

目次

基于时间序列分解的京津冀区域PM_{2.5}和O₃空间分布特征姚青,丁净,杨旭,蔡子颖,韩素芹 (2487)

基于随机森林的北京城区臭氧敏感性分析周红,王鸣,柴文轩,赵昕 (2497)

基于随机森林模型的四川盆地臭氧污染预测杨晓彤,康平,王安怡,臧增亮,刘浪 (2507)

海口市臭氧浓度统计预报模型的构建与效果评估符传博,林建兴,唐家翔,丹利 (2516)

京津冀地区2015~2020年臭氧浓度时空分布特征及其健康效益评估高冉,李琴,车飞,张艳平,祖永刚,刘芬 (2525)

2022年北京市城区PM_{2.5}水溶性离子含量及其变化特征陈圆圆,崔迪,赵泽熙,常森,景宽,沈秀娥,刘保献 (2537)

郑州市冬春季PM_{2.5}中金属元素污染特征、来源及健康风险评估陶杰,闫慧姣,徐艺斐,荆海涛 (2548)

淄博市供暖前后PM_{2.5}中多环芳烃及其衍生物污染特征、来源及健康风险孙港立,吴丽萍,徐勃,高玉宗,赵雪艳,姬亚芹,杨文 (2558)

西安市采暖季过渡期高时间分辨率细颗粒物组分特征及来源解析李萌津,张勇,张倩,田杰,李丽,刘卉昆,冉伟康,王启元 (2571)

天津冬季两个典型污染过程高浓度无机气溶胶成因及来源分析卢苗苗,韩素芹,刘可欣,唐晓,孔磊,丁净,樊文雁,王自发 (2581)

基于空间尺度效应的山东省PM_{2.5}浓度时空变化及空间分异地理探测徐勇,韦梦新,邹滨,郭振东,李沈鑫 (2596)

我国典型化工行业VOCs排放特征及其对臭氧生成潜势武婷,崔焱文,肖成德,翟增秀,韩萌 (2613)

廊坊秋季大气污染过程中VOCs二次气溶胶生成潜势及来源分析张敬巧,刘铮,丁文文,朱瑶,曹婷,凌德印,王淑兰,王宏亮 (2622)

景观格局对河流水质影响的尺度效应Meta分析王玉仓,杜晶晶,张禹,吴昊,胡敏韵,陈丁江 (2631)

白洋淀夏季汛期入淀河流水体溶解性有机物的光谱特征及来源孟佳靖,婁红,陈哲,周石磊,底怡玲,武辰彬,王晨光,张家丰,崔建升 (2640)

北京市丰台区永定河以东浅层地下水水化学演变规律及成因分析胡昱欣,周瑞静,宋炜,杨全合,王鑫茹 (2651)

庐庐断裂带(安徽段)浅层地下水水化学特征、控制因素及水质评价刘海,魏伟,宋阳,徐洁,管政亭,黄健敏,赵国红 (2665)

农药施用对兴凯湖水中农药残留的影响及其风险评价王蔚青,徐雄,刘权震,林利华,吕婧,王东红 (2678)

黄河兰州段河岸带土壤中微生物与耐药基因的赋存特征韦程宸,魏枫沂,夏慧,黄魁 (2686)

基于多源数据的巢湖蓝藻水华时空分布及驱动因素分析金晓龙,邓学良,戴睿,徐倩倩,吴月,范裕祥 (2694)

再生水构建水环境中沉水植物附着细菌群落特征贺赞,李雪梅,李宏权,魏琳琳,姜春晖,姜大伟,李魁晚 (2707)

水位波动和植被恢复对三峡水库消落带土壤原核微生物群落结构的交互影响梅渝,黄平,王鹏,朱凯 (2715)

银川市典型湖泊沉积物细菌群落结构及其对重金属的响应关系蒙俊杰,刘双羽,邱小琼,周瑞娟 (2727)

热水解时间对污泥厌氧消化系统微生物群落结构影响分析张含,张涵,王佳伟,高金华,文洋,李相昆,任征然 (2741)

市政污水中吗啡来源辨析耶雪婷,赵悦彤,蒋冰,裴伟,李彦莹,谭冬芹,王德高 (2748)

溱沔河流域生态环境动态遥感评价李艳翠,袁金国,刘博涵,郭豪 (2757)

黄河流域生态系统服务价值时空演化及影响因素王奕洪,洪学莹 (2767)

基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系强度及其空间格局优化:以汾河流域为例蔡进,危小建,江平,梁玉琦 (2780)

贵州高原典型喀斯特县域生境质量时空演变及定量归因李月,冯霞,吴路华,罗光杰,罗红芬 (2793)

2000~2021年黄土高原生态分区NEP时空变化及其驱动因子周怡婷,严俊霞,刘菊,王璞 (2806)

基于SSP-RCP情景的黄土高原土地变化模拟及草原碳储量崔霞,董燕,张露尹,王荣耀 (2817)

京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响武爱彬,陈辅国,赵艳霞,秦彦杰,刘欣,郭小平 (2828)

西南岩溶区土地利用变化对团聚体稳定性及其有机碳的影响江可,贾亚男,杨琰,陈坚淇,禹朴家 (2840)

不同土地利用方式下土壤有机质分子组成变化的整合分析黄世威,赵一锴,朱馨雨,刘贺雷,刘姣姣,陈稍,陈佳永,张阿凤 (2848)

基于改进麻雀搜索算法优化BP神经网络的土壤有机质空间分布预测胡志瑞,赵万伏,宋根先,王芳,林妍敏 (2859)

不同有机物料施用对菜地磷累积和转化的影响孙凯,崔玉涛,李顺晋,魏冰丽,王媛,杨宏博,王孝忠,张伟 (2871)

集约化柑橘种植抑制土壤磷循环微生物活性周连昊,曾全超,梅唐英泽,汪明霞,谭文峰 (2881)

控释掺混肥对麦玉米轮作体系作物产量和温室气体排放的影响高玮,王学霞,谢建治,陈延华,倪小会,王甲辰,董艳芳,李子双,曹兵 (2891)

生物炭对黄绵土中NO₃-N运移过程影响及模拟白一茹,刘旭,张钰涵,张睿媛,马艳,王幼奇 (2905)

中国农田土壤重金属污染分析与评价杨雳,白宗旭,薄文浩,林静,杨佩佳,陈涛 (2913)

城市土壤和地表灰尘重金属污染研究进展与展望王晓雨,刘恩峰,杨祥梦,王碧莲,林锦阔,颜梦霞,毕世杰 (2926)

场地重金属污染土壤固化及MICP技术研究进展陈玥如,高文艳,陈虹任,薛生国,吴川 (2939)

黄河流域山东段近河道煤矿区土壤重金属污染特征及源解析戴文婷,张晖,吴霞,钟鸣,段桂兰,董霖红,张培培,樊洪明 (2952)

拒马河流域河流沉积物与土壤重金属含量及风险评价韩双宝,袁磊,张秋霞,郑焰,李甫成 (2962)

银川市黄河滩区土壤重金属污染特征、生态风险评估及来源解析于路加,马海军,王翠平 (2971)

基于源导向和蒙特卡罗模型的广东省某城市土壤重金属健康风险评估陈莲,邹子航,张培珍,王雨茜,王振江,林森,唐翠明,罗国庆,钟建武,李智毅,王圆 (2983)

西南典型碳酸盐岩高地地质背景区农田重金属化学形态、影响因素及回归模型唐瑞玲,徐进力,刘彬,杜雪苗,顾雪,于林松,毕婧 (2995)

贵州省水田土壤-水稻Hg含量特征与安全种植区划韦美溜,周浪,黄燕玲,庞瑞,王佛鹏,宋波 (3005)

柠檬酸辅助甜高粱对南方典型母质土壤的镉修复效应刘梦宇,罗绪锋,辜娇峰,易轩韬,周航,曾鹏,廖柏寒 (3016)

改性酒糟生物炭对紫色土壤镉形态及水稻吸收镉的影响肖乃川,王子芳,杨文娜,谢永红,代文才,高明 (3027)

生物炭对四环素和铜复合污染土壤生菜生长及污染物累积的影响郑晨格,裴欢欢,张亚珊,李嘉欣,刘奋武,乔星星,秦俊梅 (3037)

基于Meta分析的蚯蚓堆肥对堆肥质量和重金属的影响效应姜继韶,侯睿,崔慧林,闫广轩,刘栋 (3047)

微塑料对土壤N₂O排放及氮素转化的影响研究进展刘一戈,杨安琪,陈舒欣,牛奕奕,卢瑛,李博 (3059)

土地利用对洱海罗时江小流域土壤微塑料污染的影响戴柳云,侯磊,王化,符立松,王艳霞,李晓琳,王万宾,梁启斌 (3069)

养殖海湾淤泥质海岸沉积物微塑料污染特征宋可心,贺金成,李昌文,解思琦,刘宝莹,黄伟,冯志华 (3078)

聚乙烯微塑料对盐渍化土壤微生物群落的影响王志超,李哲,李嘉辰,屈忠义,胡文煊,李卫平 (3088)

鄱阳湖候鸟栖息地微塑料表面细菌群落结构特征与生态风险预测俞锦丽,赵俊凯,罗思琦,景文慧,杨启武,刘淑丽 (3098)

粤闽浙沿海重点城市道路交通节能减排路径徐艺诺,翁大维,王硕,胡喜生,王占永,张园园,张兰怡 (3107)

电动重卡替代柴油重卡的全生命周期碳减排效益分析徐圆圆,龚德鸿,黄正光,杨浪 (3119)

郟庐断裂带(安徽段)浅层地下水水化学特征、控制因素及水质评价

刘海¹, 魏伟^{2*}, 宋阳¹, 徐洁¹, 管政亭¹, 黄健敏¹, 赵国红¹

(1. 安徽省公益性地质调查管理中心, 合肥 230001; 2. 四川农业大学建筑与城乡规划学院, 成都 611830)

摘要: 为研究郟庐断裂带(安徽段)地下水的水化学特征、控制因素和地下水质量. 在郟庐断裂带周边的江淮波状平原区、沿江丘陵平原区和皖西山地共采集了 86 组地下水, 综合运用描述性统计、Piper 图、Gibbs 图、离子比例分析、饱和指数、氯碱指数和熵权水质指数(EWQI)等方法, 开展了地下水的水化学特征及控制因素研究, 评价了地下水的品质. 结果表明, 郟庐断裂带(安徽段)周边浅层地下水呈弱碱性, 地下水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 和 $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型为主. 水岩相互作用控制地下水化学组分的形成, 硅酸盐岩和碳酸盐岩风化作用控制了地下水化学组分的形成. 强烈的阳离子交替吸附作用是引起 Na^+ 富集的重要因素. 研究区地下水整体质量较好, 但受到一定程度人类活动的污染, 江淮波状平原和沿江丘陵平原大部分地下水不适合直接饮用. 研究结果对郟庐断裂带(安徽段)周边浅层地下水资源可持续开发利用和环境保护具有重要意义.

