

目次

基于机器学习方法研究气象及排放变化对长三角地区主要城市大气污染物的影响	付文星, 黄琳, 丁嘉豪, 秦墨梅, 于兴娜, 谢放尖, 胡建林 (5879)
不同行业减排对我国东部地区空气质量及大气温度的影响	龙籽谕, 朱佳, 李柯, 陈磊, 杜楠, 廖宏 (5889)
冬奥会期间京津冀及周边区域空气质量时空特征、气象影响和减排效果评估	侯露, 朱媛媛, 刘冰, 李健军 (5899)
中国印刷业 VOCs 排放趋势及未来减排潜力	梁小明, 吴彭珍, 陈来国, 刘明, 卢清, 朱李华, 孙西勃, 叶代启 (5915)
济南市典型行业 VOCs 排放特征及减排潜力分析	吴文璐, 单春艳, 赵菁林, 崔羽浓 (5924)
南京市溧水区大气挥发性有机物污染特征及来源解析	阮兆元, 燕鸥, 王体健, 王勤耕, 罗干, 文金科 (5933)
我国近 10 年城市生活垃圾处置单元温室气体排放时空变化及减排潜能分析	张昕雪, 高淑丹, 滕晓, 蒋旭彤, 陈纪宏, 高晨琦, 卞荣星, 孙英杰, 李卫华, 王亚楠, 王华伟 (5946)
中国重点城市大气污染与健康风险的时空分布特征	涂佩玥, 杨欢, 陈兰洲, 牛笑笑, 杨璐, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 叶志祥, 梅新, 洪松, 何超 (5954)
中国 PM ₁ 浓度时空特征及其与 AOD 的相关性分析 (2014 ~ 2017 年)	袁丽梅, 马芳芳, 卞泽, 秦凯 (5964)
长株潭城市群 PM _{2.5} 中二次无机离子特征及生成机制	马杰利, 罗达通, 刘欣, 王蕾, 李幸, 刘湛, 沈健, 张俊丰, 李晟 (5975)
周口市 2022 年冬季重污染过程中细颗粒物污染特征及成因分析	马英歌, 杨露, 狄睿苗, 马南, 乔利平, 吴宇航, 周文鑫, 赵新华, 张越, 孙志华, 陈长虹, 陈学军, 楼晟荣, 黄成 (5986)
兰州市 PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征和来源解析	马可婧, 孙丽娟 (5997)
北京市门头沟区大气降尘污染特征及其化学组分特征与质量重构	王志焱, 姚琦, 吕富, 王雨薇, 王珊, 王铮, 胡月琪 (6007)
典型热带海滨城市臭氧污染特征与成因分析	韩淑艳, 张鑫, 谢荣富, 霍思思, 高利澳, 吴泓锦, 党娟, 徐文帅, 邢巧, 张庆竹, 王文兴 (6015)
珠江源块泽河流域地表水水化学特征及控制因素	陶兰初, 寸得欣, 涂春霖, 马一奇, 刘振南, 尹林虎, 和成忠, 庞龙, 张七道 (6025)
淮南煤矿区地表水和地下水水化学特征及控制因素	刘海, 康博, 管政亭, 宋阳, 柴义伦 (6038)
巴伊盆地平原区地下水水化学特征及污染源识别	姜凤, 周金龙, 周殷竹, 孙英, 韩双宝, 鲁涵 (6050)
滇池周边浅层地下水硝酸盐来源及转化过程识别	陈清飞, 陈安强, 崔荣阳, 叶远行, 闵金恒, 付斌, 闫辉, 张丹 (6062)
典型铅锌矿流域土壤重金属累积与分布的影响因素分析	潘泳兴, 陈盟, 王樯樯 (6071)
铅锌矿周边岩溶流域重金属污染及健康风险评价	廖红为, 蒋忠诚, 周宏, 覃小群, 黄奇波, 吴华英 (6085)
开封市主要河道沉积物重金属时空分布特征及生态风险评价	丁亚鹏, 卢希昊, 王晓婧, 武鲲鹏, 张浩杰, 李欢, 付贤志, 王洪涛 (6095)
霍邱县城湖泊沉积物重金属环境容量评价与预测	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨 (6106)
基于宏条形码技术的白洋淀水华藻类识别及其驱动因子分析	陈婷, 杜珣, 陈义永, 郭道宇, 熊薇 (6116)
基于种群、功能群对比分析洞庭湖浮游植物群落驱动因素及水质评价	严广寒, 殷雪妍, 汪星, 黄民生, 黄代中, 王思瑞, 张韵宇 (6125)
南水北调东线山东境内调蓄湖库蓝藻种群分布特征及环境驱动因子	韦洁琳, 崔玉静, 李亦真, 张莎莎, 徐杭州, 庞一鸣, 裴海燕 (6137)
广东省药物活性化合物的污染特征及生态风险评价	罗嘉豪, 王煜凯, 原珂, 卢耀斌, 罗丽娟, 栾天罡 (6149)
紫外老化微塑料衍生 DOM 理化特性及其与磺胺嘧啶、铜的络合机制	王筱, 晏彩霞, 聂明华, 莫茜婷, 丁明军, 徐鳌雪, 邓思维 (6159)
共混塑料在海水中的光降解及海洋环境风险	张洪瑜, 高嘉蔚, 陈思宝, 林千惠, 葛安琪, 赵莎莎, 郑浩, 李锋民 (6172)
铁改型蓝藻生物炭的制备及对地表水中磷的协同吸附机制	韩杰, 黄鑫, 杨昆仑, 宋超凡, 缪恒锋 (6181)
基于改进输出系数模型的非点源污染评估及关键源区识别: 以北运河上游流域为例	李华林, 张守红, 于佩丹, 宋卓远, 谢晨新, 张建军 (6194)
农村黑臭水体沉积物细菌群落结构特征	任宏伟, 田彦芳, 路金霞, 石雅君, 王进, 岳正波, 刘晓玲 (6205)
气候变化背景下人类活动对承德坝区植被净初级生产力的影响	单振东, 刘顿, 骆汉, 刘建伟, 张丽梅, 魏宇航 (6215)
氮沉降对陆地生态系统土壤有机碳含量影响的 Meta 分析	杨灵芳, 孔东彦, 刁静文, 郭鹏 (6226)
生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机氮组分和活性氮的影响	曹杨, 沈育伊, 陈运霜, 王紫卉, 牟芝熠, 徐广平, 张德楠, 孙英杰, 毛馨月 (6235)
稻田微氧层和还原层土壤有机碳矿化对氮素添加的响应	毛婉琼, 夏银行, 马冲, 朱光旭, 王忠诚, 涂强, 陈香碧, 吴金水, 苏以荣 (6248)
保护性耕作对玉米田土壤中除草剂残留的影响	刘沅, 汪祖丞, 刘美华, 张天宇, 王健 (6257)
土壤中微塑料对陆生植物的毒性及其降解机制研究进展	刘微, 李宇欣, 荣飒爽, 汪晚晴, 王鑫鑫, 郭嘉朋, 韩冰, 王树涛 (6267)
南水北调丹江口库区土壤中微塑料分布特征及风险评估	王峰, 公玮, 刘哲, 朱重宁, 张润琴, 李志国, 刘毅 (6279)
北京市城市公园土壤铅累积特征、来源及健康风险	安江梅朵, 张瑞卿, 郭广慧, 王云涛 (6287)
锌冶炼废渣重金属在地块土壤中的垂向迁移特征及归趋	杨爱萍, 王小燕, 肖细元, 王倩如, 胡建华, 郭朝晖, 彭驰 (6297)
典型硫铁矿农区土壤-作物系统重金属生态风险及迁移富集特征	成晓梦, 赵辰, 吴超, 孙彬彬, 曾道明, 贺灵 (6309)
不同土壤-小麦体系中铅镉交互作用与转运特征	寇萌, 樊宇, 苏梦贤, 熊娟, 汪明霞, 谭文峰 (6319)
开花后小麦地上部镉、砷分布及其转运特征	王秋实, 华桂丽, 李翔宇, 冯柳旭, 唯康鑫, 耿丽平, 薛培英, 刘文菊 (6328)
黑河上游不同植被类型土壤细菌群落多样性、功能及季节动态	王竹, 刘扬, 王芳, 王义成 (6339)
典型煤炭产业园区土壤重金属污染对细菌群落结构的影响	郑丹凤, 刘娣, 苏超, 张红 (6354)
增氧模式对水稻根际微生物多样性和群落结构的影响	肖德顺, 徐春梅, 王丹英, 陈松, 褚光, 刘元辉 (6362)
紫色土硝化势和氨氧化微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应	李越, 王子芳, 贾丽娟, 谢军, 熊子怡, 高明 (6377)
连作对参根际土壤理化性质、微生物活性及群落特征的影响	杨阳, 李海亮, 马凯丽, 虞凡枫, 牛世全 (6387)
粪肥施用对抗生素在土壤上吸附的影响	罗珊, 胡锦昇, 唐翔宇, 耿春文, 程建华 (6399)
基于脱钩指数的工业园区碳排放与经济发展关系	陈四瑜, 刘晶茹, 孙光明 (6412)
近 5 年我国部分城市人群生活垃圾特性	王小波, 刘安琪, 钟慧琼, 赵增立 (6421)
《环境科学》征订启事 (5963) 《环境科学》征稿简则 (6193) 信息 (5923, 6024, 6037)	

巴伊盆地平原区地下水水化学特征及污染源识别

姜凤^{1,2,3}, 周金龙^{1,2,3*}, 周殷竹⁴, 孙英^{1,2,3}, 韩双宝⁴, 鲁涵^{1,2,3}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水文水资源工程技术研究中心, 乌鲁木齐 830052; 3. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 乌鲁木齐 830052; 4. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 保定 071051)

摘要: 为探明新疆巴伊盆地平原区地下水水化学特征及形成机制并解析污染源, 综合运用数理统计、图解法和 PCA-APCS-MLR 模型等方法, 对 2022 年 8 月采集的 4 组泉水样、20 组潜水样和 11 组承压水样的测试结果进行分析。结果表明, 研究区地下水化学类型复杂多样, 泉水以 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型地下水为主, 潜水以 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Ca}$ 型地下水为主, 承压水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl} \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型; 未利用地承压水水化学类型单一 ($\text{Cl} \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型), 耕地及城乡居民用地承压水水化学类型复杂, 表明地下水受到人类活动影响; 地下水演化过程主要受到水岩相互作用与阳离子交换作用的影响, 从泉水至潜水至承压水阳离子交换作用逐渐增强, 石膏及硬石膏的风化溶解作用逐渐减弱、岩盐的风化溶解作用逐渐加强; 溶滤-富集作用 (主要为蒸发岩的溶解)、人类活动因素 (工业污染、农业污染、生活污染) 和原生地质环境是影响研究区地下水的主要因素。

关键词: 地下水; 水化学特征; 成因分析; 污染源识别; 巴伊盆地

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)11-6050-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202211078

