玉玲,朱虎成,彭鸥,李丹阳,杨蕊蕊,彭晶,铁柏清(4322)

无机态氮素转化机制及水土体氮源识别方法.....梁杏,孙立群,张鑫,张洁,付鹏宇(4333)

《环境科学》征订启事(4061) 《环境科学》征稿简则(4132) 信息(4233, 4293, 4304)

石期河流域地下水化学特征及物质来源分析

李笑^{1,2}, 于爽^{2*}, 李亮^{1*}, 郭永丽²

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541006; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 国土资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 为明确典型岩溶溶丘洼(谷)地区地下水化学特征及其成因,以石期河流域为研究对象,运用 Gibbs 图、Piper 图、端元分析及离子比例系数等方法,对地下水水化学特征及物质来源进行了定性和定量分析. 结果表明,研究区内地下水 pH 值介于 6.06~8.07 之间, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 是地下水中的主要离子,其质量浓度范围分别为 2.61~108.7、0.54~27.61 和 8.1~370.74 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,符合岩溶水高钙弱碱性特征;地下水物质成分中, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要受到碳酸参与的灰岩和白云岩风化作用的控制, Na^+ 主要来源于硅酸盐岩的溶解,同时, Ca^{2+} 和 Na^+ 在地下水流动过程中进行阳离子交替吸附作用; K^+ 、 Cl^- 和 NO_3^- 主要受到农业化肥施放和生活废水排放的影响. 此外,大气降水作为该区域地下水的主要补给来源,对当地地下水化学特征和物质来源也有一定的影响.

关键词: 石期河; 岩溶溶丘洼(谷)地; 物质来源; 地下水化学特征; 氢氧同位素

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)09-4021-09 DOI: 10.13227/j.hjcx.201912261

Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Shiqi River Basin

LI Xiao^{1,2}, YU Shi^{2*}, LI Liang^{1*}, GUO Yong-li²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China; 2. Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Land and Resource, Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

Abstract: To investigate the chemical characteristics of groundwater and material sources in a typical karst hill (valley) depression, 41 groundwater samples were systematically collected in the Shiqi River basin. The statistical analysis of the conventional ion content in the groundwater shows that pH of the groundwater in the study area is between 6.06-8.07, the total solid solubility is between 18.21 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and 336.28 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, and the charges of anions and cations in the water body are balanced. Ca^{2+} , Mg^{2+} , and HCO_3^- are the main ions in groundwater, with concentrations of 2.61-108.7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 0.54-27.61 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, and 8.1-370.74 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The groundwater characteristics in the study area are consistent with the high calcium and weak alkalinity characteristics of karst water. By using the Gibbs diagram, piper diagram, end-member analysis, and ion proportional coefficient, hydrochemical characteristics and material sources of groundwater were further analyzed. The results show that Ca^{2+} and Mg^{2+} are mainly controlled by the weathering of limestone and dolomite in which carbonic acid is involved. Na^+ mainly comes from the dissolution of silicate rocks. At the same time, Ca^{2+} and Na^+ undergo cationic exchange adsorption in the groundwater flow process. K^+ , Cl^- , and NO_3^- are mainly affected by agricultural fertilizer application and domestic wastewater discharge. The hydrogen and oxygen isotope analysis of groundwater shows that atmospheric precipitation is the main recharge source of groundwater in this region, which impacts the chemical characteristics and material sources of local groundwater. The results of this study show that the geological background of groundwater is the main factor that affects its hydrochemical characteristics and material sources in areas with relatively little anthropogenic activity.

Key words: Shiqi River; karst hill (valley) depression; material source; groundwater chemical characteristics; hydrogen and oxygen isotopes

岩溶地下水是我国重要的地下水资源,西南岩溶天然水资源约占地下水资源的 81.75%^[1],对国民经济的建设与发展具有重要意义^[2]. 近年来,岩溶地下水资源开发利用及生态问题日益显著^[3],研究岩溶地下水化学特征及物质来源不仅可以揭示地下水与环境的作用机制,还可以为地下水的开发利用提供依据^[4].

岩溶地下水在流动过程中,水化学成分主要受到两方面因素的影响:一方面受到流经地层的岩性、地质构造、地表径流和岩石风化等地质因素的控制;另一方面受到土地利用类型的变更、工厂生产废水

的排放、农业灌溉化肥的施放和城镇化水平的提高等这些人类活动的影响,且这方面的影响比重越来越大^[5]. 但是,在人类活动相对较少的区域,岩溶地下水所处的地质背景才是控制地下水化学特征和物

收稿日期: 2019-12-31; 修订日期: 2020-03-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502302); 中国地质科学院基本科研业务费(2020004); 国家自然科学基金项目(41402324); 中国地质调查项目(DD20160305); 广西自然科学基金项目(2014GXNSFB118228)

作者简介: 李笑(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为岩溶水文地质, E-mail: lixiaol19950207@163.com

* 通信作者, E-mail: yushi@karst.ac.cn; liliangjiaxiang@163.com

质来源的重要因素^[6]. 通过对前人研究成果的广泛调研发现, 目前关于岩溶地下水水化学特征的研究, 就其研究的地形地貌来讲, 主要有岩溶槽谷^[7]、山地丘陵^[8]、峰林平原^[9]和垅岗洼地^[10]等, 但鲜见关于典型岩溶溶丘洼(谷)地地下水水化学的研究.

石期河流域位于湘江流域, 是典型的岩溶溶丘洼(谷)地地貌类型, 目前已有多位学者对湘江流域径流特征^[11]、水质^[12]、重金属污染物^[13,14]和土地利用方式^[15]等方面进行了研究, 但专门针对石期河流域的研究则很少. 黄琼瑶等^[16]利用 RS 技术对石期河流域植被变化进行分析, 研究发现自 1991~2002 年的 10 年间, 整个石期河流域植被覆盖水平呈退化趋势. 劳文科等^[17]对石期河流域岩溶水体系统进行了划分, 并根据 2005 年丰水期内最后一次洪峰过后的流量衰减过程的数据, 对石期河流域岩溶水资源进行了定量分析. 除以上两位学者外, 未检索到其它的研究内容. 因此, 为了填补在该流域的研究空白, 以该典型岩溶溶丘洼(谷)地为研究对象, 通过经典水文地球化学方法并结合数理统计方法, 对该区岩溶地下水化学特征和物质来源进行分析, 以期获得的研究成果对溶丘洼(谷)地地区或类似区域在找水、用水和水质评价等方面提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区地质背景

石期河流域位于湖南省西南端和广西壮族自治区东北端的交界地带, 东经 $111^{\circ}10'$ ~ $111^{\circ}27'$ 、北纬 $25^{\circ}46'$ ~ $26^{\circ}17'$, 流域面积 959 km^2 , 其中碳酸盐岩在研究区内广泛分布, 面积为 886 km^2 , 占流域面积的 92.4%. 研究区位于石期河流域的西南地带, 面积约 215 km^2 , 是其一个子流域, 在地貌上属岩溶溶丘洼(谷)地地貌, 地势南高北低, 山岭、山脉连绵不断, 走向近南北向. 流域地处亚热带季风气候区, 多年平均气温 17.7°C , 多年平均无霜 316 d, 多年平均年降雨量 1420.4 mm , 具有明显的季节性且在年内时序分布极不均匀, 给当地城乡居民生活以及工农业的发展带来严重问题.