关键词: 郟庐断裂带; 地下水; 水文地球化学特征; 水岩作用; 控制因素; 水质评价

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)05-2665-13 DOI: 10.13227/j.hjcx.202305144

Hydrochemical Characteristics, Controlling Factors and Water Quality Evaluation of Shallow Groundwater in Tan-Lu Fault Zone (Anhui Section)

LIU Hai¹, WEI Wei^{2*}, SONG Yang¹, XU Jie¹, GUAN Zheng-ting¹, HUANG Jian-min¹, ZHAO Guo-hong¹

(1. Public Geological Survey Management Center in Anhui Province, Hefei 230001, China; 2. College of Architecture and Urban-Rural Planning, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611830, China)

Abstract: To study the hydrochemical characteristics, controlling factors, and groundwater quality of the Tan-Lu fault zone (Anhui section), 86 groundwater samples were taken from the areas surrounding the Tan-Lu fault zone (Anhui section), which included the Jianghuai Wavy Plain, the Yanjiang Hill Plain, and the Dabie Mountains in western Anhui. Descriptive statistics, Piper diagram, Gibbs diagram, ion ratio analysis, saturation index, chloride-alkalinity index, and entropy weight water quality index (EWQI) were used to comprehensively study the hydrochemical characteristics and controlling factors of groundwater and to evaluate its quality. The results showed that the shallow groundwater in the Tan-Lu fault zone (Anhui section) was weakly alkaline, with dominant anions and cations of HCO_3^- , Ca^{2+} and Na^+ , respectively, and the hydrochemical types were mainly $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ and $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$. The solute source of groundwater was mainly controlled by water-rock interactions, and the weathering of silicate and carbonate rocks jointly contributed to the formation of the chemical components of groundwater. Strong cation exchange adsorption was an important factor causing Na^+ enrichment. The overall quality of groundwater in the study area was good but was polluted to a certain extent by human activities. Most of the groundwater in the Jianghuai Wavy Plain and Yanjiang Hill Plain was not suitable for direct drinking. The results of this research have important implications for the sustainable development and utilization of shallow groundwater resources and environmental protection in the Tan-Lu fault zone (Anhui section).

Key words: Tan-Lu fault zone; groundwater zone; hydrogeochemical characteristics; water-rock interaction; controlling factors; water quality evaluation

水是生命之源、生产之要和生态之基. 随着社会经济的健康发展, 地表水资源远不能满足生产和生活的需求^[1], 而地下水含水量丰富, 水质较好^[2], 是饮用水、农业灌溉和工业用水的重要来源^[3]. 近年来, 由于地下水不合理开发利用导致水量减少和水质恶化等一系列生态环境问题^[4,5]. 地下水化学演变特征是地下水环境变化(如水质恶化)的集中反映, 而明确其形成机制也是地下水资源和质量评价的重要内容^[5]. 地下水水化学的形成主要受控于地层岩性、地质构造、地形地貌和人为作用等因素^[4,6]. 因此, 系统研究地下水形成的控制因素, 开展地下水质量评价, 对水资源开发利用和生态环境保护具有现实的意义.

当前, 地下水特征及控制因素的研究方法主要

包括: 水化学类型法、描述性统计法、离子比例系数法与饱和指数法等^[2], 尤其是 Gibbs 图^[9,10]、Piper 图^[11]和 Na 端元图^[12]等经典水文地球化学研究方法的出现, 为地下水组分和来源的定性分析提供了便捷方法^[4,13]. 近年来, 多元统计分析法^[14]、水文地球化学模拟^[15,16]与 3S 技术^[17]等技术手段也广泛用于地下水控制因素研究. 而当前的研究更多是基于主成分分析、因子分析和相关性分析等多元统计分析, 结合经典水文地球化学方法、相关离子比例关系等手段定性或定量探究了地下水的演变规律及形成机

收稿日期: 2023-05-16; 修订日期: 2023-07-17

基金项目: 安徽省自然资源厅公益性地质调查项目(2022-g-1-16)

作者简介: 刘海(1984-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为地下水环境, E-mail: 103304365@qq.com

* 通信作者, E-mail: jpwflz@sicau.edu.cn

制^[1,5,8,18,19]。另外,水质评价也是目前地下水研究的一个热点方向,针对水质评价的方法主要包括:模糊综合评价、模糊数学、多元统计分析、内梅罗指数和水质指数(water quality index, WQI)等^[20-22],尤其是水质指数(WQI)已广泛应用于地下水水质评价^[23]。而熵权水质指数(entropy weighted water quality index, EWQI)是由传统水质指数(WQI)修正而来,目的是为了解决水质指数(WQI)权重赋值中人为因素的主观影响,从而提高评价可靠性^[24]。目前,熵权水质指数(EWQI)被众多学者广泛用于水质评价。

郟庐断裂带在中国境内长达 2 400 km,从南到北可分为 3 段:南段(安徽段和江苏段)、中段(山东段和渤海段)和北段(东北段)^[25]。郟庐断裂带(安徽段)自北东至南西斜贯安徽省,长约 450 km^[26,27]。近年来,相关学者开展了郟庐断裂周边的地热水^[28-30]、矿泉水^[31]和地下水^[32,33]等方面的研究工作。在地下水研究方面,相关学者关注更多的是地下水水质空间分布规律^[32,33],而对于地下水水化学特征演变及控制因素下的水质评价研究略显不足。鉴于此,综合运用数理统计分析、图解法和离子比值等方法,结合水文地球化学理论对郟庐断裂带(安徽段)浅层地下水进行系统性分析,厘清水化学特征及控制因素,并基于熵权水质指数(EWQI)评价郟庐断裂带周边地下水水质,以期对郟庐断裂带(安徽段)乃至安徽省浅层地下水资源合理开发利用和保护提供科学依据。

1 研究区概况

郟庐断裂带(安徽段)自北东至南西斜贯安徽省,东北与江苏相连,西南与湖北和江西接壤。地势整体上自西南向东北倾斜,其中北部为淮北平原,地势平坦开阔,中部为江淮波状平原,西南部大别山地为剥蚀-构造山区。研究区属亚热带湿润季风气候。年平均气温 14~17℃,年均蒸发量 850~1 050 mm,年均降水量 800~1 800 mm。研究区地表水系发育,横跨淮河、长江流域,河网纵横交错,湖泊星罗棋布。巢湖是我国五大著名淡水湖泊之一。

研究区划分为淮北平原、江淮波状平原、皖西山地和沿江丘陵平原等 4 个水文地质分区^[26,27]。根据含水层介质,可划分为:松散岩类孔隙水、基岩裂隙水和碳酸盐岩裂隙岩溶水等 3 种地下水类型(图 1)。松散岩类孔隙水含水层岩性主要为粉细砂、亚砂和亚黏土等;基岩裂隙水含水层岩性主要为砂砾岩、泥岩、砂岩、玄武岩、片麻岩、千枚岩和花岗岩等;碳酸盐岩裂隙岩溶水含水层介质为大理岩和白云质灰岩等^[31-33]。其中松散岩类孔隙水和基岩裂隙

水分布全区,碳酸盐岩裂隙岩溶水主要分布在淮北平原、江淮波状平原和沿江丘陵平原这 3 个水文地质区。

1.1 采样点分布

根据研究区地貌单元划分和水文地质分区进行采样点布设(图 1),2018 年 2 月~4 月在研究区采集了 86 组浅层地下水样,其中江淮波状平原水文地质区 28 组,沿江丘陵平原水文地质区 27 组,皖西山地水文地质区 31 组。本次采样点布设主要考虑地下水受断裂新构造控制,导致部分区域样点不均,但整体上能反映区域地下水的分布。

1.2 样品采集与测试

pH 和溶解性固体总量(TDS)等参数在采集现场使用 SD150 型便携式多参数水质测试仪测定。每组样品用两个聚乙烯塑料瓶采集,采集时样瓶用离子水冲洗 3~5 遍。其中测定阳离子浓度的水样瓶体积为 500 mL,且瓶内加入 1:1 硝酸溶液使其 pH < 2。测定阴离子浓度的水样瓶体积为 1 000 mL,不做酸化处理。样品采集 24 h 内送安徽省地质环境监测总站实验室进行检验。实验室采用色谱仪(Dionex-2500 型)测定 SO₄²⁻、Cl⁻和 NO₃⁻;电感耦合等离子体光谱仪(ICAP 6300Duo 型)用于 K⁺、Na⁺、Ca²⁺和 Mg²⁺等的测定;滴定法测定 HCO₃⁻。各离子的检测限均为 0.01 mg·L⁻¹。

1.3 评价方法及数据处理

饱和指数(SI)是水文地球化学研究的一个重要指标,其定义为^[34]:

$$SI = \lg \frac{IAP}{K} \quad (1)$$

式中,IAP 为矿物溶解反应中离子的活度积;K 为矿物溶解反应的平衡常数。使用 PHREEQC 软件计算饱和指数(SI)。可将饱和指数(SI)划分矿物处于平衡状态(SI = 0)、沉淀析出过饱和状态(SI > 0)和溶解非饱和状态(SI < 0)。

采用熵权水质指数(EWQI)对研究区地下水质量进行评价。选用 pH、TDS、TH、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻和 F⁻等 10 项参数进行 EWQI 评价。EWQI 的计算步骤及质量等级划分见文献[35]。