Hydrochemical Characteristics and Pollution Source Identification of Groundwater in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin

JIANG Feng^{1,2,3}, ZHOU Jin-long^{1,2,3*}, ZHOU Yin-zhu⁴, SUN Ying^{1,2,3}, HAN Shuang-bao⁴, LU Han^{1,2,3}

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Hydrology and Water Resources Engineering Research Center, Urumqi 830052, China; 3. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, China; 4. Center for Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey, Baoding 071051, China)

Abstract: Groundwater is an important water supply source for production and life in arid and semi-arid areas. This study revealed the hydrochemical characteristics of groundwater in the Barkol-Yiwu Basin of Xinjiang and analyzed the pollution sources, which is of great significance in the sustainable utilization of local groundwater. Four spring water samples, 20 unconfined groundwater samples, and 11 confined groundwater samples collected in August 2022 were analyzed using mathematical statistics, a graphic method, and the PCA-APCS-MLR model. The results showed that the chemical types of groundwater in the study area were complex and diverse. The spring water was mainly $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ type groundwater, the chemical types of unconfined groundwater were mainly $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ and $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Ca}$, and the chemical types of confined groundwater were $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ and $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl} \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$. The hydrochemical type of confined water in unused land was single ($\text{Cl} \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$), and the hydrochemical types of confined groundwater in cultivated land and urban and rural residential land were complex, indicating that groundwater was affected by human activities. The evolution process of groundwater was mainly affected by water-rock interactions and cationic exchange. The cation exchange from spring water to unconfined groundwater to confined groundwater was gradually enhanced, the weathering and dissolution of gypsum and anhydrite was gradually weakened, and the weathering and dissolution of rock salt was gradually strengthened. Leaching-enrichment (mainly the dissolution of evaporite), human activities (industrial, agricultural, and domestic pollution), and the primary geological environment were the main factors affecting groundwater in the study area.

Key words: groundwater; hydrochemical characteristics; genetic analysis; pollution source analysis; Barkol-Yiwu Basin

地下水作为维系人类生存发展的重要供水水源, 对于保障城乡居民生活用水、工业生产用水和农业生产用水, 维护生态环境平衡等方面都起到不可或缺的作用^[1]。尤其是我国西北部地区, 地表水资源无法满足基本用水需求, 地下水则成为人类生存发展的重要保障。

地下水在水循环过程中的形成与演化受到水-岩相互作用^[2,3]、蒸发浓缩作用^[4,5]、离子交换作用^[6]、混合作用^[7,8]和氧化还原作用^[9]等自然因素以及城市化发展^[10]、地下水超采^[11]和土地利用^[12,13]等人为因素的影响。深入研究地下水化学特征及其形成演化过程, 不仅能够有效揭示区域地下

水与环境的相互作用机制, 同时对干旱及半干旱地区的地下水资源管理、规划、保护及可持续开发和利用具有深远意义^[14]。我国在地下水化学特征及其演化规律方面已有较为系统的研究, Piper 三线图^[15]、Gibbs 图^[16]和离子比例关系^[17]等方法研究地下水水化学影响因素的主要方法。传统的水化学及数理统计方法难以定量解释地下水环境成因机制, 以主成分分析为主的多元统计模型为地下水污

收稿日期: 2022-11-07; 修订日期: 2023-01-20

基金项目: 国家科技基础资源调查专项 (2021xjkk1000)

作者简介: 姜凤 (1995 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水文地球化学及地下水保护, E-mail: 1003445227@qq.com

* 通信作者, E-mail: zjzhoujl@163.com

染源分析提供了一种更加方便快捷的方法^[18,19]。

巴里坤-伊吾盆地(以下简称巴伊盆地)位于新疆维吾尔自治区(以下简称新疆)东部哈密市,矿产资源丰富,是新疆重要的煤炭开发基地。近年来,由于地下水的持续开发与利用,造成水位下降、地下水污染、生态环境退化和土地沙化等诸多问题^[20]。已有研究表明,巴伊盆地地下水水质受到三氮、 SO_4^{2-} 、 F^- 、总硬度(TH)和溶解性总固体(TDS)等指标的影响较大,地下水有关的环境问题日益突出^[21]。以往的研究多集中于地下水水质评价及水化学特征分析^[22,23],对巴伊盆地地下水水化学成因及污染源分析方面的研究尚显不足,本文综合运用数理统计、图解法和PCA-APCS-MLR模型对巴伊盆地平原区地下水水化学特征及成因和污染源进行分析,旨在为区域地下水生态环境建设及完善地下水污染防控措施等方面提供理论依据。

1 研究区概况

巴伊盆地位于新疆东北部地区,天山北麓东段,隶属于哈密市,地理坐标为 $91^{\circ}15' \sim 96^{\circ}07' \text{E}$, $42^{\circ}50' \sim 45^{\circ}06' \text{N}$ 。盆地东北部与蒙古国接壤,南接哈密市伊州区,西毗昌吉回族自治州木垒哈萨克自治县。研究区总面积为 $5.71 \times 10^4 \text{ km}^2$,平原区面积为 $2.23 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。巴伊盆地属温带大陆性干旱气候,降水量偏少,蒸发量大,日照时间长,昼夜温差悬殊,山地、盆地之间气候差异明显,年平均气温 3.8°C 。山区多年平均降水量 500 mm 左右,蒸发量 $1\,100 \text{ mm}$ 左右;平原区多年平均降水量 30 mm 左右,蒸发量 $2\,300 \text{ mm}$ 左右^[24]。

巴伊盆地地势整体东高西低,最高海拔 $4\,888 \text{ m}$ 、最低海拔 $400 \sim 500 \text{ m}$ 。地貌整体由山前向盆地中心缓倾,沉积较厚,主要为冲积物、洪积物和湖积物,在河谷的下游形成冲积扇,洪积物成带状分布于山前,在局部区域侵蚀后形成谷地。区内主要地层为古生界、中生界和新生界,其中新生界分布最广,以第四系松散堆积物为主。含水层岩性主要为卵砾石、砂砾石和含砾中-细砂,隔水层岩性为泥岩和泥砂岩。三塘湖盆地和淖毛湖盆地平原区广泛分布多层结构潜水-承压水,上部第四系松散岩类孔隙潜水含水层岩性主要为砂砾石和含砾中粗砂,下部碎屑岩类孔隙裂隙承压水含水层岩性主要为砂砾岩、砂岩和砾岩^[25]。

研究区山区地下水类型主要为基岩裂隙水和冻结层水,平原区地下水类型主要为松散岩类孔隙水和碎屑岩类裂隙孔隙水(图1)。山区地下水主要由季节雪融水和降水入渗补给,平原区地下水补给方

式为河谷潜流、山前基岩裂隙水侧向补给、降水入渗补给和农田灌溉入渗补给等。地下水自山前向盆地中心径流,排泄方式主要为人工开采、潜水蒸发和泉水溢出等^[23]。

2 材料与方法

2.1 地下水采样与测试

2022年7月29日至8月9日共采集巴伊盆地平原区地下水水样35组,其中泉水4组、潜水20组、承压水11组。井深为 $5 \sim 140 \text{ m}$,2个潜水水样位于基岩裂隙水区(吐葫芦乡取样点)和碎屑岩类裂隙孔隙水区(下马崖乡取样点),1个承压水水样(三塘湖镇南部取样点)为碎屑岩类裂隙孔隙承压水,其余均为第四系松散岩类孔隙水,取样点分布如图1所示。地下水样品采集严格按照《地下水环境监测技术规范》(HJ 164-2020)执行,取样前用待取水样润洗取样瓶3次,经薄膜密封后冷藏保存并尽快送检。水样检测包含: Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、TH、TDS、pH、耗氧量和氧化还原电位(Eh)等12项一般化学指标及 F^- 和 NO_3^- (以N计)等2项毒理学指标,所有指标的测定均严格按照监测技术规范中推荐的分析方法执行。

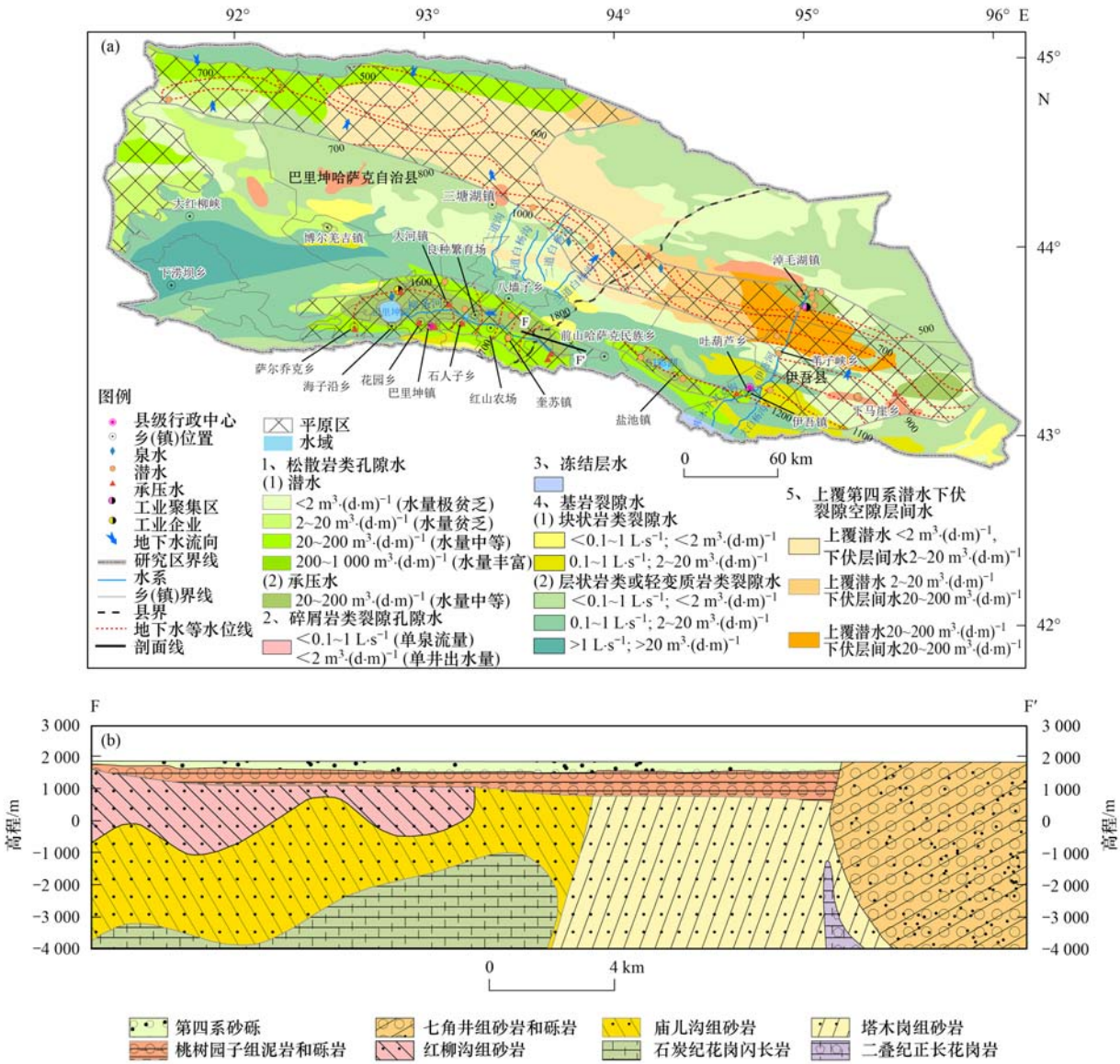
2.2 研究方法

为保证数据的可靠性,分析前对所有测试结果进行阴阳离子平衡可靠性检验,结果显示所有水样的阴阳离子平衡相对误差 E 均在 $\pm 5\%$ 之间,测试结果可靠。本文利用ArcGIS10.8、Origin2022、Surfer15和PHREEQC软件进行水化学特征分析,利用SPSS软件采用PCA-APCS-MLR(绝对主成分得分多元线性回归)模型进行地下水污染源解析。