研究区内的岩石地层除侏罗系缺失外, 自下古生界奥陶系上统至新生界各地层均有出露, 其中以分布在研究区中部的泥盆系、北部的石炭系、二叠系以及东部的奥陶系地层为主, 三叠系和白垩系的地层零星分布在研究区中北部, 而第四系地层则零星分布在研究区沿石期河河谷地带. 研究区在构造上属于桂湘褶皱带 II 级构造单元, 跨邵阳褶皱束和桂林隆起褶皱束两个三级构造单元, 总体为一北东向复式向斜构造槽谷, 两翼为寒武、奥陶系浅变质碎屑

岩系, 构成槽谷的下垫面, 轴部为古生界碳酸盐岩及少量碎屑岩, 河谷及洼地内有少量中新代地层出露.

地下水主要赋集于地下河系裂隙管道系统的地下岩溶空间, 主要补给来源是大气降水及部分外源水; 径流以集中管道流为主要形式, 总体上自南向北径流; 以地下河或伏流出口及泉点的形式进行排泄. 研究区内共发育有 10 条地下河或伏流, 埋藏深度大多在 $20 \sim 200 \text{ m}$, 有利于筑建溶洼水库进行水资源(水量及水能)的开发利用, 如研究区内的猫儿岩水库; 个别分布于地势相对较低的地下河, 其埋藏深度也有 $10 \sim 30 \text{ m}$, 有利于引流灌溉. 在 10 条地下河或伏流中, 流量大于 $1000 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 的有 3 条, 小于 $100 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 的有 2 条; 出露泉点中, 流量大多小于 $100 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, 极个别泉点泉流量大于 $200 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$.

研究区内人口密度小, 耕地少且土地贫瘠 ($0.5 \sim 3 \text{ m}$), 主要分布在小型谷地和洼地中. 峰丛(或溶丘)上常见小片孤立的天然和人工次生乔木、灌木林覆盖, 多数为稀疏灌丛和灌草覆盖, 具轻度石漠化, 局部石漠化较严重.

1.2 采样位置及采样方法

综合考虑研究区水文地质条件和人类活动, 于 2018 年 7 月 13~24 日, 采集具有代表性的地下水(地下水点多以泉的形式出露)样品 41 组, 采样点位置信息如图 1 所示. 采样前, 先利用美国 Garmin 公司出产的手持卫星定位仪(etrex 201x)确定采样点的位置, 记录经纬度和高程, 然后使用法国 PONSEL 便携式水质多参数分析仪, 现场测定采样点地下水的 pH、水温(T)、溶解氧(DO), pH、 T 和 DO 精度分别达到 0.01 个 pH 单位、 0.01°C 和 $0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. HCO_3^- 浓度使用德国 Merck 公司出产的碱度计现场测定, 精度为 $0.1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 每个样品重复滴定 2~3 次, 平均误差 $< 5\%$. 水样用 500 mL 的聚乙烯瓶采集, 为避免采样过程中发生污染, 采集前用水样润洗 3 遍, 取水样时确保瓶中不留气泡. 水样使用 $0.45 \mu\text{m}$ 醋酸纤维滤膜过滤, 其中用于阳离子测试的样品加入适量 1:1 的 HNO_3 溶液, 调节 $\text{pH} < 2$; 用于阴离子测试的不做处理, 然后用处理过的聚乙烯瓶将水样分装, 放置于 4°C 的冰箱中冷藏保存. 阳离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+}) 用美国出产的戴安 ICS1500 离子色谱仪分析, 测试精度为 $0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 阴离子(SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 Cl^-) 用瑞士出产的万通 MIC 离子色谱仪分析, 测试精度为 $0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, SiO_2 采用钼酸黄分光光度法测定(DZ/T 0064.62-1993), 测试精度为 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 水化学基本指标以及氢氧同位素检测在中国地质科学院岩溶地质研究所进行.

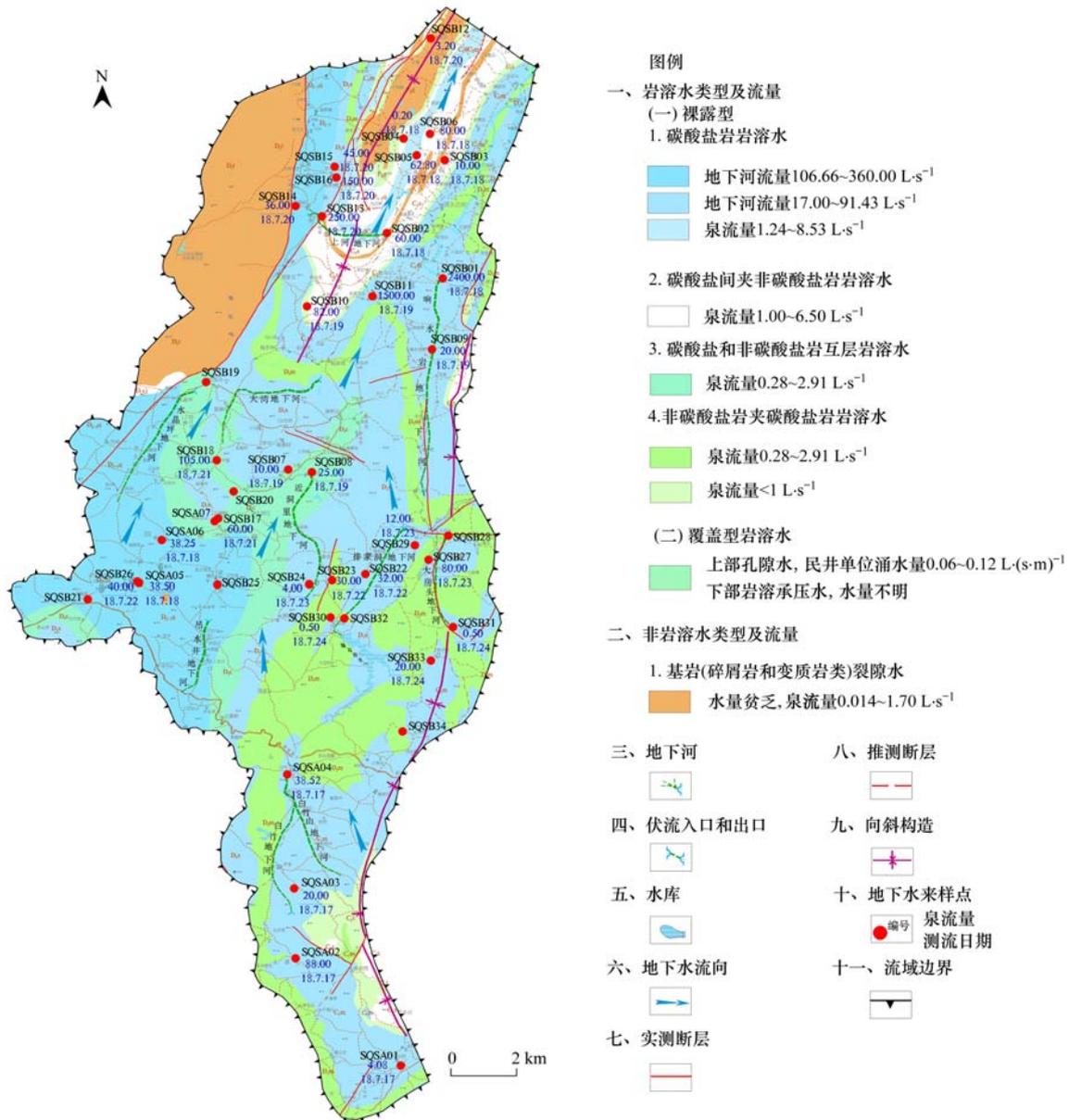


图1 采样点位置示意

Fig. 1 Location of sampling points in the study area

2 结果与分析

对研究区系统采集到的 41 个地下水水样测试结果进行统计分析,主要离子和 TDS 统计结果如图 2 所示。

水中总溶解度固体质量浓度介于 18.21 ~ 336.28 mg·L⁻¹之间,仅有样点 SQSB21 处水样 TDS 值(336.28 mg·L⁻¹)大于 300 mg·L⁻¹; pH 值介于 6.06 ~ 8.07 之间,地下水整体呈弱碱性;特征阳离子主要为 Ca²⁺,质量浓度介于 2.61 ~ 108.7 mg·L⁻¹;其次为 Mg²⁺,质量浓度在 0.54 ~ 27.61 mg·L⁻¹之间,K⁺和 Na⁺质量浓度较低,均值分别为 1.50 mg·L⁻¹和 0.76 mg·L⁻¹;主要特征阴离子为 HCO₃⁻,质量浓度为 8.10 ~ 370.74 mg·L⁻¹;其次是