运用 ArcGIS10.8 软件绘制地下水采样点分布图,SPSS 26.0 软件统计地下水水化学数据,基于 Origin 2021 平台绘制 Piper 三线图、Gibbs 图、矿物稳定场图和离子比例图等相关图件。

2 结果与讨论

2.1 水化学组分特征

研究区地下水的水化学特征统计数据如表 1

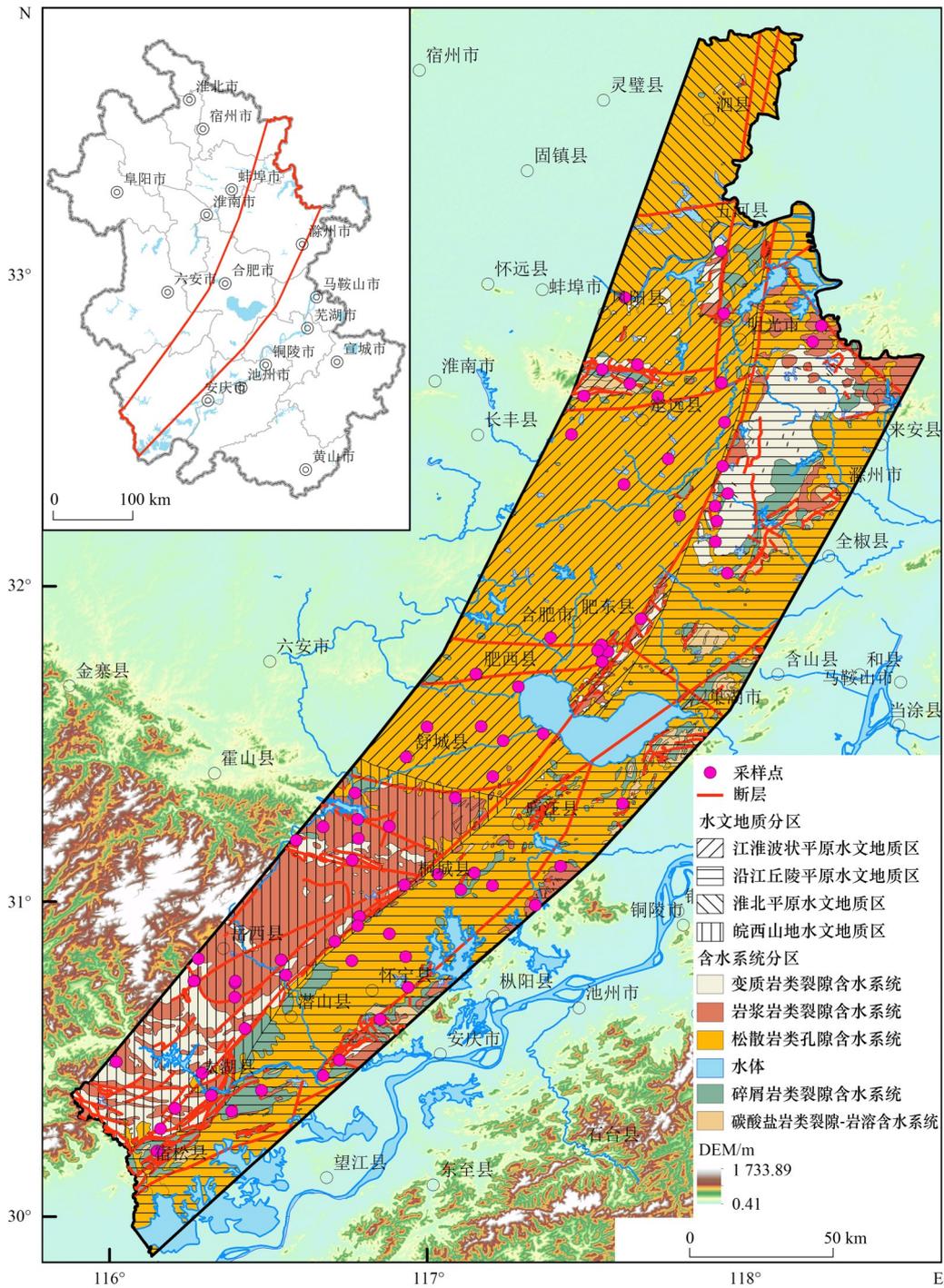


图1 研究区位置及采样分布示意
 Fig. 1 Location of the sampling sites in the study area

所示,并绘制地下水化学参数的箱线图(图2).其中江淮波状平原地下水的pH值介于7.21~8.35之间,均值为7.82,呈弱碱性; ρ (TDS)介于261.84~1161.73 mg·L⁻¹之间,均值为650.79 mg·L⁻¹;沿江丘陵平原地下水的pH值介于7.65~8.43之间,均值为8.11; ρ (TDS)在123.16~1307.03 mg·L⁻¹,均值为548.43 mg·L⁻¹,属淡水.皖西山地地下水的pH值介于7.05~9.03之间,均值为8.06; ρ (TDS)在37.71~1516.92 mg·L⁻¹,均值为295.48

mg·L⁻¹.研究区地下水呈弱碱性,属淡水范畴.硬度较低.

不同水文地质分区地下水水化学浓度波动幅度较大.江淮波状平原和皖西山地地下水阴离子浓度排序为: HCO₃⁻ > SO₄²⁻ > Cl⁻ > NO₃⁻ > F⁻,沿江丘陵平原为: HCO₃⁻ > Cl⁻ > SO₄²⁻ > NO₃⁻ > F⁻.江淮波状平原和沿江丘陵平原地下水阳离子浓度关系为: Ca²⁺ > Na⁺ > Mg²⁺ > K⁺,而皖西山地为: Na⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺ > K⁺.地下水的主要离子的变异性系数在0.32~2.54,

表 1 不同水文地质分区地下水水化学指标统计¹⁾

Table 1 Statistics of groundwater hydrochemical indexes in different hydrogeological zones

水文地质分区	项目	pH	TDS	TH	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	H ₂ SiO ₃
江淮波状平原 (n=28)	Max	8.35	1 161.73	469.58	94.89	206.43	123.10	47.03	173.31	367.11	629.36	252.50	9.48	76.78
	Min	7.21	261.84	62.54	0.22	2.51	22.91	1.29	7.09	1.41	105.44	0.50	0.04	4.40
	Mean	7.82	650.79	290.50	9.00	64.58	76.98	23.86	57.24	64.25	321.44	34.02	0.76	32.73
	Std	0.27	206.44	94.00	21.08	46.77	24.97	9.73	50.73	72.09	114.51	49.91	1.69	14.32
	CV	0.03	0.32	0.32	2.34	0.72	0.32	0.41	0.89	1.12	0.36	1.47	2.21	0.44
沿江丘陵平原 (n=27)	Max	8.43	1 307.03	593.39	46.60	133.14	178.30	46.94	249.42	231.42	517.33	473.12	1.41	49.32
	Min	7.65	123.16	66.24	0.55	1.48	14.12	3.04	7.09	4.63	65.90	0.48	0.04	12.05
	Mean	8.11	548.43	279.07	7.42	38.65	77.69	20.66	52.64	43.55	252.23	51.39	0.40	29.51
	Std	0.20	292.07	145.07	11.53	34.75	41.61	11.99	58.04	44.29	121.65	90.36	0.25	9.80
	CV	0.02	0.53	0.52	1.56	0.90	0.54	0.58	1.10	1.02	0.48	1.76	0.64	0.33
皖西山地 (n=31)	Max	9.03	1 516.92	433.26	12.45	300.83	170.20	21.32	60.75	955.10	322.92	34.86	10.33	89.04
	Min	7.05	37.71	17.47	0.23	2.00	4.77	0.06	1.79	1.57	16.48	0.16	0.12	10.55
	Mean	8.06	295.48	107.33	3.01	40.54	35.80	4.35	13.24	88.03	100.56	7.18	1.34	38.70
	Std	0.47	346.92	95.27	3.82	83.99	34.24	5.16	15.59	223.38	75.80	9.62	2.67	21.54
	CV	0.06	1.17	0.89	1.27	2.07	0.96	1.19	1.18	2.54	0.75	1.34	1.99	0.56

1) Max 表示最大值, Min 表示最小值, Mean 表示均值, Std 表示标准差, CV 表示变异系数; pH 为无量纲, 其余成分单位为 mg·L⁻¹

不同水文地质分区地下水水化学空间变异性较大。另外 K⁺、SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 变异系数大于 1, 表明这 3 种元