3 结果与讨论

3.1 地下水水化学特征

研究区地下水水化学指标统计见表1,水样中pH变化范围为 $7.18 \sim 8.49$,均值为 7.82 ,整体呈弱碱性; $\rho(\text{TDS})$ 变化范围为 $184.3 \sim 2\,309.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,均值为 $511.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,取样点中 11.4% 为微咸水,其余均为淡水;TH变化范围为 $88.1 \sim 530.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,均值为 $230.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,取样点中软水、微硬水、硬水和极硬水,分别占水样的 25.7% 、 51.5% 、 17.1% 和 5.7% ;主要阳离子质量浓度大小顺序为: $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$,阴离子质量浓度大小顺序为: $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^-$;Eh变化范围为 $-71.5 \sim 1.2 \text{ mV}$,除潜水中1个取样点为正值,其余均为负值,表明含水层整体处于还原环境中。地下水中潜水水化学指标变异程度整体大于泉水和承压水, Na^+ 、



(a) 水文地质及地下水取样点分布, (b) 水文地质剖面; 改自文献[26]

图 1 区域水文地质及地下水取样点分布和水文地质剖面

Fig. 1 Hydrogeology and distribution of sampling sites and hydrogeological profile in the study area

表 1 地下水化学指标统计¹⁾

Table 1 Statistics of groundwater hydrochemical indices

指标	泉水 (N=4)			潜水 (N=20)			承压水 (N=11)			超标率 /%
	最小值 ~ 最大值	均值	变异系数	最小值 ~ 最大值	均值	变异系数	最小值 ~ 最大值	均值	变异系数	
K ⁺	0.45 ~ 4.21	1.64	1.06	0.66 ~ 5.39	1.73	0.57	0.93 ~ 2.86	1.78	0.36	/
Na ⁺	21.40 ~ 206.4	79.7	1.09	21.30 ~ 577.1	92.0	1.47	24.30 ~ 303.2	91.59	1.11	17.1
Ca ²⁺	28.10 ~ 80.2	47.1	0.49	24.90 ~ 188.1	75.1	0.51	35.30 ~ 136.0	76.96	0.39	/
Mg ²⁺	4.86 ~ 11.7	7.97	0.35	4.38 ~ 27.7	11.3	0.50	3.16 ~ 31.9	14.99	0.62	/
Cl ⁻	9.22 ~ 136.9	45.4	1.35	12.80 ~ 602.2	82.2	1.61	14.20 ~ 273.1	76.28	1.17	5.71
SO ₄ ²⁻	47.40 ~ 351.6	138.7	1.03	40.7 ~ 888.5	176.8	1.12	38.80 ~ 530.0	176.32	1.03	17.1
HCO ₃ ⁻	105.10 ~ 158.9	131.4	0.17	72.0 ~ 321.5	168.8	0.33	121.00 ~ 352.0	198.02	0.36	/
TDS	202.70 ~ 860.0	387.0	0.82	184.30 ~ 2 309.2	521.9	0.94	186.10 ~ 1 380.2	537.59	0.74	11.4
TH	90.10 ~ 248.4	150.5	0.46	88.10 ~ 530.7	233.9	0.47	101.01 ~ 470.7	253.90	0.40	5.71
pH	7.72 ~ 8.38	8.15	0.04	7.20 ~ 8.22	7.84	0.04	7.18 ~ 8.49	7.66	0.06	—
NO ₃ ⁻ -N	0.50 ~ 2.35	1.24	0.64	0.61 ~ 14.9	3.30	0.98	0.93 ~ 6.70	3.04	0.71	—
F ⁻	0.52 ~ 1.15	0.68	0.46	0.14 ~ 2.54	0.61	1.14	0.21 ~ 1.25	0.52	0.8	20.0
Eh	-29.80 ~ -51.2	-42.5	0.26	-71.50 ~ 1.2	-41.8	-0.36	-25.50 ~ -67.7	-43.3	0.29	/

1) pH 和变异系数无量纲, Eh 单位为 mV, 其余指标单位为 mg·L⁻¹, “/” 表示《地下水质量标准》(G/T 14848-2017) 中无此项标准, “—” 表示未超标

Cl^- 、 SO_4^{2-} 空间分布不均,具有较强的变异性(变异系数 >1),其余指标变异程度相对较小,变异系数介于 $0.01 \sim 1$ 之间。

采用 Durov 图对地下水水化学特征进行分析(图 2),研究区地下水化学类型共计 9 种,以 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型(占比 42.9%,主要分布在三塘湖镇南部、大河镇、盐池镇和淖毛湖镇)、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca}$ 型(占比 14.3%,分布在奎苏镇北部、吐葫芦乡和苇子峡乡)和 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型(占比 14.3%,分布在萨尔乔克乡、盐池镇和下马崖乡)地下水为主(图 3)。泉水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型,潜水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca}$ 型,承压水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型。本次采样泉水

主要位于淖毛湖镇北部和三塘湖镇南部,该区域广泛赋存多层结构第四系孔隙潜水-碎屑岩类孔隙裂隙承压水,泉水通过大气降水及地表径流等补给源下渗至地层深部,以断层和裂隙提供良好的导水和输水通道排泄至地表;区内泉水水化学类型和潜山水化学类型均为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型,承压水水化学类型为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型,上部孔隙潜水和下部碎屑岩类孔隙裂隙承压水间存在密切的水力联系,由于隔水层分布的不连续性及断裂活动,洪积平原中上部为潜水补给承压水,下部为承压水越流补给潜水^[25]。沿地下水径流方向,蒸发岩矿物的溶解作用使 SO_4^{2-} 和 Na^+ 得到富集,巴里坤盆地承压水由 $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 和 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型转变为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型。

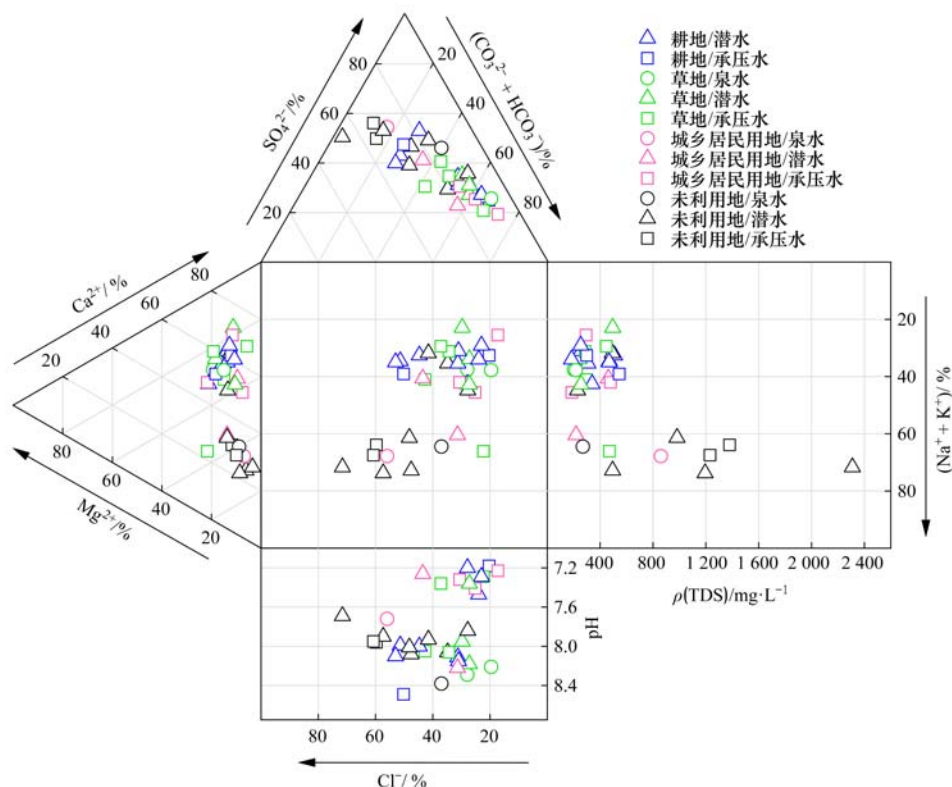


图 2 地下水 Durov 图

Fig. 2 Durov diagram of groundwater

土地利用类型可以直接反映人类活动对地下水化学成分的影响^[27],研究区多以草地及未利用地为主。草地中地下水取样点 9 个,地下水化学类型为 4 种,泉水为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型,潜水主要为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型,承压水为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca}$ 型、 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型和 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型;城乡居民用地中取样点 6 个,地下水化学类型为 4 种,泉水为 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型、潜水为 $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型,承压水为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型;耕地取样点 10 个,地下水化学类

型为 5 种,潜水为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型,承压水为 $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型;未利用地取样点 10 个,地下水化学类型为 5 种,泉水为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型,潜水为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca}$ 型、 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 型、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型和 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型,承压水为 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型。受地质环境等因素影响,研究区未利用地中潜山水化学类型丰富,承压水由于处于相对封闭环境水质不易受到感染,水化学类型单一,耕地及建设用地大量的地下水用水需求及

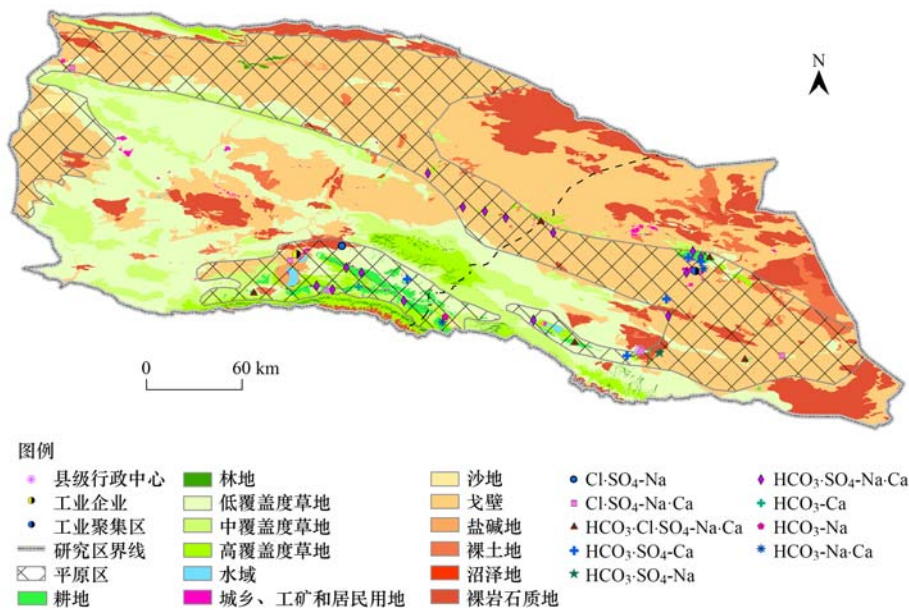


图 3 土地利用及水化学类型分布

Fig. 3 Land use and hydrochemical type distribution

水源污染等因素,改变了原有的地下水环境使承压水受到相邻含水层的越流补给,水化学类型逐渐丰富,从侧面反映出研究区地下水环境除了受到原生地质条件影响外,还受到人类活动因素影响.