SO₄²⁻,除了样点 SQSB04 处水样质量浓度偏高,为 101.86 mg·L⁻¹外,其余均介于 2.34 ~ 16.02 mg·L⁻¹; Cl⁻和 NO₃⁻质量浓度较低,均值分别 2.26 mg·L⁻¹和 4.20 mg·L⁻¹。

通过计算,采样区阳离子当量浓度(TZ⁺ = 2Ca²⁺ + Na⁺ + 2Mg²⁺ + K⁺) 在 0.20 ~ 6.00 meq·L⁻¹之间,均值为 3.62 meq·L⁻¹;阴离子当量浓度(TZ⁻ = HCO₃⁻ + 2SO₄²⁻ + NO₃⁻ + Cl⁻) 在 0.31 ~ 6.35 meq·L⁻¹之间,均值为 3.57 meq·L⁻¹;NICB[NICB = (TZ⁻ - TZ⁺)/TZ⁺]的平均值为 -1.03%。由此可见,水体阴阳离子电荷基本平衡。

氢氧同位素的 δD 值介于 -42.9‰ ~ -26.20‰,平均值为 -34.57‰;δ¹⁸O 介于 -6.50‰ ~ -4.32‰,平均值为 -5.91‰。

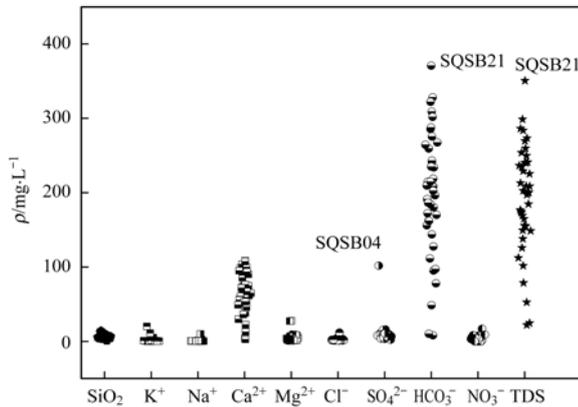


图2 研究区主要离子及 TDS 示意

Fig. 2 Diagram of main ions and TDS in the study area

3 讨论

3.1 地下水补给来源

地下水循环是自然界水循环的重要环节之一, 由于地下水系统的复杂性, 地下水在转换过程中, 往往受到不同来源水的混合作用. 通过地下水和大气降水中 δD - $\delta^{18}O$ 之间的相互关系, 可以用来判别地下水来源^[18]. 参考大气降水线的定义, 将地下水中氢氧同位素的关系定义为地下水线 (groundwater line, GL). 运用最小二乘法, 拟合得到研究区的地下水线方程为:

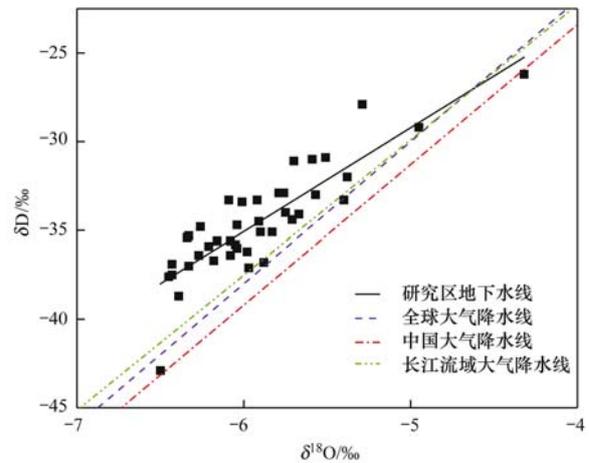
$$\delta D = 5.851\delta^{18}O + 0.0332$$

$$(R^2 = 0.74, n = 43)$$

将该地下水线与 Craig^[19] 提出的全球大气降水线 (global meteoric water line, GMWL): $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ 、郑淑慧^[20] 提出的中国大气降水线: $\delta D = 7.9\delta^{18}O + 8.2$ 、孙婷婷^[21] 测得的长江流域的局地大气降水线 (local meteoric water line, LMWL): $\delta D = 7.62\delta^{18}O + 8.20$ 相比, 斜率和截距均较小. 由图 3 可以看出, 研究区所取水样的氢氧同位素大多分布在全球大气降水线 (GMWL) 和长江流域大气降水线 (LMWL) 上方, 说明研究区地下水主要接受大气降水的补给, 且大气降水在转化为地下水时经历了不同程度的蒸发作用^[22].

3.2 相关性分析

地下水各化学指标之间的相互关系可以说明离子来源^[23]. 根据地下水化学成分的 Pearson 相关系数矩阵 (表 1), 可看出作为研究区的特征阳离子 Ca^{2+} 和特征阴离子 HCO_3^- , 均与 TDS 指标极强相关, 相关系数分别为 0.942 和 0.945, 其次为 Cl^- , 与 TDS 中等相关, 相关系数为 0.534. 而其它离子与 TDS 指标的相关性均较弱, 相关系数的绝对值小于 0.4, 说明 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 和 Cl^- 为 TDS 的主导因素. Ca^{2+} 与 HCO_3^- 之间相关系数为 0.899, 说明这两种

图3 地下水 $\delta^{18}O$ 和 δD 关系Fig. 3 Relationship between $\delta^{18}O$ and δD in groundwater

离子有共同的来源, 反映了研究区内碳酸盐岩的溶解. Cl^- 与 Na^+ 之间的相关系数为 0.953, 相关性极强, 说明两者有共同的来源, 一般是来自蒸发岩溶解. 但研究区没有明显的蒸发岩 ($NaCl$ 和 KCl) 出露, 且 SiO_2 与 Na^+ 的相关系数为 0.616, 故推断 Na^+ 主要来自硅酸盐溶解. 研究区地处内陆, 远离海洋的河流, 其化学组成基本不受海洋输入的影响^[24], 而且 Cl^-/Na^+ (当量比) 平均值为 3.21, 高于世界海水的平均比值 ($Cl^-/Na^+ = 1.16$)^[25], 故海洋来源的 Cl^- 的贡献可以忽略, 推断 Cl^- 主要受到人类活动的影响. 由图 2 可以看出, K^+ 含量和 Na^+ 相差不多, 甚至有些区域超过了 Na^+ , 但在一般的天然水中, 由于 K^+ 较于 Na^+ 更容易被土壤颗粒吸附, 所以 Na^+ 总是大于 K^+ , 说明 K^+ 也受到人类活动的影响. 其次, K^+ 和 Cl^- 之间的相关系数为 0.645, K^+ 和 NO_3^- 之间的相关系数为 0.652, Cl^- 和 NO_3^- 之间的相关系数为 0.342, 而钾肥 (KCl) 是 K^+ 和 Cl^- 的共同来源, 复合肥 (KNO_3) 是 K^+ 和 NO_3^- 的共同来源, 说明 K^+ 、 Cl^- 和 NO_3^- 极有可能来自人类活动的输入, 如研究区农业活动化肥的施放和生活污水的排放.