素具有明显的空间差异性, 推测地下水可能受人类活动的影响导致局部离子富集严重^[3]。

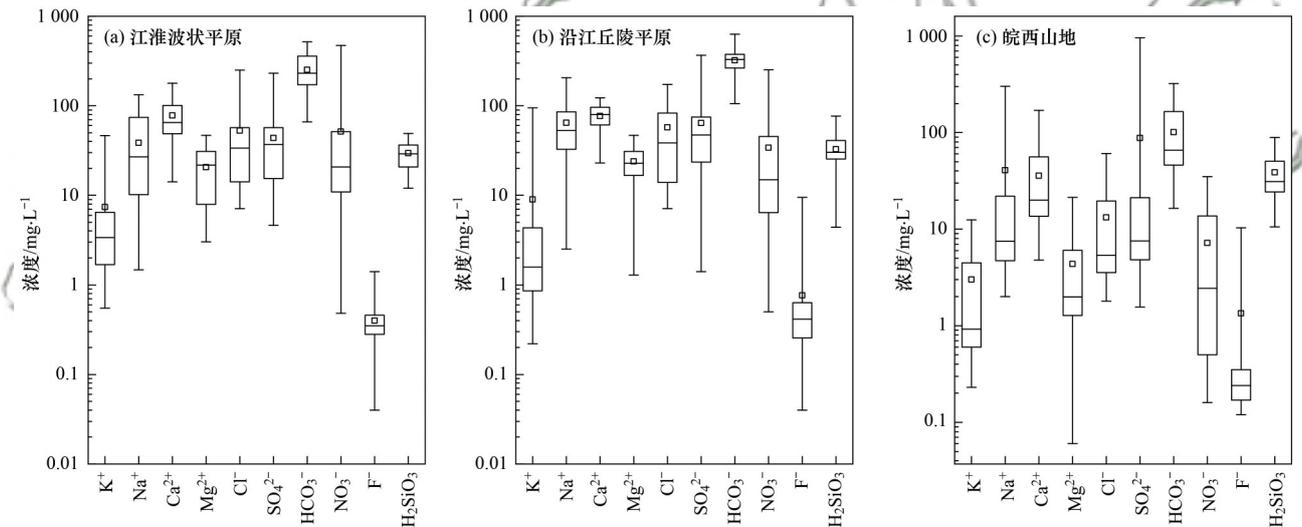


图 2 研究区地下水化学指标箱线图

Fig. 2 Box diagram of groundwater chemical indexes in the study area

2.2 浅层地下水水化学类型特征

基于 Piper 三线图可以直观反映浅层地下水水化学的类型及演化特征^[10,36]。阳离子主要分布在 Ca²⁺ 端元, 而在 Na⁺+K⁺ 端元有少量分布。优势阴离子以 HCO₃⁻ 为主, 其次为 SO₄²⁻, 表明郟庐断裂带周边浅层地下水水化学形成主要受碳酸盐岩的溶解控制。按舒卡列夫分类法, 江淮波状平原地下水化学类型以 HCO₃-Ca·Mg 型为主, 其次为 HCO₃·SO₄-Ca·Mg 型。沿江丘陵平原地北部以 HCO₃-Na·Ca 型为主, 其次为 HCO₃·Cl-Na·Ca 型; 南部以 HCO₃-Ca 型为主, 其次为 HCO₃-Ca·Mg 型, 局部区域为 HCO₃·SO₄-Ca 和 HCO₃·SO₄-Na·Ca 型。皖西山地水化学类型以 HCO₃-

Na·Ca 型和 HCO₃-Ca 型为主, 其次 HCO₃·SO₄-Na·Ca 型, 局部地区为 SO₄-Na·Ca 型(图 3)。

研究区从南部到北部, 大别山区及南部沿江丘陵平原区为补给区, 地下水主要为 HCO₃-Ca 型; 中北部江淮丘陵平原区为地下水径流和排泄区, 地下水径流较为滞缓, 水化学类型为 HCO₃-Na·Ca·Mg 型和 HCO₃-Na·Ca 型; 江淮之间地下水赋存贫乏, 地下水交替缓慢、径流滞缓, 水化学类型主要为 HCO₃·Cl-Na·Ca 型。

2.3 水化学组分控制因素

2.3.1 水化学指标之间的相关关系

相关性分析可以判断水化学组分中的离子是否

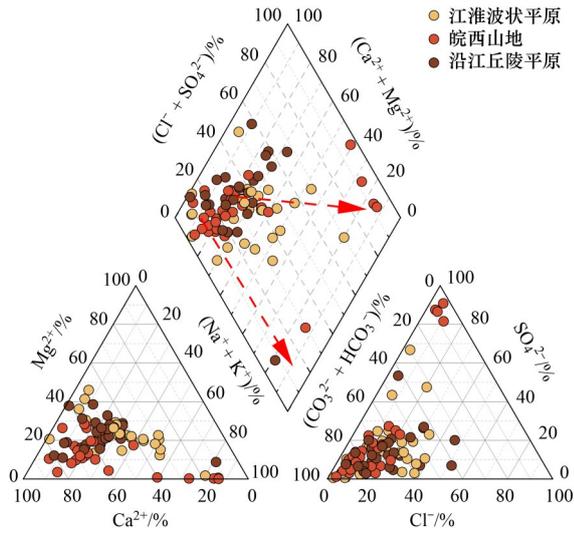
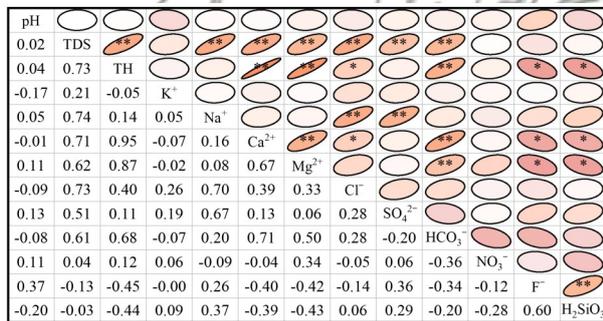


图3 研究区浅层地下水化学 Piper 三线图

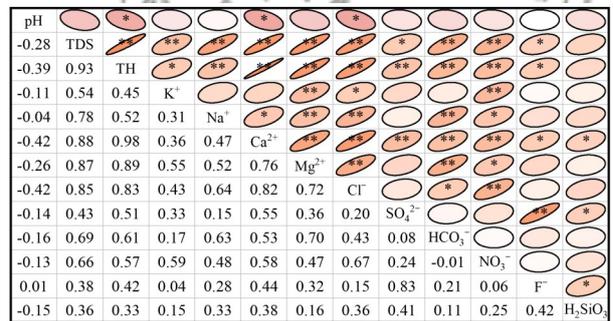
Fig. 3 Piper diagram of shallow groundwater in the study area

为同一来源^[36-38]. 研究区浅层地下水中 TDS 与 TH、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 和 HCO₃⁻ 具有较显著的正相关性 ($r > 0.6, P < 0.01$, 图 4), 说明以上离子对 TDS 具有较大的贡献. 但不同水文地质分区略有差异, 如沿江丘陵平原 TDS 和 SO₄²⁻、皖西山地 TDS 和 HCO₃⁻、Mg²⁺ 相关性不明显. 研究区地下水 Na⁺ 和

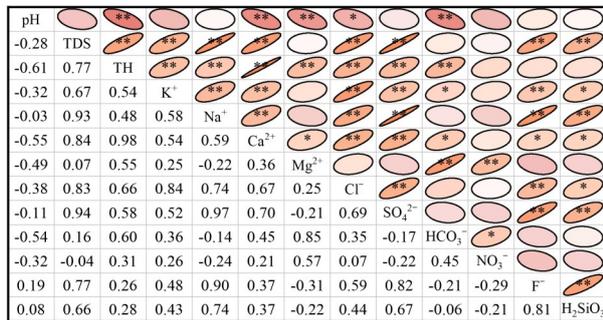
Cl⁻ 具有显著的正相关性 ($r > 0.6, P < 0.01$), 其相关系数分别为 0.70(江淮波状平原)、0.64(沿江丘陵平原) 和 0.74(皖西山地). 江淮波状平原和皖西山地地下水中 SO₄²⁻ 和 Na⁺ 具有显著的正相关性, 尤其是在皖西山地, 其相关系数达 0.97; 沿江丘陵平原和皖西山地 SO₄²⁻ 和 SO₄²⁻ 具有显著的正相关性, 表明地下水可能存在岩盐溶解、蒸发岩或者硅酸盐矿物的风化. 而 HCO₃⁻ 和 Na⁺ 仅在沿江丘陵平原中存在显著的相关关系 ($r > 0.6, P < 0.01$), 说明沿江丘陵平原地下水中的 HCO₃⁻ 与 Na⁺ 可能受岩盐以及碳酸盐矿物的风化溶解控制. 研究区地下水中 HCO₃⁻ 和 Ca²⁺、Mg²⁺ 均具有显著的正相关性 ($r > 0.6, P < 0.01$), 表明地下水中发生碳酸盐和硅酸盐的溶解^[39]. 地下水中 NO₃⁻ 和 K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 和 Cl⁻ 具有显著的正相关性, 但仅有沿江丘陵平原的相关系数大于 0.5, 反映出人类活动对沿江丘陵平原地下水组分造成一定的影响^[38]. Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 呈显著的正相关性, 表明其来源于相同的岩石风化过程^[40]. 此外, 皖西山地 H₂SiO₃ 与 Na⁺ 具有显著的正相关性 ($r > 0.6, P < 0.01$), 说明含钠硅酸盐矿物(如钠长石和斜长石)参与了风化溶解作用.



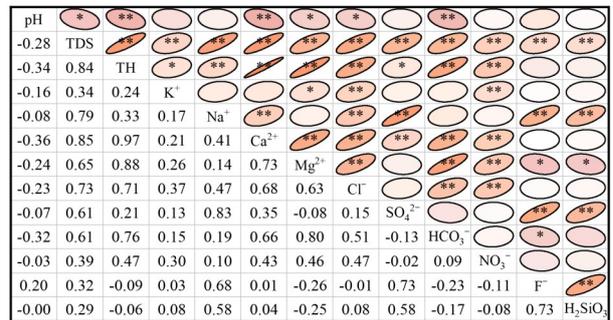
(a) 江淮波状平原



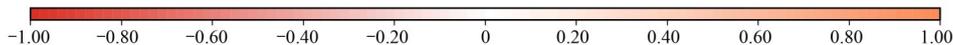
(b) 沿江丘陵平原



(c) 皖西山地



(d) 研究区



*表示在 0.05 水平上显著, **表示在 0.01 水平上显著; 椭圆长轴方向表示相关系数的正负, 右上-左下方向为正值, 左上-右下方向为负值, 椭圆越扁, 表示为绝对值较大的相关系数, 反之越小

图 4 研究区地下水化学组分相关性

Fig. 4 Correlation of chemical components of groundwater in the study area

2.3.2 水岩相互作用机制

地下水与周围介质之间的水岩相互作用, 导致

地下水化学组分发生变化^[10], 水岩相互作用可以揭示水化学演化机制^[41,42]. 从 Gibbs 图^[43,44] 可以得出(图

5), 阳离子 $N(\text{Na}^+)/N(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 在 0.02 ~ 0.89 之间, 阴离子 $N(\text{Cl}^-)/N(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 在 0.02 ~ 0.66 之间. 地下水样品点大部分指向水岩相互作用端元(岩石风化控制区域), 表明研究区地下水的水文地球化学过程及水化学特征受水岩相互作用主导控制, 少量样品落在蒸发-浓缩区域, 指示本区部分地下水还受到蒸发-

浓缩作用的影响, 但影响远不及水岩相互作用. 样品点分布远离降雨控制端元, 表明大气降水对研究区内地下水主要离子来源贡献较小. 沿江丘陵平原和皖西山地存在部分样品 $N(\text{Cl}^-)/N(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 大于 0.5, 沿江丘陵平原和皖西山地为典型的农作物区, 说明这些样品受农业活动等人类活动影响^[45].