3.2 水化学成因分析

3.2.1 地下水主要控制因素

Gibbs 图作为一种半对数坐标图,可以较为直观地判别地下水中化学组分受到溶滤作用、蒸发-浓缩作用和大气降水作用的影响程度^[28]. 以岩石风化作用为主导因素的样点分布在 Gibbs 图中部偏左侧,受大气降水作用控制的样点分布在右下角,受蒸发结晶作用控制的样点分布在右上角^[29]. 研究区地下水样品大多集中在中间部分(图 4),表明地下水

中离子主要受到岩石风化溶解作用影响,蒸发浓缩及大气降水作用对水化学组分的影响较小,部分取样点在模型范围之外,说明除了受到上述作用影响以外,还可能受到地质环境、人类活动等其他因素的影响.

3.2.2 溶滤作用

3.2.2.1 离子比值法

地下水中的离子成分主要是矿物溶解的产物,其中分布最为广泛的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 离子可以很大程度上决定地下水化学的基本特性. 由于地下水与含水层矿物之间发生反应,探讨含水层矿物的水-岩相互作用,对了解地下水化学形成机制有着重要作用^[30]. 研究区地下水

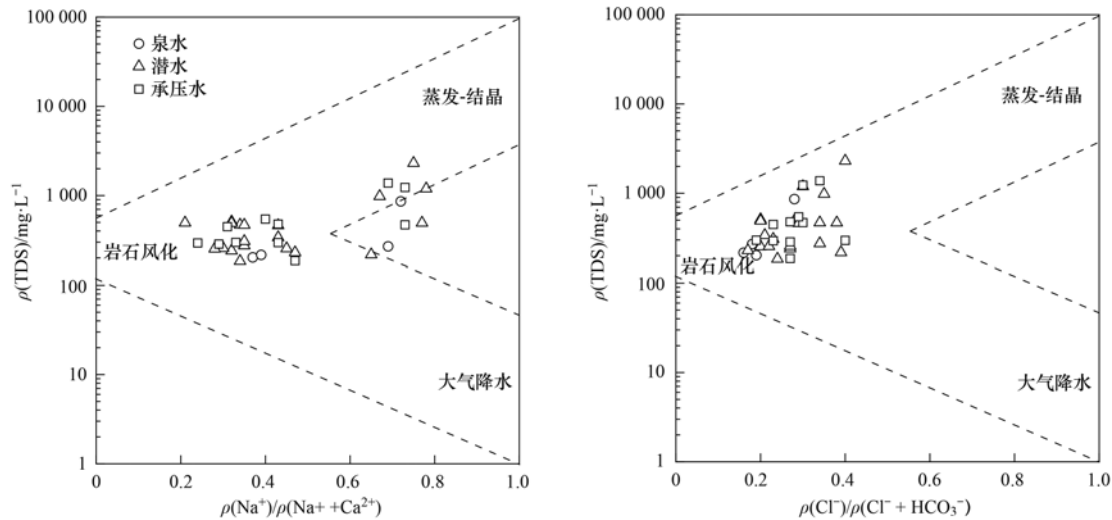
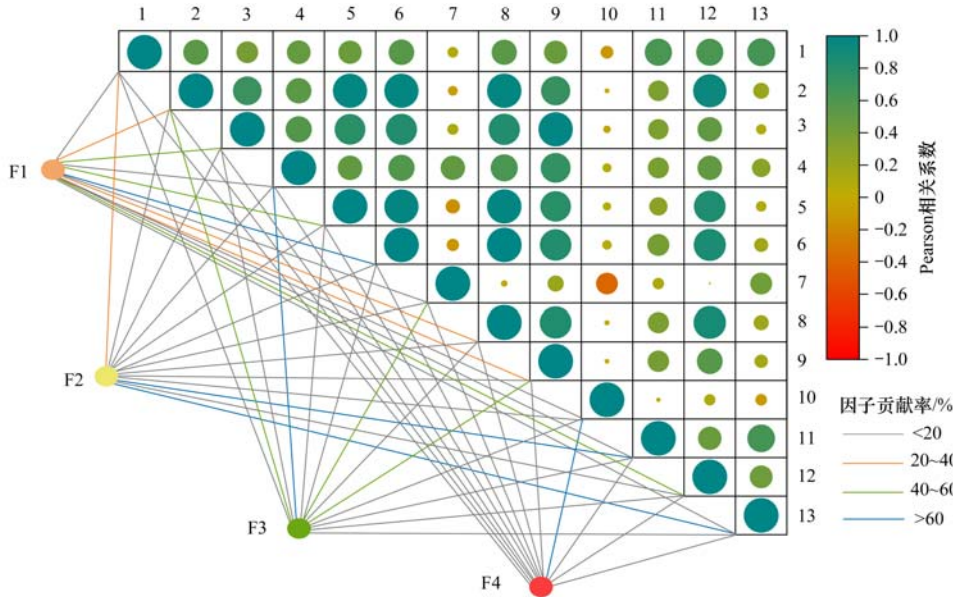


图 4 地下水水化学 Gibbs 图

Fig. 4 Gibbs plots of groundwater hydrochemistry

中 TDS 与 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 和 HCO_3^- 相关性依次减弱 (图 5), 相关系数分别为 0.99、0.978、0.978、0.813、0.609、0.529 和 -0.036 , TDS 与 HCO_3^- 呈负相关且显著性较小, 表明碳酸盐岩的风化溶解不是地下水中离子组分变化的主要因素. 通常情况下, 硅酸盐岩和蒸发盐岩在风化溶解过程中会释放 K^+ 和 Na^+ , Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 是碳

酸盐岩及蒸发盐岩风化溶解的产物, Cl^- 和 SO_4^{2-} 源于蒸发盐岩的风化溶解^[31,32], 取样点中 SO_4^{2-} 和 Cl^- 分别与 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 具有显著相关性, 表明水样中离子组分可能来源于硅酸盐岩和蒸发盐岩的风化溶解. 研究区内岩盐、石膏和芒硝等蒸发盐岩矿产资源丰富, 进一步表明地下水的主要组分来源为蒸发盐岩的风化溶解^[33].



1. K^+ , 2. Na^+ , 3. Ca^{2+} , 4. Mg^{2+} , 5. Cl^- , 6. SO_4^{2-} , 7. HCO_3^- , 8. TDS, 9. TH, 10. pH, 11. NO_3^- -N, 12. F^- , 13. 耗氧量

图 5 相关性分析及因子贡献

Fig. 5 Correlation Analysis and Factor Contribution

不同的岩性在与地下水的相互作用过程中会对天然水化学成分造成差异, 水中主要离子的比例关系, 可在一定程度上反映岩石风化溶解对地下水化学组分的影响^[34]. 利用 $\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-$ 与 HCO_3^- 毫克当量比值关系可以判断碳酸盐岩和蒸发盐岩的溶解对离子组分的影响^[35], 研究区 45.0% 的潜水取样点分布在 $(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)/\text{HCO}_3^- = 1$ 线上方 [图 6(a)], 55.0% 的潜水取样点分布在等值线下方, 说明潜水

中离子可能受碳酸盐岩和蒸发盐岩溶解共同作用影响, 承压水中 54.5% 取样点均位于 1:1 等值线上方, 45.5% 的取样点在等值线下方, 说明承压水也受到碳酸盐岩和蒸发盐岩溶解共同作用影响, 泉水与潜水及承压水呈现相似规律; 进一步由 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$ 的比值关系可以判断离子组分受碳酸盐岩或蒸发盐岩及硅酸盐岩的溶解程度, 当地下水中离子主要来自方解石、白云石和石膏溶解

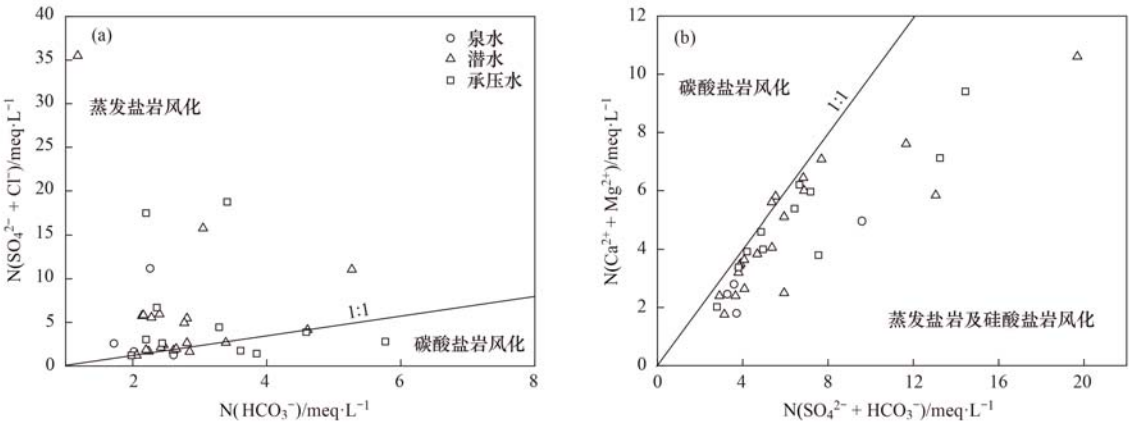


图 6 $(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)$ 与 HCO_3^- 和 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 与 $(\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-)$ 离子比值关系

Fig. 6 Relationships between $(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)$ and HCO_3^- , $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ and $(\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-)$

时,取样点应位于 $y = x$ 直线附近^[36]. 如图 6(b) 所示,地下水取样点中仅有 2 个潜水取样点位于 1:1 等值线上方,其余点均在等值线下方,表明地下水中 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 浓度过剩,需要其他阳离子进行平衡^[37], SO_4^{2-} 与 Na^+ ($r = 0.967$) 和 Ca^{2+} ($r = 0.802$) 极显著相关, HCO_3^- 与阳离子关系均不显著,区内芒硝 ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) 和石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 矿物丰富,这些蒸发盐岩的溶解成为硫酸盐离子的主要来源,由此推断蒸发盐岩的风化溶解在地下水中占主导地位,硅酸盐岩和碳酸盐岩的溶解作用较小.