3.3 Gibbs 图

Gibbs 通过对世界主要地表河流的研究, 将天然水组分的控制因素分为蒸发浓缩、岩石风化和大气沉降 3 种类型, 通过 Gibbs 图可以研究地下水的形成机制^[26]. 将研究区地下水化学数据投射到 Gibbs 图上 (图 4), 从图 4 中可以看出, 几乎所有水样数值点位于虚线框内, 其 TDS 质量浓度中等, $Na^+/[Na^+ + Ca^{2+}]$ 和 $Cl^-/[Cl^- + HCO_3^-]$ 的比值均远小于 0.5, 表明流域内地下水离子物质的来源主要受岩石风化端元的控制.

3.4 物质风化来源分析

Piper 图由阴阳离子的水化学三角图和反映水

表 1 研究区主要离子相关性分析¹⁾

Table 1 Correlation analysis of main ions in the study area

	SiO ₂	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	TDS
SiO ₂	1									
K ⁺	0.491 **	1								
Na ⁺	0.616 **	0.639 **	1							
Ca ²⁺	0.196	0.143	0.255	1						
Mg ²⁺	0.195	-0.083	-0.073	-0.046	1					
Cl ⁻	0.556 **	0.645 **	0.953 **	0.440 **	-0.100	1				
SO ₄ ²⁻	0.322 *	0.031	0.029	0.126	-0.046	-0.018	1			
HCO ₃ ⁻	0.265	0.176	0.338 *	0.899 **	0.308 *	0.499 **	-0.118	1		
NO ₃ ⁻	0.122	0.652 **	0.249	0.194	-0.184	0.342 *	-0.054	0.138	1	
TDS	0.363 *	0.272	0.392 *	0.942 **	0.218	0.534 **	0.191	0.945 **	0.214	1

1) **表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; *表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

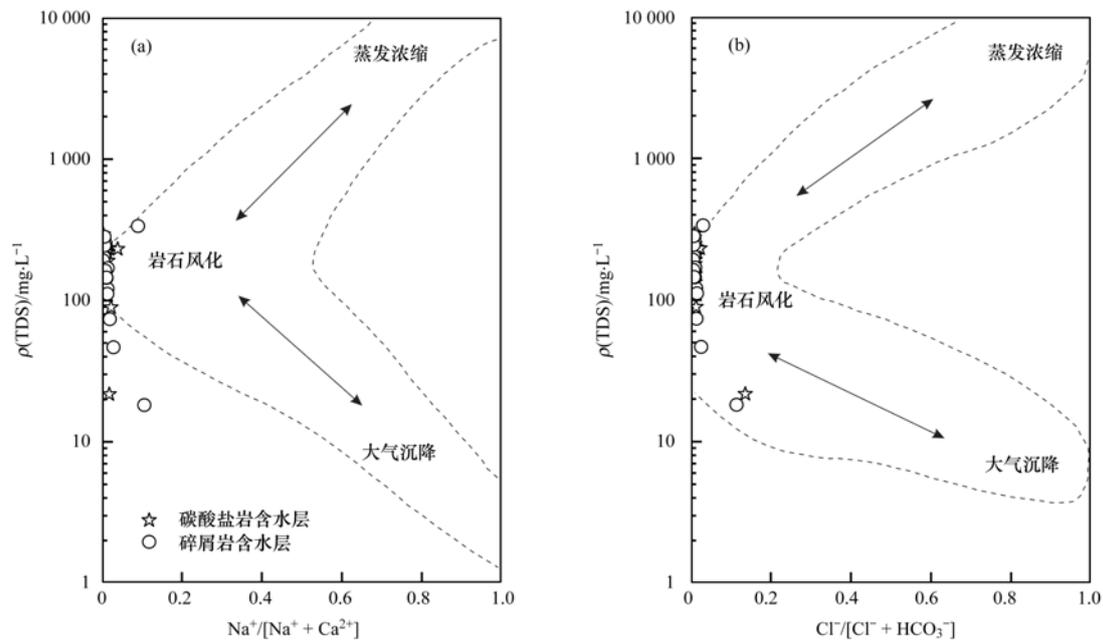


图 4 研究区 Gibbs 图

Fig. 4 Gibbs diagram of the study area

化学特征的菱形图组成,将三角图中阴阳离子的数据投射到菱形图中,可以直观反映水样的水化学特征和类型,并揭示水样流经岩区的风化类型^[27,28].为揭示研究区水化学物质来源,将离子数据投射到 Piper 图上,如图 5 所示.从中可以看出,研究区的阳离子大多位于 Ca²⁺-Mg²⁺ 线附近并靠近 Ca²⁺,即位于石灰岩风化端元和白云岩风化端元之间,且主要表现为碳酸盐岩的风化特征;阴离子主要位于 HCO₃⁻ 一端,主要表现为碳酸盐岩的风化特征,但可能受到碳酸和硫酸共同参与的影响.研究区内地下水化学类型主要以 HCO₃-Ca 型水为主.

为进一步探明参与碳酸盐岩风化的物质来源,分别绘制 [Ca²⁺ + Mg²⁺] 与 [HCO₃⁻] 和 [HCO₃⁻ + SO₄²⁻] 的当量浓度关系^[29](图 6).从图 6 中可以看出, [HCO₃⁻] / [Ca²⁺ + Mg²⁺] = 0.95, r = 0.96; [HCO₃⁻ + SO₄²⁻] / [Ca²⁺ + Mg²⁺] = 0.97, r = 0.99,

说明研究区主要是碳酸风化碳酸盐岩,硫酸对碳酸盐岩的物质风化有微小的影响.此外,图中有 SQSB04 和 SQSB21 两个特殊样品点:SQSB04 样品点在图 6(a) 中位于拟合线的下方,在图 6(b) 中则位于拟合线上,就其采样点的位置来看,该点位于人类活动密集的落脚底村下方,含 SO₄²⁻ 城镇生活污水进入水体,导致该点的 SO₄²⁻ 质量浓度 (101.86 mg·L⁻¹) 远高于该流域 SO₄²⁻ 质量浓度的平均值 (10.02 mg·L⁻¹),参与碳酸盐岩的风化过程,加速了碳酸盐岩的溶解,从而导致 HCO₃⁻ 质量浓度 (95.22 mg·L⁻¹) 低于该流域 HCO₃⁻ 质量浓度的平均值 (195.12 mg·L⁻¹). SQSB21 样品点在图 6 中均位于拟合线上方,其采样点位于碳酸盐岩区域,原为一岩溶大泉,水量大且稳定,所以此处 HCO₃⁻ 质量浓度偏高,但受到道路施工影响,现已断流.