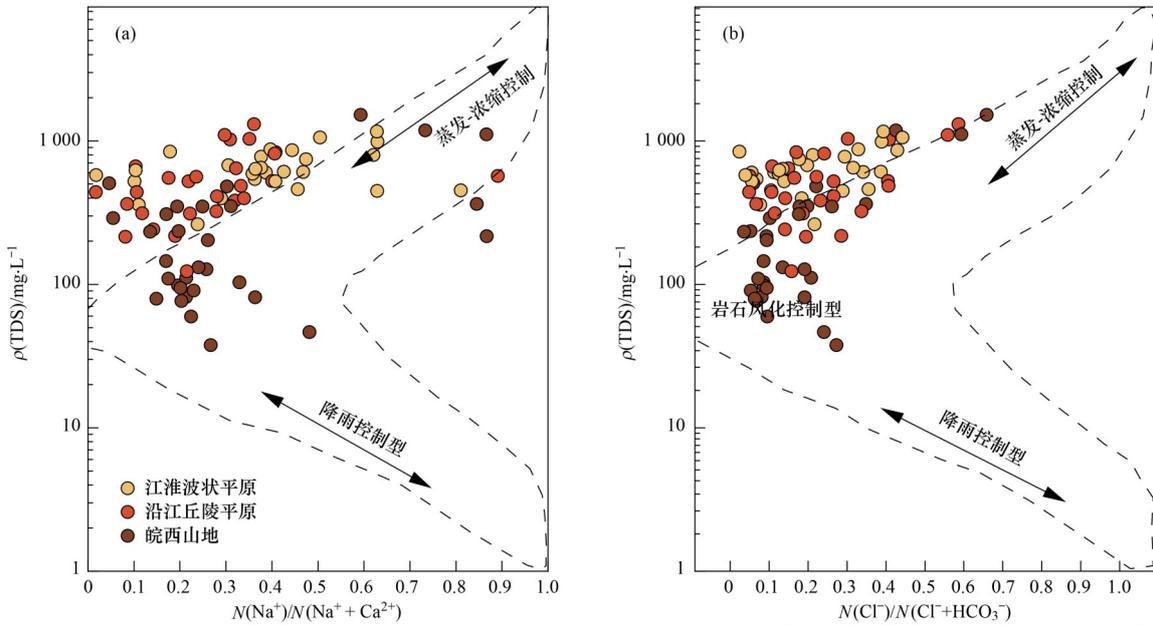


图 5 研究区浅层地下水 Gibbs 图
Fig. 5 Gibbs diagram for shallow groundwater of the study area

地下水系统水文地球化学过程受矿物的溶解-沉淀作用控制^[16], 一般情况下, 硅酸盐和铝硅酸盐是地下水含水层中主要矿物, 且控制着地下水系统矿物间的溶解-沉淀平衡状态^[46,47]. 基于研究区地下水硅酸盐体系稳定场可知(图 6), 研究区浅层地下水样品点绝大部分位于斜长石和蒙脱石稳定区域内, 地下水中 SiO_2 含量绝大部分超过石英饱和线, 但远未达到非晶质硅饱和线, 推测研究区地下水可能发

生了钙长石、钠长石和云母等矿物的溶解, 且水解为高岭石和蒙脱石等黏土矿物, 指示浅层地下水硅酸盐矿物发生了非全等溶解. 原生矿物在研究区地下水中远未达到饱和状态, 具备溶解形成次生矿物能力. 表明研究区浅层地下水径流循环过程中, 除水解产生高岭土和蒙脱石等黏土矿物外, K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 HCO_3^- 等离子也随之析出^[16]. 其反应过程如下:

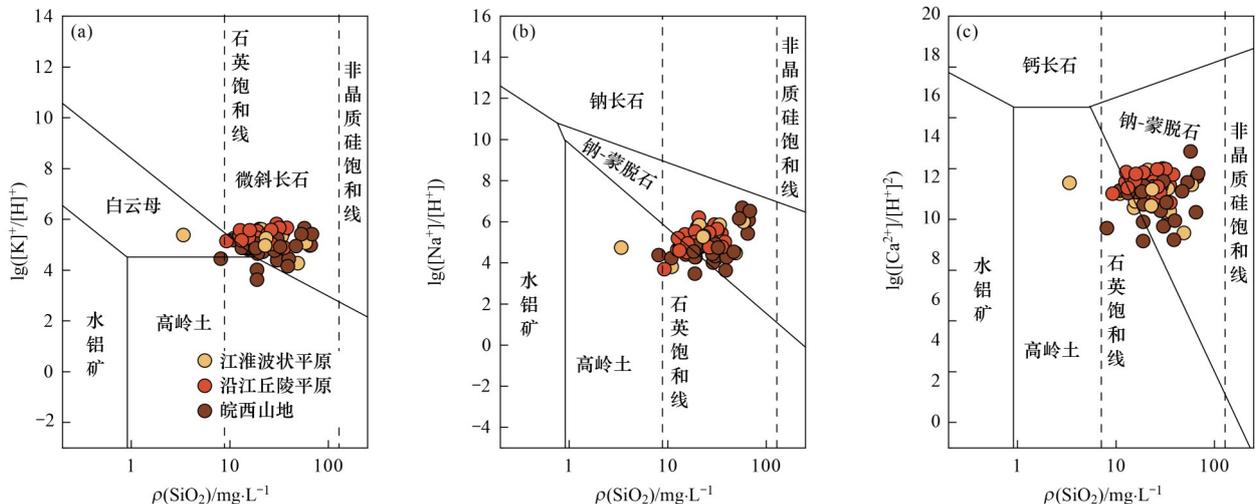
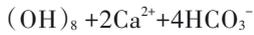
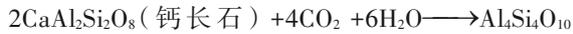
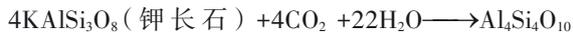
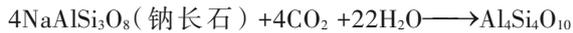


图 6 硅酸盐稳定场
Fig. 6 Silicate stability field



受碳酸盐、硅酸盐和蒸发岩矿物风化程度的影响, 地下水系统产生的 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等离子浓度差别明显, 基于 $N(\text{Mg}^{2+})/N(\text{Na}^+)$ 、 $N(\text{Ca}^{2+})/N(\text{Na}^+)$ 和 $N(\text{HCO}_3^-)/N(\text{Na}^+)$ 值(毫克当量比)大致可

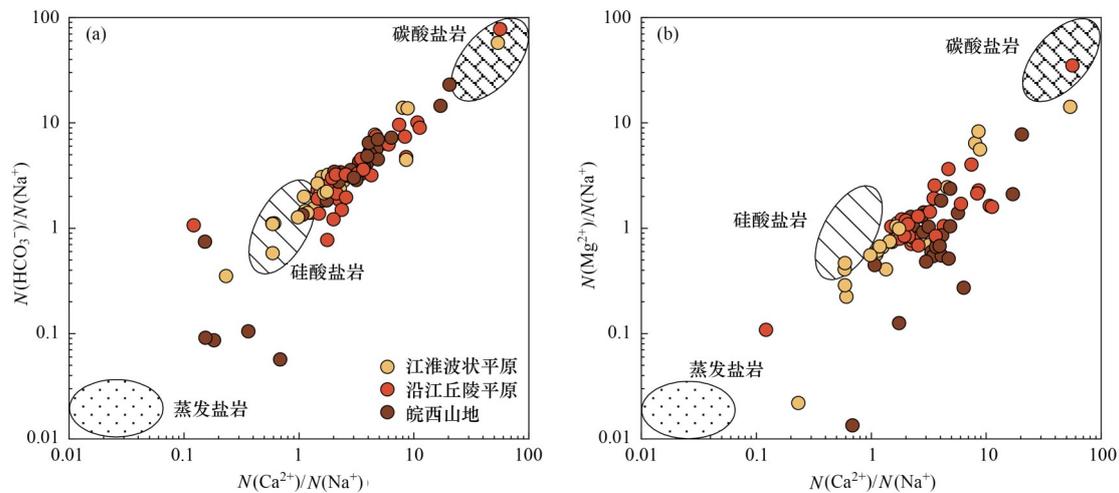


图7 地下水 $N(\text{Mg}^{2+})/N(\text{Na}^+)$ 、 $N(\text{Ca}^{2+})/N(\text{Na}^+)$ 和 $N(\text{HCO}_3^-)/N(\text{Na}^+)$ 关系

Fig. 7 Relationship between $N(\text{Mg}^{2+})/N(\text{Na}^+)$, $N(\text{Ca}^{2+})/N(\text{Na}^+)$, and $N(\text{HCO}_3^-)/N(\text{Na}^+)$ of groundwater

2.3.3 溶滤作用

地下水与围岩之间发生水岩相互作用形成地下水的化学成分, 故通过不同离子间的关系大致可识别浅层地下水中离子的来源及与此发生的水文地球化学过程作用^[34,41]. 一般情况下, 若地下水系统中仅发生岩盐溶解, 则 $N(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/N(\text{Cl}^-)$ 的值为1, 而存在硅酸盐风化溶解则产生的 $N(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/N(\text{Cl}^-)$ 大于1^[43]. 研究区绝大部分地下水样品点落在 $N(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/N(\text{Cl}^-)$ 的上方[图8(a)], 说明地下水水化学组分除了受岩盐溶解作用外, 还受到其他钠盐的溶解. 且地下水中 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 明显偏离1:1线, 可能受到阳离子交换作用, 导致 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 浓度大于 Cl^- .

研究区绝大部分地下水样品落在 $N(\text{Na}^+)/N(\text{HCO}_3^-)$ 关系下方, 即位于1:1直线下方[图8(b)], 表明研究区浅层地下水矿物溶解产生的 Na^+ 难以平衡 HCO_3^- 含量, 指示着碳酸盐岩矿物的溶解产生了多余的 HCO_3^- ^[49].