Na^+ 主要来源于蒸发盐岩风化及富钠矿物风化^[38]. 如图 7(a) 所示,地下水取样点中仅有 2 个潜水取样点位于 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/\text{Cl}^- = 1$ 线下方, Na^+ 浓度明显大于 Cl^- 浓度. 当 Na^+ 与 Cl^- 比值关系接近于 1 时,表示地下水中 Na^+ 主要来源于岩盐的溶解^[39], 可见,地下水中 Na^+ 除了受到岩盐的溶解外,还可能受到富钠矿物及蒸发盐岩的溶解和阳离子交

换等作用.

利用 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)/(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ 的关系可以判断地下水受阳离子交换作用是否盛行^[40,41]. 如图 7(b) 所示,地下水取样点均分布在斜率 -1 的直线附近,说明地下水中阳离子交换作用显著. 按吸附能力的强弱顺序为: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$, 但地下水中阳离子的相对浓度与吸附能力呈现正相关性,当离子浓度越大的时候,其吸附能力也有所增强. 研究区水样中离子平均当量浓度表现为 $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} \gg \text{Mg}^{2+} \gg \text{K}^+$, Ca^{2+} 的平均当量浓度是 Mg^{2+} 的 3.64 倍,说明地下水中的阳离子交换作用主要体现在 Na^+ 和 Ca^{2+} , 且大部分取样点 Ca^{2+} 当量浓度大于 Na^+ , Ca^{2+} 的强吸附力置换出了矿物表面的 Na^+ . 泉水、潜水和承压水分别分布在斜率为 -1.134 ($R^2 = 0.983$)、-0.939 5 ($R^2 = 0.975$) 和 -0.944 4 ($R^2 = 0.987$) 的直线附近,表明从泉水至潜水至承压水阳离子交换作用逐渐加强.

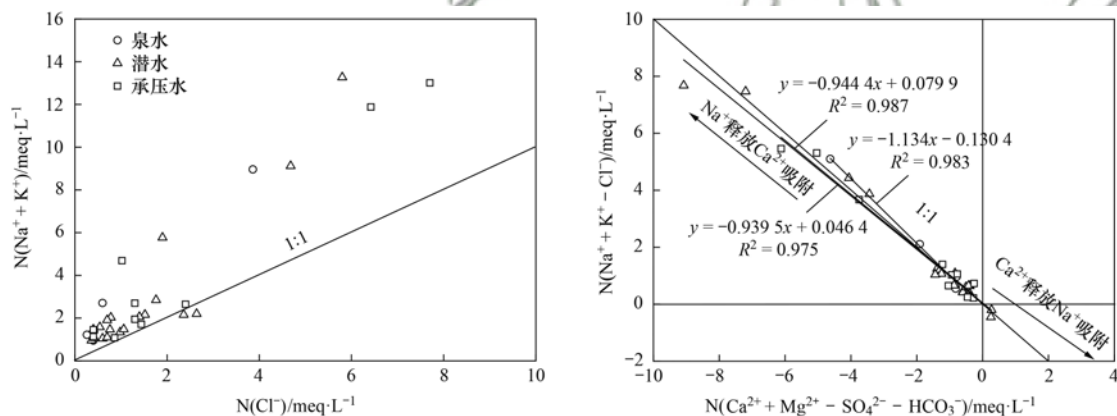


图 7 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ 与 Cl^- 和 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$ 与 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ 离子比值关系

Fig. 7 Relationships between $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ and Cl^- , $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$ and $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$

3.2.2.2 饱和指数法

为进一步了解地下水中可能的矿物相存在情况及溶解状态,采用 PHREEQC 软件计算矿物的饱和指数(SI). 当 $\text{SI} < 0$ 时,表明该矿物处于不饱和(溶解)状态; $\text{SI} > 0$,表示该矿物处于饱和(沉淀)状态; $\text{SI} = 0$,表示水溶液与矿物正好处于平衡状态^[42],但是由于水质分析以及矿物平衡常数和离子活度计算中的误差,使矿物饱和指数存在不确定性,因此在实际情况中,一般认为当 SI 为 -0.5 ~ 0.5 时,矿物相对水溶液处于平衡状态^[43]. 由图 8 可看出,方解石、白云石、文石大部分饱和指数介于 -0.5 ~ 0.5 之间,与 TDS 关系不显著,平均饱和指数分别为 0.40、0.34 和 0.25,部分小于 0 的取样点位于巴里坤县奎苏镇及大河镇附近,此区域地下水存在微弱的碳酸岩溶解作用,泉水、潜水及承压水整体处于平衡状态;石膏、硬石膏、岩盐的饱和指数整体随 TDS 的

增大而增大,平均饱和指数分别为 -1.59、-1.90 和 -7.20,取样点整体处于溶解状态,石膏(R^2 分别为 0.942、0.918 和 0.834)及硬石膏(R^2 分别为 0.943、0.916 和 0.833)从泉水至潜水至承压水溶解作用逐渐减弱,岩盐从泉水($R^2 = 0.925$)至潜水($R^2 = 0.930$)至承压水($R^2 = 0.943$)溶解作用逐渐增强. 说明石膏、硬石膏和岩盐等蒸发盐岩的风化溶解是地下水中化学成分的主要控制因素,与前文分析结果一致.

3.3 污染源解析

由 3.1 节和 3.2 节可知,研究区地下水水化学特征除了受到原生地质条件、水-岩相互作用等因素影响外,还受到人类活动因素影响,为进一步确定地下水各污染源的影响程度,采用 SPSS 进行 PCA-APCS-MLR 模型分析. 以《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)为依据,考虑检出率及超标情况双重因

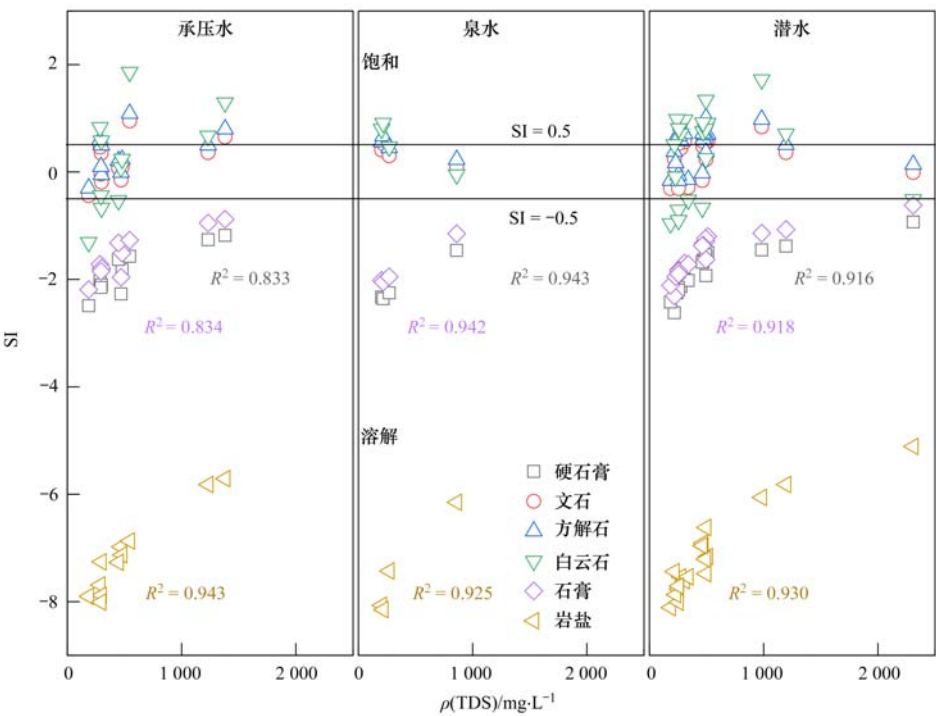


图8 TDS与SI关系

Fig. 8 Relationship between TDS and SI

素,本文选取 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、TDS、TH、pH、 NO_3^- 、 F^- 和耗氧量等 13 项指标进行污染源分析. 为确定选取的指标是否适合做主成分分析,对各指标实测值标准化处理后,进行 KMO-Bartlett 球形检验,显著性水平接近于 0,表明各指标变量之间具有较强的相关性,满足检验标准,可以进行主成分分析. 本研究共提取 4 个公因子: F1(贡献率 54.829%)、F2(贡献率 16.099%)、F3(贡献率 10.697%)和 F4(贡献率 7.250%),累积方差贡献率为 88.874%.

由成分矩阵结果可以看出(表 2),主成分 F1 是

影响区内地下水的主要因素,与其关联度较高的指标有 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、TDS、TH 和 F^- ,贡献率分别为 43.13%、37.66%、59.09%、66.85%、29.62%、33.11%和 41.57%(图 9),TDS 与其他指标均呈现正相关关系(图 5). 平原区含水层颗粒物松散,空隙发育,有良好的径流条件,由前文分析可知,石膏(Ca^{2+} 、 SO_4^{2-})、岩盐(Na^+ 、 Cl^-)和芒硝(Na^+ 、 SO_4^{2-})等蒸发盐岩的风化溶解作用在地下水循环中占据主导因素,同时地下水流动过程中矿物的溶解和富集,影响着 TDS 和 TH 的变化,因此将 F1 命名为溶滤-富集因子.