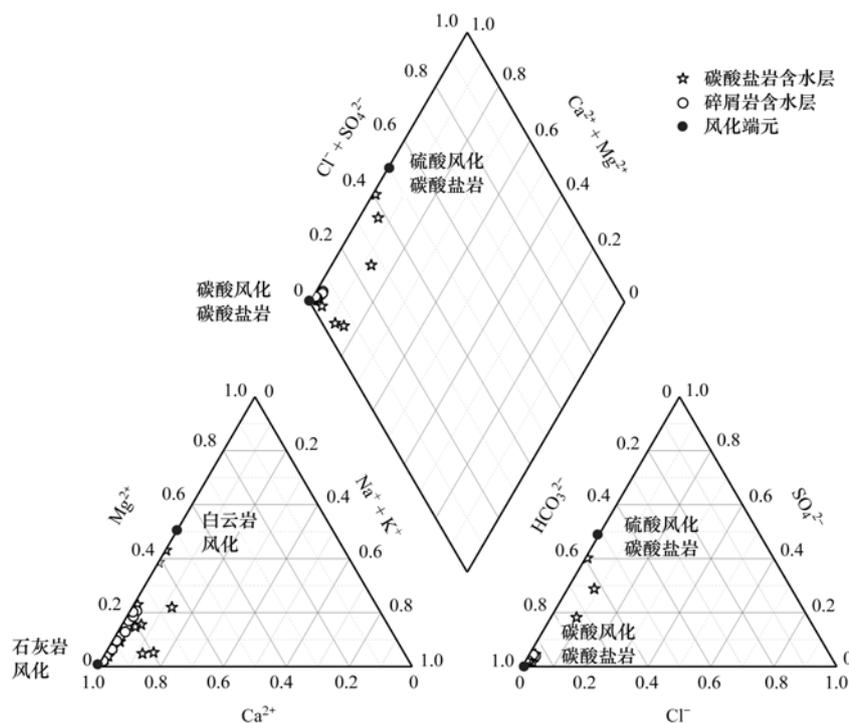


图 5 研究区地下水 Piper 三线图

Fig. 5 Piper diagram of groundwater in the study area

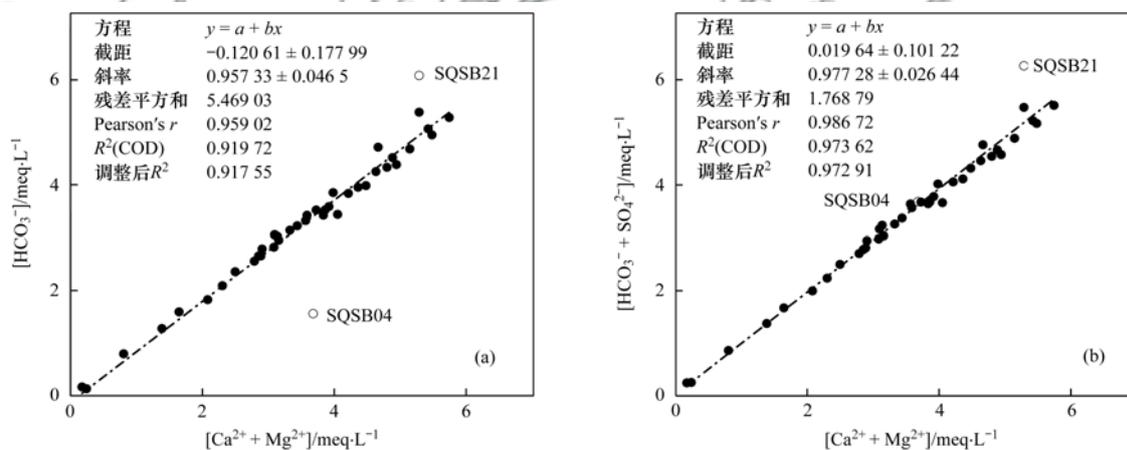


图 6 研究区主要离子当量浓度关系

Fig. 6 Relation diagram of main ion equivalent concentration in the study area

3.5 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子来源分析

通常情况下,地下水中 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 的量比可以用来判别地下水流经地层的岩性^[30];流经灰岩含水层的地下水,其 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 量比在 0.01 ~ 0.26 之间,而流经白云岩含水层的地下水, $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 量比则大于 0.85^[31]. 因此可通过计算所采集水样的 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 量比,并绘制与 HCO_3^- 的相关关系(图 7)判别研究区地下水流经地层的主要岩性. 从图 7 中可以看出,几乎所有取自碎屑岩含水层水样的 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 量比小于 0.26,来自灰岩含水层岩石矿物的溶解;取自碳酸盐岩含水层水样的 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 量比大部分小于 0.26,说明碎屑岩含水层中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来自于灰岩含水层岩石矿物的溶解,少数

分来自于白云岩含水层岩石矿物的溶解. 此外, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 间的相关系数为 -0.046 , Mg^{2+} 和 HCO_3^- 间的相关系数为 0.308,也可以验证研究区地下水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于灰岩含水层岩石矿物的溶解.

3.6 阳离子交替吸附作用

地下水与岩石长期的相互作用过程中,岩石在一定条件下可以吸附地下水中的阳离子,而将原先吸附的阳离子释放到地下水中,即发生阳离子交替吸附作用^[32]. 阳离子交替吸附作用会影响地下水的演化,使地下水水化学成分发生改变^[33]. 1977 年, Schoeller^[34] 提出利用氯碱指数 (chloro-alkaline indices, CAI) 研究阳离子交换作用,表达式如下:

$$CAI-I = \frac{Cl^- - (Na^+ + K^+)}{Cl^-}$$

$$CAI-II = \frac{Cl^- - (Na^+ + K^+)}{SO_4^{2-} + HCO_3^- + CO_3^{2-} + NO_3^-}$$

如果氯碱指数均为正值,表示地下水系统发生了下式正向反应的阳离子交换作用,反之则发生了反向阳离子交换作用. 阳离子交换作用使地下水中 Na^+ 含量增高,而 Ca^{2+} 含量降低.

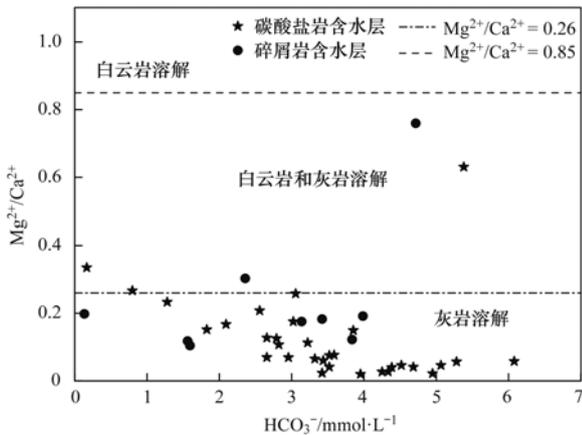


图7 研究区地下水 Mg^{2+}/Ca^{2+} 与 HCO_3^- 关系

Fig. 7 Relationship between Mg^{2+}/Ca^{2+} and HCO_3^- in groundwater in the study area

为进一步探讨阳离子交替吸附作用是否参与研究区地下水演化过程,通过计算研究区所取水样的氯碱指数,绘制取样点氯碱指数分布,如图8所示. 从中可以看出,在所有41个水样中,有37个水样氯碱指数为正值,占比为90.24%,说明阳离子交替吸附作用是影响研究区地下水化学成分的重要水文地球化学过程.

3.7 人类活动的影响

近年来,随着岩溶区人类活动的不断加强,如工农业和旅游业的快速发展,城市化的迅猛扩张等,对地下水的演变过程、水文地球化学特征以及物质迁移等产生影响,从而使岩溶地下水水化学成分发生改变,甚至会破坏地下水含水层,造成岩溶地下水严重污染^[35,36].