$N(\text{Na}^+)/N(\text{SO}_4^{2-})$ 的值可以反映地下水组分是否来源于芒硝的风化作用^[50]. 研究区绝大部分地下水样品 Na^+ 与 SO_4^{2-} 的比值高于1或接近1[图8(c)], 说

判别不同风化溶解作用对地下水水化学组分的贡献程度^[12,48]. 根据图7所示, 研究区绝大部分地下水样品分布于硅酸盐岩和碳酸盐岩风化控制区域之中间部位, 说明研究区浅层地下水水化学的形成受硅酸盐岩和碳酸盐岩风化溶解作用共同控制, 推测其与郟庐断裂带周边区域广泛裸露及隐伏在第四系下部的碎屑岩含水层及碳酸盐岩含水层发育有关. 仅有皖西山地少量地下水样品靠近蒸发岩盐区域, 这可能与皖西山地分布的硫铁矿有关. 但整体上研究地下水受蒸发岩盐风化溶解作用较弱.

明 SO_4^{2-} 和 Na^+ 可能主要来源于芒硝的风化作用, 除了芒硝风化外, 阳离子交换作用导致 Na^+ 增多^[34].

蒸发岩和碳酸岩风化溶解作用对地下水离子的贡献程度可依据 $N(\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})/N(\text{HCO}_3^-)$ 关系来判断^[34,41]. 研究区地下水样品点绝大部分均落在 $N(\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})/N(\text{HCO}_3^-) = 1$ 的直线上方. 说明研究区地下水离子化学组分来源受碳酸盐岩的溶解作用控制. 由于皖西山地地层中普遍存在硫铁矿矿物, 导致部分水样点的组分受硫铁矿的溶解影响[图8(d)].

$N(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/N(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 值关系可以揭示地下水中的离子是否由蒸发岩(石膏)和碳酸盐岩平衡控制^[51]. 研究区地下水 $N(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/N(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 呈线性关系, 大部分样品点分布在1:1等当量线两侧, 表明研究区浅层地下水水岩相互作用复杂. 大部分地下水样品落在 $N(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/N(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) = 1$ 的直线附近, 说明研究地下水主要受碳酸盐岩(方解石、白云石)和蒸发岩矿物溶解控制. 部分浅层地下水水样位于1:1等当量线下方, 且远离该线[图8(e)]. 表明研究区浅层地下水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量远少于 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} , 缺少部分需要更多的 Na^+ 和 K^+ 来

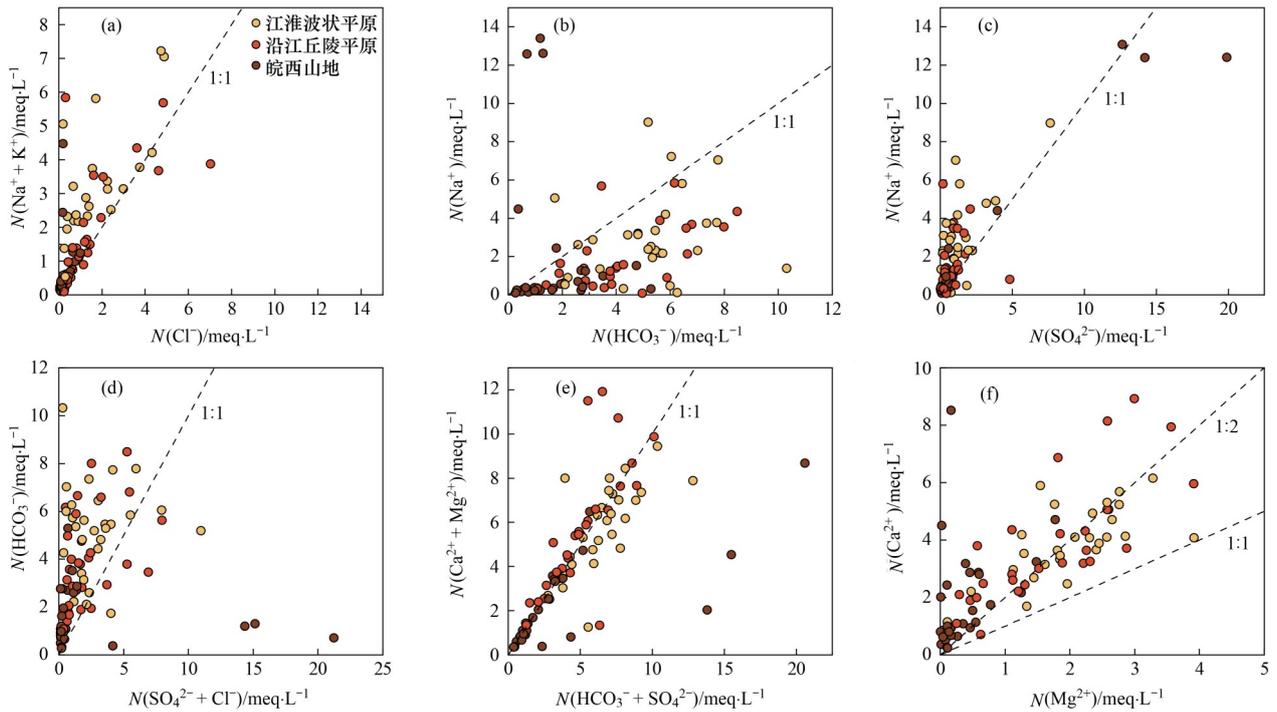


图8 主要离子比例关系

Fig. 8 Relationship between major ions

维持溶质中离子平衡^[48].

$N(\text{Ca}^{2+})/N(\text{Mg}^{2+})$ 可用于判断碳酸盐岩矿物的风化溶解是由白云石或方解石控制^[52]. 研究区地下水 $N(\text{Ca}^{2+})/N(\text{Mg}^{2+})$ 值大于1[图8(f)], 说明碳酸盐岩以方解石溶解为主.

从图9(a)可以看出, 地下水中绝大部分样点落在石膏和碳酸溶解碳酸盐岩线的中间区域, 少量样品靠近硫酸溶解碳酸盐岩线, 推测碳酸对碳酸盐岩

的溶解及石膏溶解是研究区浅层地下水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的主要来源, 少量可能来自硫酸对碳酸盐岩的溶解. 另外, 根据 $N(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^-)$ 与 $N(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^- - \text{Na}^+)$ 的毫克当量关系可以识别 SO_4^{2-} 是否来源于石膏的溶解^[48]. 如图9(b)所示, 研究区绝大部分地下水样品靠近1:1直线, 部分样品稍偏离且位于直线的上部, 表明研究地下水更多是受碳酸参与碳酸盐岩的风化过程控制, 其控制程度远高于硫酸对碳酸盐岩溶解.

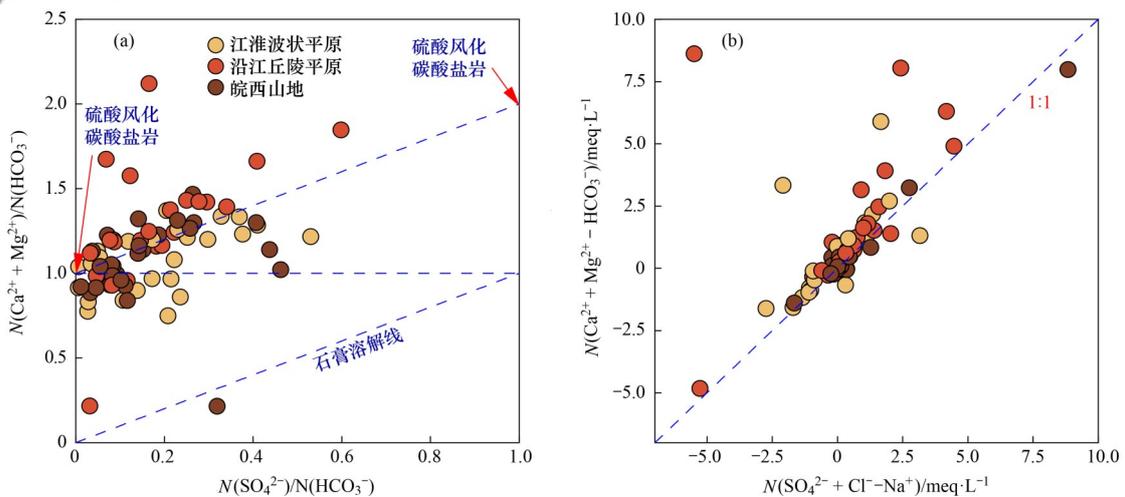


图9 地下水中 $N(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/N(\text{HCO}_3^-)$ 与 $N(\text{SO}_4^{2-})/N(\text{HCO}_3^-)$ 及 $N(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^-)$ 与 $N(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^- - \text{Na}^+)$ 的关系

Fig. 9 Relationships between $N(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/N(\text{HCO}_3^-)$ vs. $N(\text{SO}_4^{2-})/N(\text{HCO}_3^-)$ and $N(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^-)$ vs. $N(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^- - \text{Na}^+)$ of groundwater

2.3.4 阳离子交替吸附作用

一般情况下可采用 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)/(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ 值(毫克当量比)来判断地下水中阳离子

交替吸附作用^[48]. 若发生阳离子交换作用, 则两者的比值一般在-1左右^[49]. 如图10(a)所示, 研究区大部分样品点均表现出负相关性, 地下水相关系数达

0.85, 且斜率接近-1. 表明阳离子交替吸附作用在研

究区地下水普遍存在.