表 2 公因子特征值和成分矩阵¹⁾

Table 2 Common factor eigenvalues and component matrix

总方差解释				成分矩阵				
公因子	初始特征值			化学指标	公因子			
	总计	方差贡献率/%	累积贡献率/%		F1	F2	F3	F4
1	7.128	54.829	54.829	K^+	0.406	0.766	0.047	-0.112
2	2.093	16.099	70.927	Na^+	0.934	0.26	-0.063	-0.003
3	1.391	10.697	81.625	Ca^{2+}	0.84	0.012	0.345	-0.028
4	0.942	7.250	88.874	Mg^{2+}	0.522	0.246	0.703	0.188
5	0.656	5.048	93.923	Cl^-	0.979	0.111	-0.067	0.029
6	0.358	2.753	96.676	SO_4^{2-}	0.969	0.213	-0.003	0.069
7	0.283	2.178	98.854	HCO_3^-	-0.15	0.19	0.854	-0.313
8	0.104	0.797	99.651	TDS	0.972	0.206	0.061	0.016
9	0.025	0.191	99.842	TH	0.832	0.076	0.474	0.029
10	0.02	0.151	99.993	pH	0.022	-0.044	-0.12	0.981
11	0.001	0.007	100.000	NO_3^- -N	0.227	0.789	0.12	0.08
12	0.000 02	0.000	100.000	F^-	0.763	0.498	-0.081	0.081
13	0.000 004	0.000	100.000	耗氧量	-0.022	0.908	0.204	-0.076

1) 黑体字表示指标在因子上的最高载荷值

主成分 F2 主要荷载为 K^+ 、 NO_3^- 和耗氧量,贡献率分别为 47.79%、70.88% 和 71.94%。耗氧量可间接反映水体受有机污染的程度,地下水有机物污染源主要来源于工业废水、废渣和渗滤液的不规范处理^[44]。研究区工业及农业活动频繁,氮肥、钾肥等肥料及农药的大量使用,通过灌溉水及大气降水入渗到地下水中,造成地下水污染,同时未经处理的人畜粪便及生活污水也会对地下水造成一定影响,因此将 F2 命名为人类活动因子。

F3 主要的影响指标为 Mg^{2+} 和 HCO_3^- ,贡献率分别为 66.13% 和 54.09%。地下水中取样点

$\rho(CO_2)$ 变化范围为 $0 \sim 5.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,地层深源的 CO_2 进入水后,生成的 H^+ 与地层中有机质碳相结合生成烃类即碳氢化合物^[45],少部分 HCO_3^- 及 Mg^{2+} 来自碳酸岩矿物的溶解,由前文知白云石等矿物与水溶液整体处于平衡状态。可见, F3 为原生地质因子。

F4 主要荷载为 pH,贡献率为 95.98%。研究区地下水整体处于弱碱性,pH 与 HCO_3^- 表现为负相关,地下水环境受到酸碱度的影响,同时 pH 变异程度较小,符合地下水环境天然形成规律。因此将 F4 命名为地质环境因子。

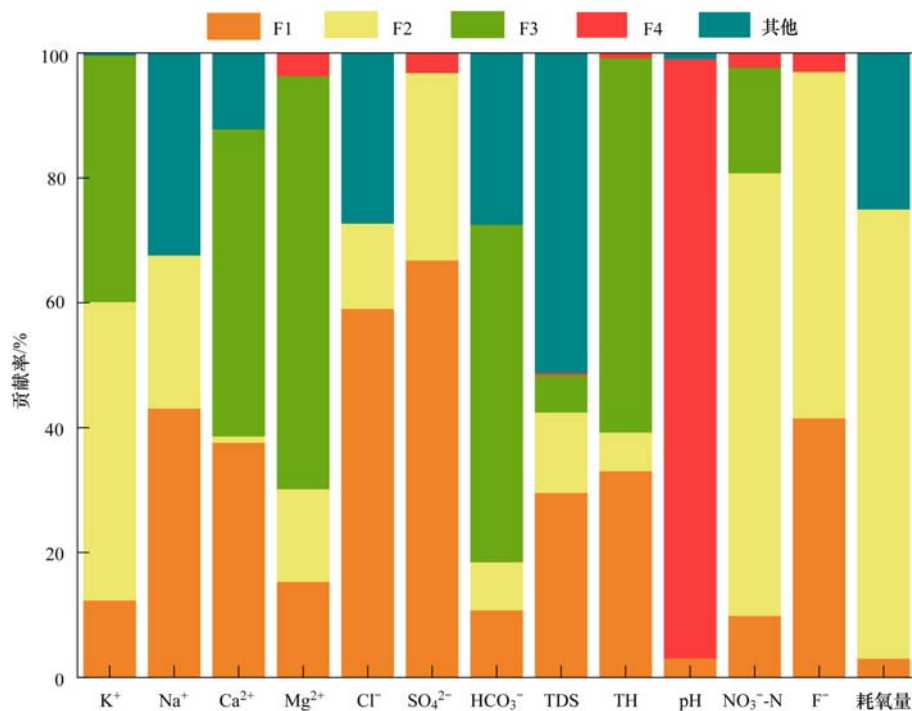


图9 各因子中指标源贡献率

Fig. 9 Contribution rate of index source in each factor

3.4 污染源空间分布

分别对4个主成分在所有取样点的因子得分进行空间插值,得出各成分在研究区内的分布特征及对地下水的影响程度(图10),因子得分越高的区域表示相应污染源在该区域的影响程度越高。

F1 主要影响区域为巴里坤县三塘湖镇北部、大红柳峡乡北部,整体呈递增式带状分布。此区域前山区地带基岩裂隙水丰富,地下水受到山前侧向补给及地表水入渗补给,山前倾斜平原分布单一结构潜水,呈片状分布,孔隙发育,透水性强,含水层岩性主要为卵砾石和砂砾石;远离山前,沉积物逐渐变为砂砾石、砂和亚砂土互层,厚度变薄^[25];含水层空隙发育,径流较强,水力坡度至平原区逐渐变缓,区内丰富的蒸发盐岩矿物在地下水径流过程中受到溶滤-富集的水文地球化学作用。

F2 高值区主要分布在巴里坤县博尔羌吉镇南部、三塘湖镇南部及大河镇。该区域主要分布在城乡、工矿、居民用地及耕地范围,人员密集,周围有大量工业企业,地下水开采程度高,以农业灌溉为主,水资源需求量大,已造成了地下水位的持续下降,与3.1节分析一致,地下水开采及工农业和生活污水的不合理排放产生的水头差使地下水环境发生改变,造成地下水的面源污染。

F3 高值区主要分布在下马崖乡东部、苇子峡乡和大河镇,白云石等碳酸盐岩矿物的原生地质条件是该区域地下水环境的主要因素,由于 HCO_3^- 对 pH 具有一定调节作用且呈现负相关性,部分 F3 低值区与 F4 高值区相对应。

F4 主要影响区域为萨尔乔克乡及大红柳峡乡东部,此区域的高值区也反映了 pH 的分布特征,这

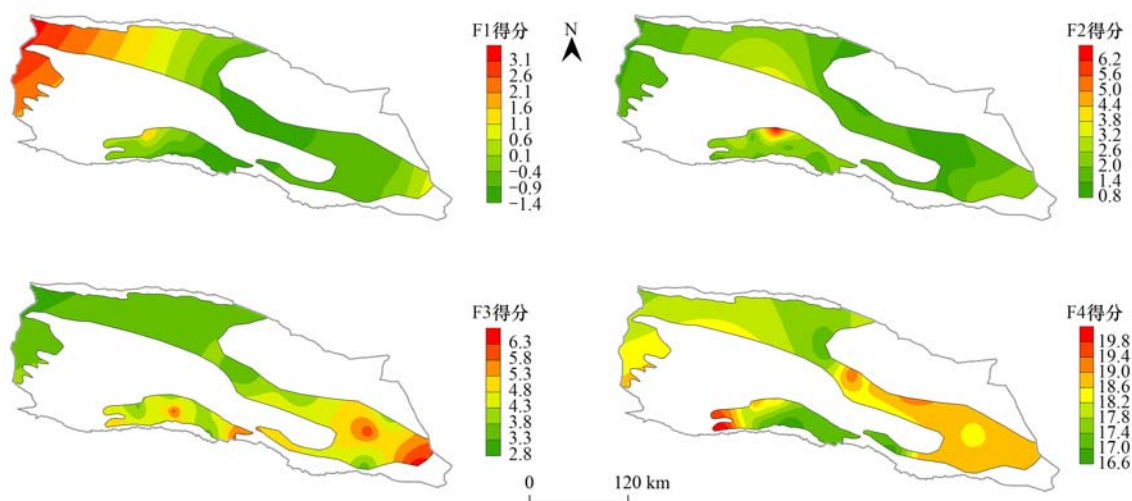


图 10 F1、F2、F3 和 F4 公因子空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of F1, F2, F3, and F4 common factors

种高值分布特征由补给区的差异性以及径流过程的复杂性决定^[46], F4 高值区位于巴里坤湖附近, 巴里坤湖滨属于盐碱地范围, 富含储量丰富的芒硝矿和盐田, 附近区域农业灌溉大量引用地表水及不合理开采利用地下水, 加剧了下游地下水浅埋带土壤次生盐渍化, 造成巴里坤湖周边盐渍化面积增大, 由于地表蒸发强烈, 水中的盐分不断在地表聚集, 盐渍化程度有逐渐加重的趋势^[20], 受地表水入渗补给及复杂的径流过程影响, 使地下水环境趋于碱性。

4 结论

(1) 研究区泉水以 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型地下水为主, 潜水以 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Ca}$ 型地下水为主, 承压水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl} \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型; 与未利用地单一的承压水化学类型 ($\text{Cl} \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型) 相比, 耕地及城乡居民用地承压水化学类型逐渐丰富, 反映出人类活动对地下水的影响。

(2) 水-岩相互作用是地下水中离子组分的主要控制因素; 地下水中的优势离子 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 主要源于石膏、芒硝和岩盐等蒸发盐岩的矿物溶解作用, 从泉水至潜水至承压水阳离子交换作用逐渐加强, 石膏及硬石膏的风化溶解作用逐渐减弱、岩盐的溶滤作用逐渐加强。

(3) PCA-APCS-MLR 模型结果显示研究区地下水环境主要受控于 F1 (溶滤-富集因子)、F2 (人类活动因子)、F3 (原生地质因子) 和 F4 (地质环境因子) 等 4 个因素影响, 贡献率分别为 54.83%、16.1%、10.70% 和 7.25%; 三塘湖镇北部、大红柳峡乡地下水主要受到溶滤富集作用影响, 博尔羌吉镇南部、三塘湖镇南部及大河镇一带地下水受人类

活动干扰较强。

参考文献:

- [1] He B N, He J T, Wang L, *et al.* Effect of hydrogeological conditions and surface loads on shallow groundwater nitrate pollution in the Shaying River Basin: based on least squares surface fitting model[J]. *Water Research*, 2019, **163**, doi: 10.1016/j.watres.2019.114880.
- [2] 李笑, 于璇, 李亮, 等. 石期河流域地下水化学特征及物质来源分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 4021-4029.
Li X, Yu S, Li L, *et al.* Chemical characteristics of groundwater and material sources analysis in Shiqi River Basin [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4021-4029.
- [3] Abdulsalam A, Ramli M F, Jamil N R, *et al.* Hydrochemical characteristics and identification of groundwater pollution sources in tropical savanna[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, **29**(25): 37384-37398.
- [4] 吴嘉铃, 王莹, 胡倩, 等. 雷州半岛地下水水化学特征及成因分析[J]. *安全与环境工程*, 2022, **29**(1): 145-153, 162.
Wu J L, Wang Y, Hu Q, *et al.* Hydrochemical characteristics and genetic analysis of groundwater in Leizhou Peninsula [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2022, **29**(1): 145-153, 162.
- [5] Che Q H, Su X S, Wang S X, *et al.* Hydrochemical characteristics and evolution of groundwater in the Alluvial Plain (Anqing Section) of the lower Yangtze River Basin: multivariate statistical and inversion model analyses[J]. *Water*, 2021, **13**(17), doi: 10.3390/w13172403.
- [6] 邹嘉文, 刘飞, 张靖坤. 南水北调典型受水区浅层地下水水化学特征及成因[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(5): 2260-2268.
Zou J W, Liu F, Zhang J K. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in typical water-receiving areas of the south-to-north water diversion project[J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(5): 2260-2268.
- [7] 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 等. 水文地质学基础[M]. (第七版). 北京: 地质出版社, 2018.
- [8] Wang H, Ni J, Song Q C, *et al.* Analysis of coastal groundwater hydrochemistry evolution based on groundwater flow system division[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, **601**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126631.
- [9] 徐邑荣, 谷洪彪, 王贺, 等. 乌苏里江流域左岸地下水水化