就研究区而言,人类活动的影响主要体现在两方面,一方面是含有 SO_4^{2-} 的城镇生活污水的排放,如上述分析的采样点 SQSB04; 另一方面则是农民在耕种农作物时,会施放钾肥、复合肥等化学肥料,而未被吸收的肥料会随灌溉水下渗到地下水含水层,使得地下水中钾离子、氯离子、硝酸根离子含量升高,造成地下水污染. 如采样点 SQSB18 和 SQSB21,其水样中 K^+ 、 Cl^- 和 NO_3^- 含量均高于该流域的平均值,如表2所示,根据前

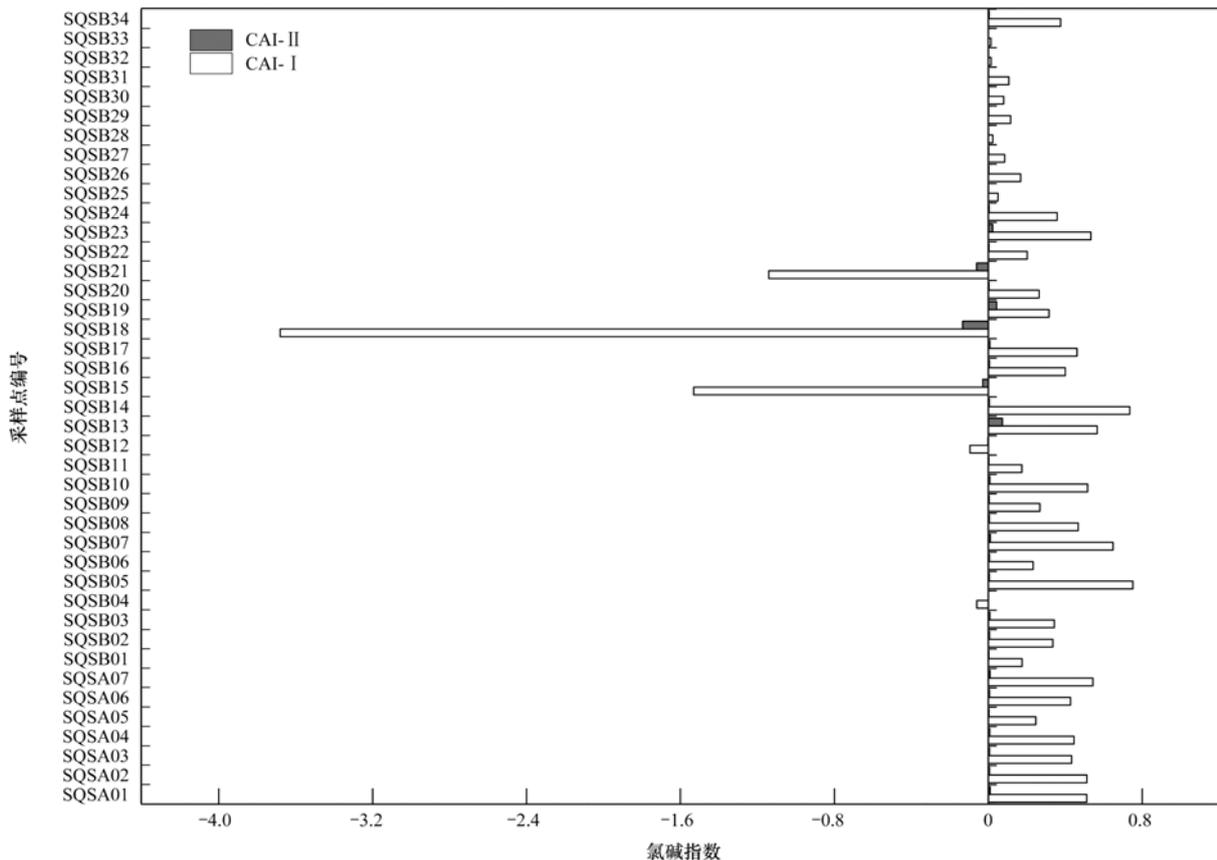


图8 研究区水样氯碱指数分布

Fig. 8 Distribution map of chlorine-alkali index of water samples in the study area

文离子相关性分析可知,该3种离子极可能来自于农业污染.同时,在野外调查采样时,采样点

SQSB18和SQSB21周围植被覆盖以农田为主,与分析结果相符.

表2 研究区受人类活动影响较大的水样点

Table 2 Effect of anthropogenic activities on water samples

编号	$K^+ / \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{Cl}^- / \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{SO}_4^{2-} / \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{NO}_3^- / \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
SQSB04	0.38	1.2	101.86	1.49
SQSB18	20.19	4.84	15.25	16.96
SQSB21	10.96	11.81	9.05	5.31
流域平均值	1.50	2.26	10.14	4.20

综上,研究区地下水化学成分在一定程度上受到人类活动的影响,但其影响程度相对较小.

4 结论

(1)研究区地下水矿化度普遍较低,TDS质量浓度介于 $18.21 \sim 336.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间;pH值介于 $6.06 \sim 8.07$ 之间,整体上呈弱碱性; Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 质量浓度高,分别介于 $2.61 \sim 108.7$ 、 $0.54 \sim 27.61$ 和 $8.1 \sim 370.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间;地下水化学类型以 HCO_3^- -Ca型水为主,符合岩溶区地下水高钙弱碱性特征.

(2)研究区地下水化学成分主要受到水岩作用的控制, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来自碳酸参与和少部分硫酸参与的碳酸盐岩风化溶解; Ca^{2+} 和 Na^+ 在地下水流动过程中进行了阳离子交替吸附作用,对地下水化学成分产生了一定影响;而 K^+ 、 Cl^- 和 NO_3^- 则来源于农业生产活动中钾肥和复合肥的施放和生活污水排放,说明研究区水化学成分在一定程度上受到人类活动的影响,但影响程度有限.以上内容证明,在人类活动相对较少的地区,地下水所处的地质背景是影响其水化学特征和物质来源的主要因素.

(3)研究区地下河和地表泉水水质整体较好.若以农业用水为主要目的,水资源管理者可对流域内的水资源储量和水量进行适度开发;若进行饮用水资源开发,仍需对开发区水资源质量做进一步评估.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 何守阳,雷琨,吴攀,等.贵州岩溶山区城镇化进程中地下水的资源功能评价[J].地球科学,2019,44(9):2839-2850.
He S Y, Lei K, Wu P, et al. Evaluation on resources function of groundwater during urbanization in karst region of Guizhou province[J]. Earth Science, 2019, 44(9): 2839-2850.
- [3] 张勇,郭纯青,朱彦光,等.云南莽麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析[J].环境科学,2019,40(6):2686-2695.
Zhang Y, Guo C Q, Zhu Y G, et al. Chemical Characteristics of

- groundwater and material sources analysis in Buckwheat Field, Yunnan province[J]. Environmental Science, 2019, 40(6): 2686-2695.
- [4] Liu F, Wang S, Wang L S, et al. Coupling hydrochemistry and stable isotopes to identify the major factors affecting groundwater geochemical evolution in the Heilongdong Spring Basin, North China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2019, 205: 106352.
- [5] 杨应增,何守阳,吴攀,等.岩溶地下水化学对城镇化进程的时序响应[J].环境科学,2019,40(10):4532-4542.
Yang Y Z, He S Y, Wu P, et al. Temporal response of subterranean karst stream hydrochemistry to urbanization[J]. Environmental Science, 2019, 40(10): 4532-4542.
- [6] 寇永朝,华琨,李洲,等.涇河流域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.
- [7] 杨平恒,卢丙清,贺秋芳,等.重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究[J].环境科学,2014,35(4):1290-1296.
Yang P H, Lu B Q, He Q F, et al. Hydrogeochemical characteristics of a typical karst groundwater system in Chongqing[J]. Environmental Science, 2014, 35(4): 1290-1296.
- [8] 苏春利,张雅,马燕华,等.贵阳市岩溶地下水水化学演化机制:水化学和锶同位素证据[J].地球科学,2019,44(9):2829-2838.
Su C L, Zhang Y, Ma Y H, et al. Hydrochemical evolution processes of karst groundwater in Guiyang city: evidences from hydrochemistry and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios[J]. Earth Science, 2019, 44(9): 2829-2838.
- [9] 刘绍华,郭芳,姜光辉,等.桂林市峰林平原区岩溶水文地球化学特征[J].地球与环境,2015,43(1):55-65.
Liu S H, Guo F, Jiang G H, et al. Hydrogeochemical characteristics of peak forest plain in Guilin city, China[J]. Earth and Environment, 2015, 43(1): 55-65.
- [10] 唐金平,张强,胡漾,等.巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析[J].环境科学,2019,40(10):4543-4552.
Tang J P, Zhang Q, Hu Y, et al. Hydrochemical characteristics of karst groundwater in the mountains of northern Bazhong city, China[J]. Environmental Science, 2019, 40(10): 4543-4552.
- [11] 邹浩.湘江流域径流对气候变化与人类活动的响应[D].长沙:长沙理工大学,2018.56-57.
- [12] Zou H. Response of runoff to climate change and human activity in Xiangjiang basin[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2018. 56-57.
- [12] 刘叶叶,毛德华,杨家亮,等.湘江流域水质特征及水污染经济损失估算[J].中国环境科学,2019,39(4):1471-