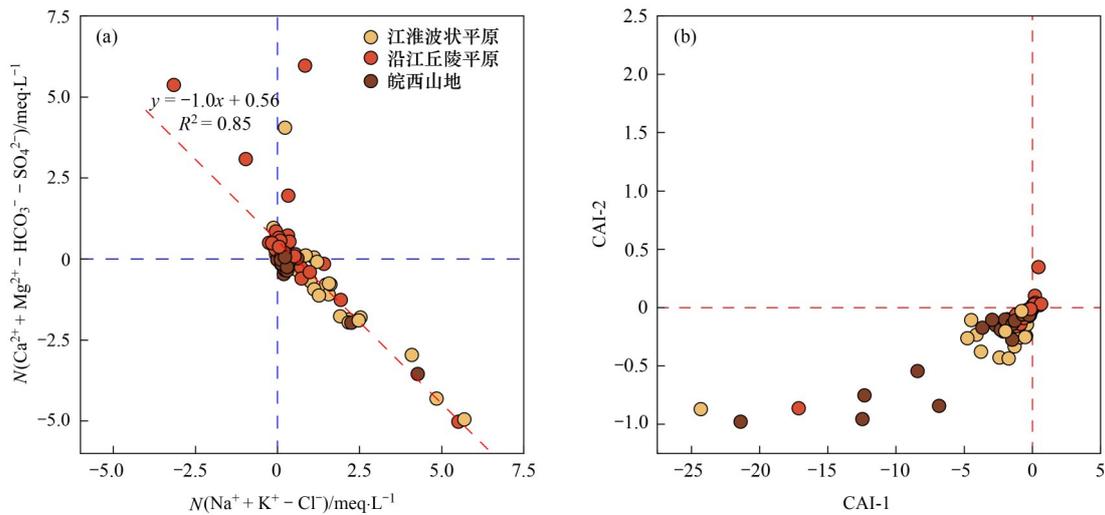


图 10 研究区水化学阳离子交替吸附作用以及氯碱指数

Fig. 10 Cation exchange and adsorption of groundwater and Chlor-alkali index of groundwater in the study area

地下水中阳离子交换反应作用的类型和强度可通过氯碱指数(CAI-1 和 CAI-2)来检验. 若地下水中的氯碱指数(CAI-1 和 CAI-2)为正直, 则表示为地下水中 Na^+ 和 K^+ 置换含水介质中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , 反之亦然. 而其绝对值越大, 则表明地下水中发生阳离子交替吸附作用就越强^[38,53]. 氯碱指数计算过程可参考文献[34]. 研究区地下水 CAI-1 值介于在 -24.31 ~ 0.65 之间, 均值为 -2.06; 而 CAI-2 值范围为 -0.98 ~ 0.35, 均值为 -0.16. 表明研究区地下水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子置换含水介质中的 Na^+ 和 K^+ 离子, 导致 Na^+ 和 K^+ 离子盈余. 推测可能为硫酸溶解碳酸盐岩使水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度增加, 使其趋于饱和. 而多余的 SO_4^{2-} 则由 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 不断置换 Na^+ 和 K^+ 离子来维持平衡, 这也导致了 Na^+ 与 SO_4^{2-} 呈正相关性(图 4).

2.3.5 饱和指数

研究区地下水水样中方解石的饱和指数(SI)在 1.09 ~ 3.69 之间, 均值为 2.96; 白云石的 SI 介于 1.75 ~ 7.07 之间, 均值为 5.31; 上述两种矿物的 SI 值均大于 0, 说明研究区方解石和白云石过饱和, 具有生成沉淀, 析出晶体的可能. 萤石的 SI 介于 -0.65 ~ 3.79 之间, 均值为 1.15, 仅有 2 个样品的 SI 小于 0, 说明研究区萤石基本处于过饱和状态, 具有沉淀析出的可能. 岩盐的 SI 在 -7.07 ~ -3.51, 均值为 -5.23, 所有样品的岩盐 SI 均小于 0, 说明研究区岩盐处于不饱和状态, 岩盐不断溶解进入浅层地下水中. 石膏的 SI 在 -1.18 ~ 1.57, 均值为 0.04, 表明研究地下水石膏大体趋于平衡状态[图 11(a)].

浅层地下水中的方解石、白云石和萤石的 SI 值与 TDS 相互独立[图 11(b)、图 11(c)和图 11(d)]. 相关研究表明, 研究区内含水层中碳酸盐岩矿物普遍

存在^[25]. 虽然方解石和白云石均处于饱和状态, 但碳酸盐岩的溶解作用很可能在地下水水化学演变的初始阶段迅速完成^[42]. 故可以认为碳酸盐岩溶解是研究区浅层地下水中 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的重要来源. 而地下水样品中萤石的 SI 绝大部分大于 0, 浅层黏土矿物中钙质成分含量较多, 有利于氟离子和钙离子等结合形成 CaF_2 . 浅层地下水中岩盐和石膏的 SI 大体上随着 TDS 的增大而增加[图 11(e)和图 11(f)], 说明研究区浅层地下水 TDS 的增加与岩盐和石膏的溶解相关.

地下水中溶解的 CO_2 可以导致诸多矿物的溶解, 特别是碳酸盐岩等矿物的溶解. 研究区浅层地下水 CO_2 分压($p\text{CO}_2$) 的范围为 $10^{-3.20} \sim 10^{-0.14}$ Pa 之间, 均值为 $10^{-1.19}$ Pa. 从图 12 可见, 浅层地下水中 $p\text{CO}_2$ 值与 pH 值呈显著的负相关, 且随着 $p\text{CO}_2$ 的减小而 pH 值增大[图 12(a)]. 研究区含水介质中普遍存在钠长石、钾长石等长石类矿物^[33], 长石类矿物在溶解过程中不断消耗 CO_2 从而使得 HCO_3^- 离子浓度增加, 导致 pH 值升高. 从饱和指数 SI 可知, 研究区方解石处于饱和沉淀析出, $p\text{CO}_2$ 与方解石饱和指数 SI 相关性不明显[图 12(b)].

2.3.6 人类活动影响

矿业活动、农业活动或工业活动等人类活动制约并影响着地下水水化学的演变^[54]. 如 SO_4^{2-} 为矿业活动的特征因子, 而农业活动和生活污水的特征因子主要为 Cl^- 、 NO_3^- 和 Na^+ . 一般情况下, 农业活动产生的 $N(\text{NO}_3^-)/N(\text{Ca}^{2+})$ 值较高, 而矿业活动则表现为较高的 $N(\text{SO}_4^{2-})/N(\text{Ca}^{2+})$ 值^[38], 因此, 可通过 $N(\text{SO}_4^{2-})/N(\text{Ca}^{2+})$ 与 $N(\text{NO}_3^-)/N(\text{Ca}^{2+})$ 关系来判别不同人类活动对地下水水化学的影响. 也可以采用

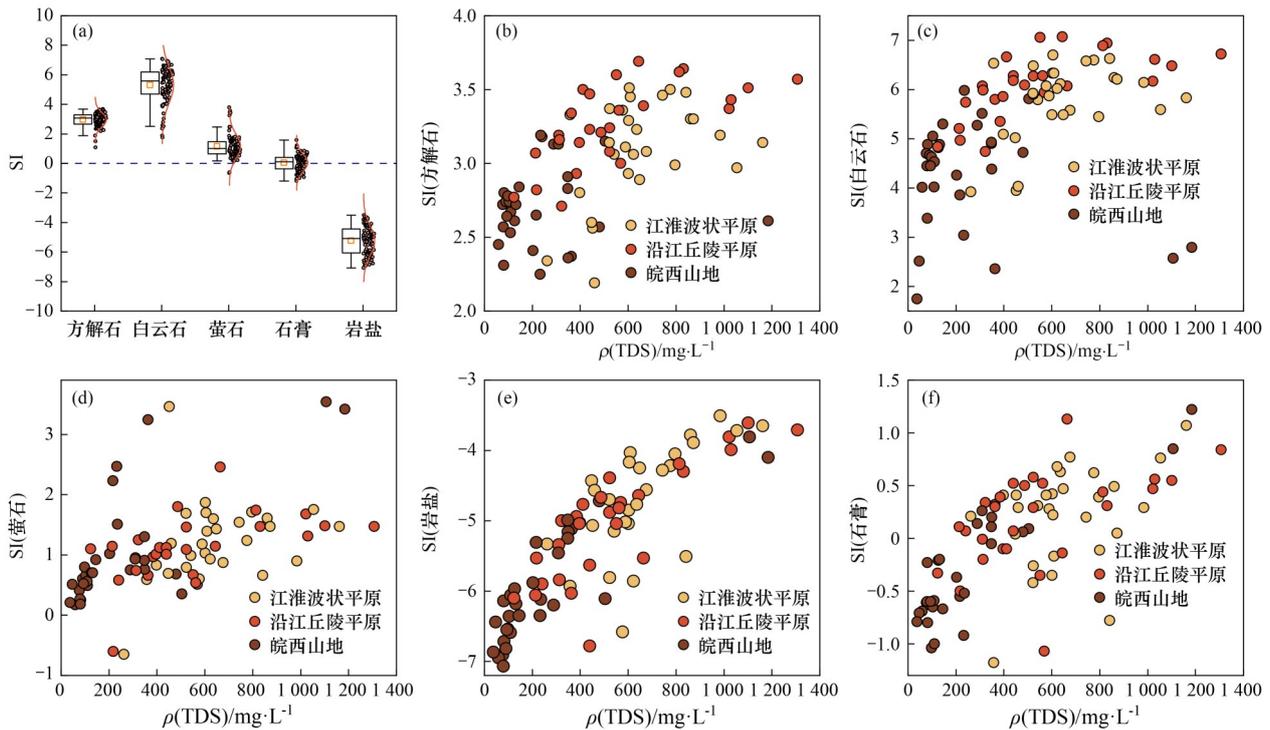


图 11 矿物饱和度指数 (SI) 与 TDS 关系

Fig. 11 Relation between mineral saturation index (SI) and TDS

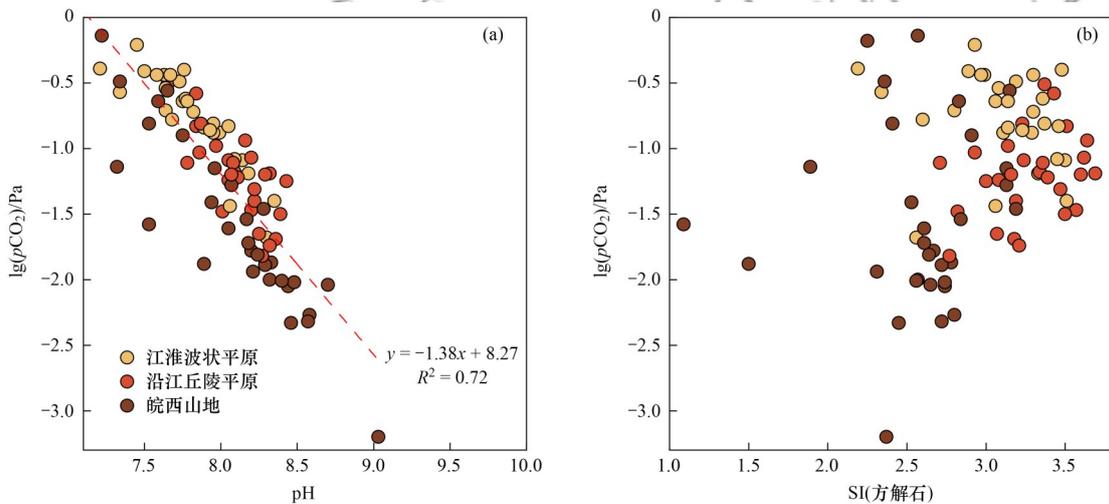


图 12 CO₂分压与 pH 值、方解石饱和指数关系

Fig. 12 Relationship between partial pressure CO₂ versus pH and calcite saturation index