- 学特征成因解析[J]. 安全与环境工程, 2021, **28**(3): 34-41.
- Xu Y R, Gu H B, Wang H, *et al.* Analysis of hydrochemical characteristics and genesis of groundwater on the left bank of Wusuli River Basin[J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, **28**(3): 34-41.
- [10] 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 等. 城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1197-1206.
- Lü X L, Liu J T, Han Z T, *et al.* Chemical evolution of groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the process of urbanization[J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1197-1206.
- [11] 曹滨, 唐培军, 焦裕飞, 等. 潍坊北部超采区地下水化学成分演变特征分析[J]. 中国农村水利水电, 2017, (3): 85-89, 95.
- Cao B, Tang P J, Jiao Y F, *et al.* An analysis of hydro-chemical characteristics of groundwater in over-exploited area of northern Weifang[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017, (3): 85-89, 95.
- [12] 任坤, 潘晓东, 曾洁, 等. 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[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4523-4531.
- Ren K, Pan X D, Zeng J, *et al.* Geochemical characteristics and ecological significance of carbon isotopes in groundwater under the influence of different land use types in karst areas[J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4523-4531.
- [13] 刘春燕, 于开宁, 张英, 等. 西宁市浅层地下水化学特征及形成机制[J]. 环境科学, 2023, **44**(6): 3228-3236.
- Liu C Y, Yu K N, Zhang Y, *et al.* Characteristics and driving mechanisms of shallow groundwater chemistry in Xining City[J]. Environmental Science, 2023, **44**(6): 3228-3236.
- [14] 孙厚云, 毛启贵, 卫晓锋, 等. 哈密盆地地下水系统水化学特征及形成演化[J]. 中国地质, 2018, **45**(6): 1128-1141.
- Sun H Y, Mao Q G, Wei X F, *et al.* Hydrogeochemical characteristics and formation evolutionary mechanism of the groundwater system in the Hami Basin[J]. Geology in China, 2018, **45**(6): 1128-1141.
- [15] 张艳, 吴勇, 杨军, 等. 阆中市思依镇水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3230-3237.
- Zhang Y, Wu Y, Yang J, *et al.* Hydrochemical characteristic and reasoning analysis in Siyi Town, Langzhong City[J]. Environmental Science, 2015, **36**(9): 3230-3237.
- [16] 林聪业, 孙占学, 高柏, 等. 拉萨地区地下水水化学特征及形成机制研究[J]. 地学前缘, 2021, **28**(5): 49-58.
- Lin C Y, Sun Z X, Gao B, *et al.* Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Lhasa area, China[J]. Earth Science Frontiers, 2021, **28**(5): 49-58.
- [17] 刘鑫, 向伟, 司炳成. 渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素[J]. 环境科学, 2021, **42**(6): 2817-2825.
- Liu X, Xiang W, Si B C. Hydrochemistry and its controlling factors and water quality assessment of shallow groundwater in the Weihe and Jinghe River catchments[J]. Environmental Science, 2021, **42**(6): 2817-2825.
- [18] 雷米, 周金龙, 张杰, 等. 新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 1873-1884.
- Lei M, Zhou J L, Zhang J, *et al.* Hydrochemical characteristics and transformation relationship of surface water and groundwater in the plain area of Bortala River Basin, Xinjiang[J]. Environmental Science, 2022, **43**(4): 1873-1884.
- [19] Yu L, Zheng T Y, Yuan R Y, *et al.* APCS-MLR model: a convenient and fast method for quantitative identification of nitrate pollution sources in groundwater[J]. Journal of Environmental Management, 2022, **314**, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115101.
- [20] 李续续, 居马·吐尔逊, 伊永强. 新疆巴里坤县地下水开发利用及环境地质问题[J]. 西部探矿工程, 2014, **26**(12): 119-122.
- [21] 栾凤娇, 周金龙, 贾瑞亮, 等. 新疆巴里坤-伊吾盆地平原区地下水质量评价及分析[J]. 新疆农业大学学报, 2016, **39**(3): 253-258.
- Luan F J, Zhou J L, Jia R L, *et al.* Analysis and evaluation of groundwater quality in the plain areas of Barkol-Yiwu Basin, Xinjiang[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2016, **39**(3): 253-258.
- [22] 傅周燕. 新疆淖毛湖盆地地下水水质评价及水文地球化学模拟[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- Fu Z Y. Evaluation of groundwater quality and hydrogeochemical simulation in the Naomaohu Basin of Xinjiang[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2014.
- [23] 栾凤娇, 周金龙, 贾瑞亮, 等. 新疆巴里坤-伊吾盆地地下水水化学特征及成因[J]. 环境化学, 2017, **36**(2): 380-389.
- Luan F J, Zhou J L, Jia R L, *et al.* Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in plain areas of Barkol-Yiwu Basin, Xinjiang[J]. Environmental Chemistry, 2017, **36**(2): 380-389.
- [24] 张彦军. 巴伊盆地地表水资源评价[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2013.
- Zhang Y J. The surface water resources assessment in Barkul and Yiwu Basin[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2013.
- [25] 白铭, 张静, 李续续, 等. 新疆巴里坤三塘湖盆地地下水赋存分布特征[J]. 新疆地质, 2015, **33**(2): 270-274.
- Bai M, Zhang J, Li X X, *et al.* Distribution characteristic of groundwater storage in Santanghu Basin of Balikun County, Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 2015, **33**(2): 270-274.
- [26] 王国灿, 陈超, 胡健民, 等. 戈壁荒漠覆盖区 1:50000 填图方法指南[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [27] Li Z J, Yang Q C, Yang Y S, *et al.* Isotopic and geochemical interpretation of groundwater under the influences of anthropogenic activities[J]. Journal of Hydrology, 2019, **576**: 685-697.
- [28] Wang Z R, Tian X, Wu X. Hydrochemical characteristics and quality assessment of shallow groundwater and CBM co-produced water in the Shizhuangnan block, Qinsui Basin, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, **77**(3), doi: 10.1007/s12665-017-7212-6.
- [29] 肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 等. 小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系[J]. 环境科学, 2022, **43**(12): 5499-5508.
- Xiao C Y, Liu Y F, Zhao T Q, *et al.* Transformation relationship of groundwater and river water in riparian wetland during water and sediment regulation of Xiaolangdi reservoir in Yellow River[J]. Environmental Science, 2022, **43**(12): 5499-5508.
- [30] 崔佳琪, 李仙岳, 史海滨, 等. 河套灌区地下水化学演变特征及形成机制[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 4011-4020.
- Cui J Q, Li X Y, Shi H B, *et al.* Chemical evolution and formation mechanism of groundwater in Hetao Irrigation area[J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 4011-4020.
- [31] 孙瑞, 张雪芹, 吴艳红. 藏南羊卓雍错流域水化学主离子特征及其控制因素[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(4): 600-608.

- Sun R, Zhang X Q, Wu Y H. Major ion chemistry of water and its controlling factors in the Yamzhog Yumco Basin, South Tibet [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, **24**(4): 600-608.
- [32] 鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 等. 喀什噶尔河下游平原区地下水咸化特征及成因分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(10): 4459-4469.
- Lu H, Zeng Y Y, Zhou J L, *et al.* Characteristics and causes of groundwater salinization in the plain area of the lower Kashgar River[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(10): 4459-4469.
- [33] 丁启振, 周金龙, 曾妍妍, 等. 基于多元统计方法的新疆巴里坤盆地地下水水化学特征及其影响因素分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, **32**(5): 78-83, 91.
- Ding Q Z, Zhou J L, Zeng Y Y, *et al.* Analysis of hydrochemical characteristics and influencing factors of groundwater in the Balikun Basin of Xinjiang based on multivariate statistical method [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2021, **32**(5): 78-83, 91.
- [34] 张涛, 王明国, 张智印, 等. 然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 4003-4010.
- Zhang T, Wang M G, Zhang Z Y, *et al.* Hydrochemical characteristics and possible controls of the surface water in Ranwu Lake Basin[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4003-4010.
- [35] Mao M, Wang X, Zhu X Q. Hydrochemical characteristics and pollution source apportionment of the groundwater in the east foothill of the Taihang Mountains, Hebei Province [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, **80**(1), doi: 10.1007/S12665-020-09341-4.
- [36] Gao Z J, Han C, Yuan S Y, *et al.* Assessment of the hydrochemistry, water quality, and human health risk of groundwater in the northwest of Nansi Lake catchment, North China[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2022, **44**(3): 961-977.
- [37] 李书鉴, 韩晓, 王文辉, 等. 无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 220-229.
- Li S J, Han X, Wang W H, *et al.* Hydrochemical characteristics and controlling factors of surface water and groundwater in Wuding River Basin[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 220-229.
- [38] 刘永林, 雒昆利, 李玲, 等. 新疆天然水化学特征区域分异及其地质成因[J]. *地理科学*, 2016, **36**(5): 794-802.
- Liu Y L, Luo K L, Li L, *et al.* Regional differences and geological causes of hydrochemistry of natural water in Xinjiang, China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, **36**(5): 794-802.
- [39] Sun J, Yan B Z, Li Y, *et al.* Characterization and cause analysis of shallow groundwater hydrochemistry in the plains of Henan Province, China[J]. *Sustainability*, 2021, **13**(22), doi: 10.3390/su132212586.
- [40] Liu F, Zou J W, Liu J R, *et al.* Factors controlling groundwater chemical evolution with the impact of reduced exploitation[J]. *CATENA*, 2022, **214**, doi: 10.1016/j.catena.2022.106261.
- [41] Yu F R, Zhou D X, Li Z P, *et al.* Hydrochemical characteristics and hydrogeochemical simulation research of groundwater in the Guohe River Basin(Henan section)[J]. *Water*, 2022, **14**(9), doi: 10.3390/w14091461.
- [42] 张杰, 周金龙, 乃尉华, 等. 新疆叶尔羌河流域平原区浅层地下水咸化空间分布及成因[J]. *农业工程学报*, 2019, **35**(23): 126-134.
- Zhang J, Zhou J L, Nai W H, *et al.* Spatial distribution and cause of salinization of shallow groundwater in plain terrain of the Yarkant River Basin, Xinjiang[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, **35**(23): 126-134.
- [43] 钱会, 马致远. 水文地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [44] 饶志, 储小东, 颜春, 等. 鄱阳湖平原浅层地下水有机污染物含量特征与健康风险评价[J]. *地球与环境*, 2019, **47**(5): 662-670.
- Rao Z, Chu X D, Yan C, *et al.* Characteristics and health risk assessment of organic pollutants in groundwater of the Poyang Lake Plain[J]. *Earth and Environment*, 2019, **47**(5): 662-670.
- [45] 王仲侯, 张淑君. 克拉玛依油区高矿化度重碳酸钠型水的发现与特征[J]. *石油实验地质*, 1998, **20**(1): 39-43.
- Wang Z H, Zhang S J. Discovery and characteristics of high-mineralized soda-dicarbonate-typed water in Karamay oil region [J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1998, **20**(1): 39-43.
- [46] 秦子元, 高瑞忠, 张生, 等. 西北旱区盐湖盆地地下水化学组分源解析[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(11): 1790-1799.
- Qin Z Y, Gao R Z, Zhang S, *et al.* Source identification of groundwater chemical components in the Salt Lake Basin of northwest arid area, China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(11): 1790-1799.