- 1477.
- Liu Y Y, Mao D H, Yang J L, *et al.* Characteristics of water quality and estimation of economic loss from water pollution in Xiangjiang River basin [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(4): 1471-1477.
- [13] 盛维康, 侯青叶, 杨忠芳, 等. 湘江水系沉积物重金属元素分布特征及风险评价[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(5): 2230-2240.
- Sheng W K, Hou Q Y, Yang Z F, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments from Xiang River[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(5): 2230-2240.
- [14] Li H, Chai L Y, Yang Z H, *et al.* Seasonal and spatial contamination statuses and ecological risk of sediment cores highly contaminated by heavy metals and metalloids in the Xiangjiang River[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2019, **41**(3): 1671-1633.
- [15] 王宽, 李涛, 齐增湘, 等. 湘江流域土地利用时空变化及其影响因子研究[J]. *西南林业大学学报*, 2017, **37**(5): 179-187.
- Wang K, Li T, Qi Z X, *et al.* Temporal and spatial variation of land use and impact factors in Xiangjiang River basin [J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2017, **37**(5): 179-187.
- [16] 黄琼瑶, 易胜, 黄晨晖. 基于 RS 技术的石期河流域植被变化分析[J]. *安徽农业科学*, 2008, **36**(19): 8223-8225, 8274.
- Huang Q Y, Yi S, Huang C H. Analysis on the vegetation change in Shiqihe River basin based on RS technology [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, **36**(19): 8223-8225, 8274.
- [17] 劳文科, 蓝芙宁, 蒋忠诚, 等. 石期河流域岩溶水系统及其水资源构成分析[J]. *中国岩溶*, 2009, **28**(3): 255-262.
- Lao W K, Lan F N, Jiang Z C, *et al.* Analysis on karst groundwater system and its water resources composition in Shiqihe basin[J]. *Carsologica Sinica*, 2009, **28**(3): 255-262.
- [18] Singh R, Venkatesh A S, Syed T H, *et al.* Stable isotope systematics and geochemical signatures constraining groundwater hydraulics in the mining environment of the Korba Coalfield, Central India [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, **77**(15): 548.
- [19] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [20] 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. *科学通报*, 1983, **28**(13): 801-806.
- [21] 孙婷婷. 长江流域水稳定同位素变化特征研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. 39-40.
- Sun T T. Study on the variable characteristic of the water stable isotopic compositions in Yangtze River basin [D]. Nanjing: Hohai University, 2007. 39-40.
- [22] Wassenaar L I, Athanasopoulos P, Hendry M J. Isotope hydrology of precipitation, surface and ground waters in the Okanagan valley, British Columbia, Canada [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, **411**(1-2): 37-48.
- [23] 张涛, 何锦, 李敬杰, 等. 蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素[J]. *环境科学*, 2018, **39**(11): 4981-4990.
- Zhang T, He J, Li J J, *et al.* Major ionic features and possible controls in the groundwater in the Hamatong River basin [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(11): 4981-4990.
- [24] 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.
- [25] 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.
- Wang P, Shang Y N, Shen L C, *et al.* Characteristics and evolution of hydrochemical compositions of freshwater lake in Tibetan Plateau [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(3): 874-881.
- [26] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. *Science*, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [27] Piper A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1944, **25**(6): 914-928.
- [28] 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.
- [29] 安乐生, 赵全升, 叶思源, 等. 黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用[J]. *环境科学*, 2012, **33**(2): 370-378.
- An L S, Zhao Q S, Ye S Y, *et al.* Hydrochemical characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in the Yellow River delta [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(2): 370-378.
- [30] 刘伟江, 袁祥美, 张雅, 等. 贵阳市岩溶地下水水化学特征及演化过程分析[J]. *地质科技情报*, 2018, **37**(6): 245-251.
- Liu W J, Yuan X M, Zhang Y, *et al.* Hydrochemical characteristics and evolution of karst groundwater in Guiyang city [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2018, **37**(6): 245-251.
- [31] Long X, Sun Z Y, Zhou A G, *et al.* Hydrogeochemical and isotopic evidence for flow paths of karst waters collected in the Heshang cave, central China [J]. *Journal of Earth Science*, 2015, **26**(1): 149-156.
- [32] 沈照理, 朱宛华, 钟佐桑. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1999. 35-36.
- Shen Z L, Zhu W H, Zhong Z S. *Hydrogeochemical basis* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999. 35-36.
- [33] 刘慧, 白皓, 田国林. 神木市窟野河流域地下水水化学时空演化特征[J]. *人民黄河*, 2019, **41**(8): 76-81, 87.
- Liu H, Bai H, Tian G L. Spatial-temporal variations of groundwater hydrochemical characteristics in the Kuye River basin of Shenmu [J]. *Yellow River*, 2019, **41**(8): 76-81, 87.
- [34] Schoeller H. *Geochemistry of groundwater* [A]. *Groundwater Studies—An International Guide for Research and Practice* [M]. Paris: UNESCO, 1977. 1-18.
- [35] 周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 等. 崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2143-2151.
- Zhou J M, Jiang Z C, Xu G L, *et al.* Major Ionic characteristics and controlling factors of karst groundwater at Xiangshui, Chongzuo [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2143-2151.
- [36] 蓝家程, 孙玉川, 胡宁. 重庆老龙洞岩溶地下水水化学特征及影响因素[J]. *水资源保护*, 2018, **34**(3): 37-44.
- Lan J C, Sun Y C, Lang N. Hydrochemical characteristics of Laolongdong karst groundwater and its impact factors [J]. *Water Resources Protection*, 2018, **34**(3): 37-44.