CONTENTS

Elucidating the Impacts of Meteorology and Emission Changes on Concentrations of Major Air Pollutants in Major Cities in the Yangtze River Delta Region Using a Machine Learning De-weather Method	FU Wen-xing, HUANG Lin, DING Jia-hao, <i>et al.</i> (5879)
Impact of Emission Reduction in Different Sectors on Air Quality and Atmospheric Temperature in Eastern China	LONG Zi-yu, ZHU Jia, LI Ke, <i>et al.</i> (5889)
Analysis of Spatio-temporal Characteristics of Air Quality, Meteorological Impact, and Emission Reduction Effect During the Winter Olympics in Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Areas	HOU Lu, ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, <i>et al.</i> (5899)
Emission Trends and Reduction Potential of VOCs from Printing Industry in China	LIANG Xiao-ming, WU Peng-zhen, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (5915)
Analysis of VOCs Emission Characteristics and Emission Reduction Potential of Typical Industries in Jinan, China	WU Wen-lu, SHAN Chun-yan, ZHAO Jing-lin, <i>et al.</i> (5924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Lishui Area of Nanjing	RUAN Zhao-yuan, YAN Ou, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (5933)
Spatio-temporal Change in City-level Greenhouse Gas Emissions from Municipal Solid Waste Sector in China During the Last Decade and Its Potential Mitigation	ZHANG Ting-xue, GAO Shu-dan, TENG Xiao, <i>et al.</i> (5946)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Air Pollution and Health Risks in Key Cities of China	TU Pei-yue, YANG Huan, CHEN Lan-zhou, <i>et al.</i> (5954)
Spatial and Temporal Variations in PM ₁ Concentration and its Correlation with AOD in China from 2014 to 2017	YUAN Li-mei, MA Fang-fang, BIAN Ze, <i>et al.</i> (5964)
Characteristics and Generation Mechanism of Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan City Group	MA Jie-li, LUO Da-tong, LIU Xin, <i>et al.</i> (5975)
Characteristics and Cause of PM _{2.5} During Haze Pollution in Winter 2022 in Zhoukou, China	MA Ying-ge, YANG Lu, DI Rui-miao, <i>et al.</i> (5986)
Characterization and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Lanzhou	MA Ke-jing, SUN Li-juan (5997)
Characteristics of Atmospheric Dust Fall Pollution and Its Chemical Composition and Mass Reconstruction in Mentougou District of Beijing	WANG Zhi-yao, YAO Qi, LÜ Fu, <i>et al.</i> (6007)
Ozone Pollution Characteristics and Formation Mechanism in a Typical Tropical Seaside City	HAN Shu-yan, ZHANG Xin, XIE Rong-fu, <i>et al.</i> (6015)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water in Kuaize River Basin at the Upper Pearl River	TAO Lan-chu, CUN De-xin, TU Chun-lin, <i>et al.</i> (6025)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water and Groundwater in Huainan Coal Mine Area	LIU Hai, KANG Bo, GUAN Zheng-ting, <i>et al.</i> (6038)
Hydrochemical Characteristics and Pollution Source Identification of Groundwater in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	JIANG Feng, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (6050)
Identification of Nitrate Source and Transformation Process in Shallow Groundwater Around Dianchi Lake	CHEN Qing-fei, CHEN An-qiang, CUI Rong-yang, <i>et al.</i> (6062)
Analysis of Influencing Factors on the Accumulation and Distribution of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-zinc Mine Watershed	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong (6071)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment in Karst Basin Around a Lead-Zinc Mine	LIAO Hong-wei, JIANG Zhong-cheng, ZHOU Hong, <i>et al.</i> (6085)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Heavy Metals in Main Rivers Sediments and Ecological Risk Assessment in Kaifeng City	DING Ya-peng, LU Xi-hao, WANG Xiao-jing, <i>et al.</i> (6095)
Evaluation and Prediction of Environmental Capacities of Heavy Metals in the Surface Sediments of Lakes in Huoqiu County	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (6106)
Metabarcoding Profiling of Phytoplankton Communities Associated with Algal Blooms and Determining Related Drivers in Baiyangdian Lake ...	CHEN Ting, DU Xun, CHEN Yi-yong, <i>et al.</i> (6116)
Driving Factors Analyze of Phytoplankton Community by Comparison of Population and Functional Groups and Water Quality Evaluation in Dongting Lake	YAN Guang-han, YIN Xue-yan, WANG Xing, <i>et al.</i> (6125)
Distribution Characteristics and Environmental Driving Factors of Cyanobacteria Community in Impounded Lakes and Reservoirs in Shandong on the East Route of South-to-North Water Diversion Project	WEI Jie-lin, CUI Yu-jing, LI Yi-zhen, <i>et al.</i> (6137)
Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical Active Compounds in Guangdong Province	LUO Jia-hao, WANG Yu-kai, YUAN Ke, <i>et al.</i> (6149)
Characteristics of Microplastic-derived Dissolved Organic Matter(MPDOM) and the Complexation Between MPDOM and Sulfadiazine/Cu ²⁺	WANG Xiao, YAN Cai-xia, NIE Ming-hua, <i>et al.</i> (6159)
Photodegradation of Plastic Blends in Seawater and Its Risk to the Marine Environment	ZHANG Hong-yu, GAO Jia-wei, CHEN Si-bao, <i>et al.</i> (6172)
Preparation of Iron-improved Blue Algae Biochar and Its Co-adsorption Mechanism for Phosphorus in Surface Water	HAN Jie, HUANG Xin, YANG Kun-lun, <i>et al.</i> (6181)
Estimation and Critical Source Area Identification of Non-point Source Pollution Based on Improved Export Coefficient Models; A Case Study of the Upper Beiyun River Basin	LI Hua-lin, ZHANG Shou-hong, YU Pei-dan, <i>et al.</i> (6194)
Characteristics of Bacterial Community Structure in the Sediment of Rural Black and Odorous Water Bodies	REN Hong-wei, TIAN Yan-fang, LU Jin-xia, <i>et al.</i> (6205)
Impacts of Human Activities on the Net Primary Productivity of Vegetation in Chengde's Transitional Region from Plateau to Plain in the Context of Climate Change	SHAN Zhen-dong, LIU Dun, LUO Han, <i>et al.</i> (6215)
Meta-analysis on the Effects of Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Content in Terrestrial Ecosystems	YANG Ling-fang, KONG Dong-yan, DIAO Jing-wen, <i>et al.</i> (6226)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Nitrogen Component and Active Nitrogen in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	CAO Yang, SHEN Yu-yi, CHEN Yun-shuang, <i>et al.</i> (6235)
Response of Organic Carbon Mineralization to Nitrogen Addition in Micro-aerobic and Anaerobic Layers of Paddy Soil	MAO Wan-qiong, XIA Yin-hang, MA Chong, <i>et al.</i> (6248)
Effects of Conservation Tillage on Herbicide Residues in Maize Field Soil	LIU Yuan, WANG Zu-cheng, LIU Mei-hua, <i>et al.</i> (6257)
Research Progress on Toxicity of Microplastics in Soil to Terrestrial Plants and Their Degradation Mechanism	LIU Wei, LI Yu-xin, RONG Sa-shuang, <i>et al.</i> (6267)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Soil in Danjiangkou Reservoir Area of South-to-North Water Diversion Project	WANG Feng, GONG Wei, LIU Zhe, <i>et al.</i> (6279)
Accumulation Characteristics, Sources, and Health Risks of Soil Lead of Urban Parks in Beijing	AN Jiang-mei-duo, ZHANG Rui-qing, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (6287)
Vertical Migration Characteristics and Fate of Heavy Metals from Zinc Smelting Slag in Soil Profile	YANG Ai-ping, WANG Xiao-yan, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (6297)
Ecological Risk Assessment and Migration and Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soil-crop System from Typical Pyrite Mining Area	CHENG Xiao-meng, ZHAO Chen, WU Chao, <i>et al.</i> (6309)
Interaction and Transport Characteristics of Lead and Cadmium in Different Soil-wheat Systems	KOU Meng, FAN Yu, SU Meng-xian, <i>et al.</i> (6319)
Distribution and Transport of Cadmium and Arsenic in Different Aboveground Parts of Wheat After Flowering	WANG Qiu-shi, HUA Gui-li, LI Xiang-yu, <i>et al.</i> (6328)
Effects of Vegetation Types and Seasonal Dynamics on the Diversity and Function of Soil Bacterial Communities in the Upper Reaches of the Heihe River	WANG Zhu, LIU Yang, WANG Fang, <i>et al.</i> (6339)
Ecological Responses of Soil Bacterial Communities to Heavy Metal Contamination Surrounding a Typical Coal-based Industrial Region	ZHENG Dan-feng, LIU Di, SU Chao, <i>et al.</i> (6354)
Effects of Aeration Methods on Microbial Diversity and Community Structure in Rice Rhizosphere	XIAO De-shun, XU Chun-mei, WANG Dan-ying, <i>et al.</i> (6362)
Response of Nitrification Potential and Ammonia Oxidation Microbial Community in Purple Soils to the Application of Biochar Combined with Chemical Fertilizer and Manure	LI Yue, WANG Zi-fang, JIA Li-juan, <i>et al.</i> (6377)
Effect of Continuous Cropping on the Physicochemical Properties, Microbial Activity, and Community Characteristics of the Rhizosphere Soil of <i>Codonopsis pilosula</i>	YANG Yang, LI Hai-liang, MA Kai-li, <i>et al.</i> (6387)
Effect of Manure Application on the Adsorption of Antibiotics to Soil	LUO Shan, HU Jin-sheng, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (6399)
Relationship Between Carbon Emissions and Economic Development of Industrial Parks Based on Decoupling Index	CHEN Si-yu, LIU Jing-ru, SUN Guang-ming (6412)
Characteristics of Municipal Solid Waste in Some Urban Agglomeration in the Past Five Years	WANG Xiao-bo, LIU An-qi, ZHONG Hui-qiong, <i>et al.</i> (6421)