CONTENTS

Characterization of Two Heavy Pollution Episodes in Tianjin in 2020	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3879)
Analysis of Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Chengdu Based on the MARGA	YIN Han-mei, CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3889)
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} in Suqian City	MA Hong-lu, ZHAO Xin, LU Jian-gang, <i>et al.</i> (3899)
Characterization and Size Distribution of Carbonaceous Aerosols at Mountain Dinghu	LI An-na, WEN Tian-xue, HUA Wei, <i>et al.</i> (3908)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust in Anshan	LIN Zi, JI Ya-qin, LIN Yu, <i>et al.</i> (3918)
Spectral Characteristics and Source Analysis of WSOC of PM _{2.5} in Winter of Xi'an	YANG Yi, ZHANG Ya-nan, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3924)
Observation of Aerosol Optical Properties and New Particle Formation in the Yangtze River Delta	DU Ying-ying, CHEN Jun, ZHANG Jia-luo, <i>et al.</i> (3932)
Component Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Lianyungang City	CUI Jin-meng, WANG Ti-jian, LI Qiu-tong, <i>et al.</i> (3941)
Seasonal Pollution Characteristics and Analysis of the Sources of Atmospheric VOCs in Chengdu Urban Area	WANG Cheng-hui, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3951)
Ozone Sensitivity Analysis and Emission Controls in Dezhou in Summer	YAN Ru-sha (3961)
Inventory and Distribution Characteristics of China's Thermal Power Emissions Under Ultra-Low Reconstruction	QU Jia-bao, WANG Peng, BO Xin, <i>et al.</i> (3969)
Establishment and Spatial Distribution of Anthropogenic Ammonia Emission Inventory in Zhejiang Province	ZHAO Rui-dong, YU Xing-na, HOU Xin-hong, <i>et al.</i> (3976)
Evaluation and Screening of Dioxin Control Technology in Waste Incineration Flue Gas	ZHAO Si-lan, XI Peng-fei, GUO Feng-yan, <i>et al.</i> (3985)
Characteristics of Stable Isotopes and Moisture Sources of Two Typical Precipitation Events in Lanzhou City	HAN Ting-ting, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (3993)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of the Surface Water in Ranwu Lake Basin	ZHANG Tao, WANG Ming-guo, ZHANG Zhi-yin, <i>et al.</i> (4003)
Chemical Evolution and Formation Mechanism of Groundwater in Hetao Irrigation Area	CUI Jia-qi, LI Xian-yue, SHI Hai-bin, <i>et al.</i> (4011)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Shiqi River Basin	LI Xiao, YU Shi, LI Liang, <i>et al.</i> (4021)
Spatial-temporal Variations and Driving of Nitrogen and Phosphorus Ratios in Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	JI Peng-fei, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4030)
Spatiotemporal Variations in Nutrient Loads in River-lake System of Changdang Lake Catchment in 2016-2017	LI Xin-yan, LI Heng-peng, JIANG San-yuan, <i>et al.</i> (4042)
Influence of <i>Potamogeton crispus</i> on Lake Water Environment and Phytoplankton Community Structure	KANG Li-juan, XU Hai, ZOU Wei, <i>et al.</i> (4053)
Phylogenetic Processes and Key Driving Factors of Bacterial Communities in Jinze Reservoir	LIU Ming-kun, TONG Jun, ZHU Hui-feng, <i>et al.</i> (4062)
Distribution Characteristics of Per-/polyfluoralkyl Substances in River Sediments Around Typical Fluorine Industrial Parks	SUN Lin-ting, ZHAO Zhen, TANG Jian-hui (4069)
Microplastics-Induced Shifts of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in River Water	ZHOU Xin-yuan, WANG Yan-zi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4076)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Lianhua Reservoir	LIAO Jie, WEI Xiao-qin, XIAO Yan-qin, <i>et al.</i> (4081)
Intraspecific Variation in Growth and Alkaline Phosphatase Activity of <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> Strains in Response to Different Phosphorus Concentrations and Sources	YE Jin-mei, ZHAO Li, LUO Xu, <i>et al.</i> (4088)
Simulation of Water Quality Response of Guishui River Wetland Plants and Water Diversion	LI Ya-juan, DU Yan-liang, BI Er-ping, <i>et al.</i> (4095)
Performance Assessment of Field-scale Dry Grass Swale with Shallow Substrate Layer	ZHANG Jia-wei, LI Tian, ZHANG Ting-xiu (4105)
Transition of Particulate Pollutant in the Parcel-based Catchment of Sponge City	LI Jia, XIE Wen-xia, JIANG Zhi-hui, <i>et al.</i> (4113)
Adsorption of Sb(V) in Water by Natural Pyrite: Performance and Mechanism	SHI Song, WU Qian-yuan, LI Xin-zheng, <i>et al.</i> (4124)
Treatment of Wastewater Containing Naphthalene Sulfonic Acid by Persulfate Oxidation	ZHANG Jin-men, LU Jun, LIU Xiao-chen, <i>et al.</i> (4133)
Effect of Temperature on Performance and Microbial Community Structure of Anaerobic Biofilter-Treated Domestic Wastewater	LIU Zhi-bin, LIU Xiu-hong, ZHOU Tong, <i>et al.</i> (4141)
Start-up and Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal in ABR-MBR Coupling Process	MIAO Xin-nian, WANG Qian, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (4150)
Adaptability of Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Granular Sludge to Low-Strength at Low Temperature	LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4161)
Discussion on Key Issues of Geochemical Monitoring of Soil Heavy Metal in Xiong'an New District	GUO Zhi-juan, ZHOU Ya-long, YANG Zheng, <i>et al.</i> (4169)
Quantitative Assessment of Human Health Risks Based on Soil Heavy Metals and PAHs Sources: Take a Polluted Industrial Site of Beijing As an Example	WU Zhi-yuan, ZHANG Li-na, XIA Tian-xiang, <i>et al.</i> (4180)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals at Township Scale in the High Background of Heavy Metals, Southwestern, China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, WANG Hui-yan, <i>et al.</i> (4197)
Potential of Accumulation and Application of Dominant Plants in Lanping Lead-zinc Mine, Yunnan Province	ZHANG Long, ZHANG Yun-xia, SONG Bo, <i>et al.</i> (4210)
Key Growth Stage of Pb Accumulation in Rice Through a Hydroponic Experiment with Pb Stress	HU Yu-dan, ZHOU Hang, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Nutrient Regulation and Control on Cd Accumulation Efficiency of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Field Conditions	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> (4226)
Effects of <i>Eucalyptus</i> Branches Biochar Application on Soil Physicochemical Properties of Acidified Soil in a <i>Eucalyptus</i> plantation in Northern Guangxi	DAUN Chun-yan, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (4234)
Dynamic Effects of Direct Returning of Straw and Corresponding Biochar on Acidity, Nutrients, and Exchangeable Properties of Red Soil	YANG Cai-di, LU Sheng-gao (4246)
Different Responses of Soil Microbial Community Structure to Irrigation with Treated Wastewater from Domestic and Industrial Sources	WANG Yan, CHENG Dong-hui, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (4253)
Effects of Manure and Organic Fertilizer Application on Soil Microbial Community Diversity in Paddy Fields	LI Peng, WU Jian-qiang, SHA Chen-yan, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Land Use Changes on Soil Bacterial Community Diversity in the Riparian Wetland Along the Downstream of Songhua River	ZHANG Tuo, XU Fei, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (4273)
Response of Soil Bacterial Community Structure to Precipitation Change in Grassland of Loess Plateau	LI Na, WANG Bao-rong, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (4284)
Effect of Land-use on Soil Fungal Community Structure and Associated Functional Group in Huixian Karst Wetland	CHENG Yue-yang, JIN Zhen-jiang, WANG Xiao-tong, <i>et al.</i> (4294)
Interactions of Fungi Community and Relationship with the Carbon Structure in Arable Mollisols with Gradient Organic Matter Content	SHANG Qiu-tong, HUANG Rui-lin, NI Hao-wei, <i>et al.</i> (4305)
Diversity of Soil Eukaryotic Microbes in Different Succession Stages in Maolan Karst Forest of Guizhou	WANG Xian, LONG Jian, LI Juan, <i>et al.</i> (4314)
Adsorption of Cadmium and Arsenic by Corn Stalk Biochar Solidified Microorganism	LIU Yu-ling, ZHU Hu-cheng, PENG Ou, <i>et al.</i> (4322)
Mechanism of Inorganic Nitrogen Transformation and Identification of Nitrogen Sources in Water and Soil	LIANG Xing, SUN Li-qun, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4333)