$N(\text{NO}_3^-)/N(\text{Na}^+)$ 与 $N(\text{Cl}^-)/N(\text{Na}^+)$ 的关系来表征人类活动对地下水硝酸盐组分的影响^[48]. 从图 13(a) 可知, 江淮波状平原部分地下水具有较高 $N(\text{NO}_3^-)/N(\text{Ca}^{2+})$ 值和较低 $N(\text{SO}_4^{2-})/N(\text{Ca}^{2+})$ 值, 表明该地区受农业活动和生活污水影响较大. 而从图 13(b) 可以发现, 研究区地下水样品绝大部分分布于硅酸盐岩风化区域, 少量样品点向农业活动端元迁移, 指示着研究浅层地下水在一定程度上受到农业污染的影响.

2.4 地下水质量评价

研究区浅层地下水的 EWQI 值在 5.32 ~ 339.29, 均值为 52.20. 根据 EWQI 等级划分, EWQI 小于 25

的地下水占 30.23%, 在 25 ~ 50 之间的占 33.72%, 在 50 ~ 100 之间的占 24.42%, 在 100 ~ 150 之间的占 4.65%, 大于 150 的占 6.98% [图 14(a)]. 研究区浅层地下水中质量为 1 和 2 级的样品点占 63.95%, 达到优秀和良好等级, 可直接用于饮用; 可作家用的地下水样品占 29.07%, 有 6.98% 的地下水质量为 5 级, 质量较差, 处于完全非饮用质量等级^[55]. 质量差 ~ 较差的水样主要分布在江淮波状平原, 江淮波状平原为典型的农业种植区, 从水化学控制因素分析得知, 地下水受到农业面源污染的影响, 故判断地下水水质变差必然受到农业活动和工业活动等的影

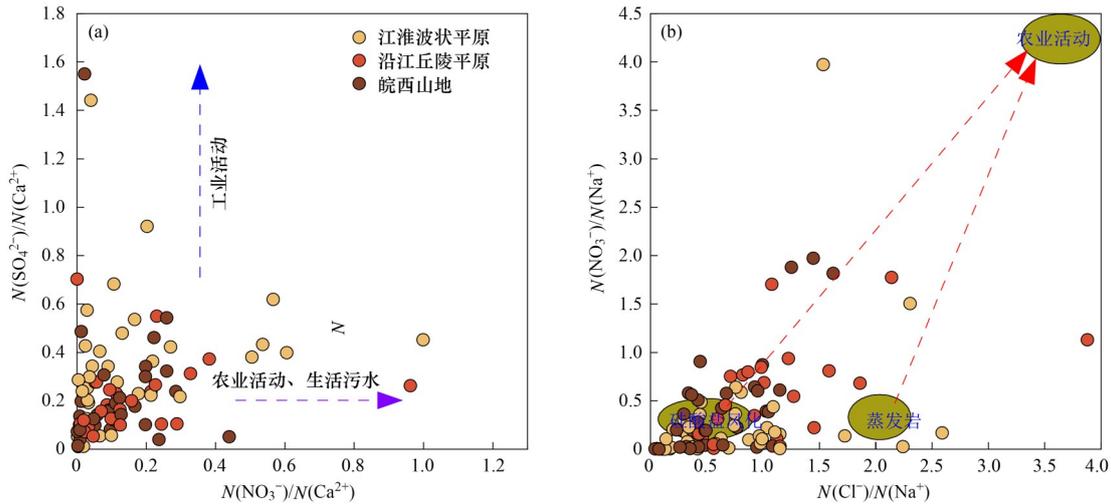


图 13 地下水 $N(\text{NO}_3^-)/N(\text{Na}^+)$ 与 $N(\text{Cl}^-)/N(\text{Na}^+)$ 和 $N(\text{SO}_4^{2-})/N(\text{Ca}^{2+})$ 与 $N(\text{NO}_3^-)/N(\text{Ca}^{2+})$ 关系

Fig. 13 Relationships of $N(\text{NO}_3^-)/N(\text{Na}^+)$ vs. $N(\text{Cl}^-)/N(\text{Na}^+)$ and $N(\text{SO}_4^{2-})/N(\text{Ca}^{2+})$ vs $N(\text{NO}_3^-)/N(\text{Ca}^{2+})$ of groundwater

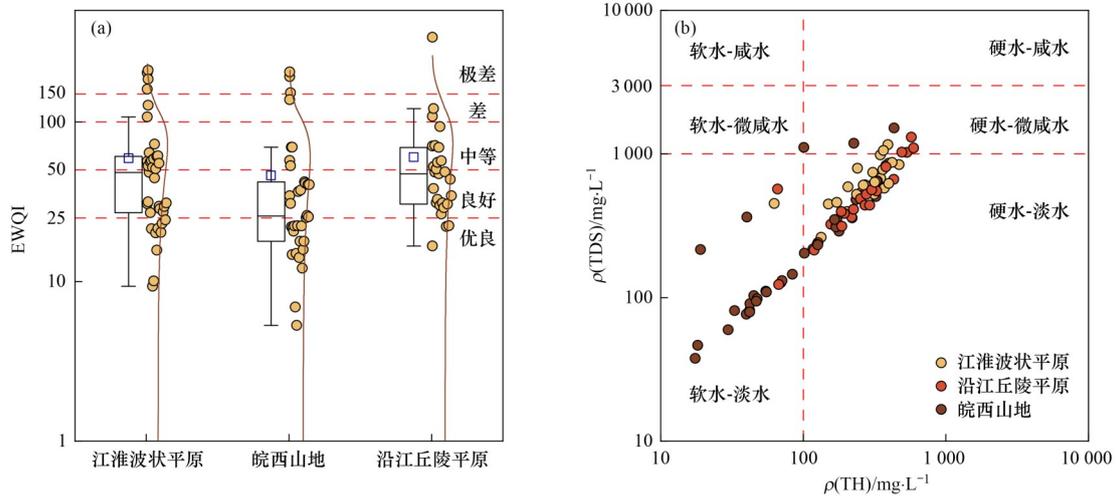


图 14 研究区地下水水质

Fig. 14 Groundwater quality of the study area

根据 $\text{TH}[\rho(\text{TH}) < 100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 表示软水、 $\rho(\text{TH}) \geq 100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 表示硬水] 和 $\text{TDS}[\rho(\text{TDS}) < 1\,000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 为淡水、 $1\,000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \leq \text{TDS} < 3\,000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 为微咸水、 $\rho(\text{TDS}) \geq 3\,000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 为咸水] 的比值关系，将地下水分为软水-淡水、软水-微咸水、软水-咸水、硬水-淡水、硬水-微咸水和硬水-咸水共 6 类^[56,57]。其中软水-淡水的比例为 24.42% (21 组)，硬水-淡水占 66.28% (57 组)，硬水-微咸水占 9.30% (8 组) [图 14 (b)]。软水-淡水的样品点主要分布在皖西山地，江淮波状平原和沿江丘陵平原零星分布。表明皖西山地地下水的水质较江淮波状平原和沿江丘陵平原好。江淮波状平原和沿江丘陵平原大部分地下水都不适合直接饮用，应进行适当的处理。

3 结论

(1) 郟庐断裂带(安徽段)地下水整体呈弱碱性，

江淮波状平原地下水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型为主，沿江丘陵平原地北部以 $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型为主，皖西山地水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型为主。

(2) 研究区地下水水化学的形成主要受硅酸盐岩和碳酸盐岩风化作用等水岩相互作用影响，大气降水及蒸发浓缩对地下水的形成具有一定的影响。岩盐、长石和碳酸盐岩(方解石和白云石)的溶解/沉淀作用制约着地下水水化学的演化。研究区地下水普遍存在正阳离子交替吸附作用。

(3) 研究区地下水整体质量较好，皖西山地地下水较江淮波状平原和沿江丘陵平原好，但受到一定程度人类活动的污染，大部分地下水都不适合直接饮用，应进行适当处理。

参考文献：

[1] 张勇, 郭纯青, 朱彦光, 等. 云南荞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.
- [2] 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 analysis of their controlling factors in an alluvial fan of Jianjiang River[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(7): 3089-3098.
- [3] 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 等. 雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5375-5383.
Peng H X, Hou Q Q, Zeng M, *et al.* Hydrochemical characteristics and controlling factors of groundwater in the Leizhou Peninsula[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5375-5383.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 寇永朝, 华琨, 李洲, 等. 泾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] Xiao J, Zhang F, Jin Z D. Spatial characteristics and controlling factors of chemical weathering of loess in the dry season in the middle Loess Plateau, China[J]. *Hydrological Processes*, 2016, **30**(25): 4855-4869.
- [8] 张涛, 蔡五田, 李颖智, 等. 尼洋河流域水化学特征及其控制因素[J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4537-4545.
Zhang T, Cai W T, Li Y Z, *et al.* Major ionic features and their possible controls in the water of the Niyang River Basin [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4537-4545.
- [9] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 等. 乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1779-1787.
Huang Q B, Qin X Q, Liu P Y, *et al.* Major ionic features and their controlling factors in the upper-middle reaches of Wujiang River [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1779-1787.
- [10] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. *Science*, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [11] Piper A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1944, **25**(6): 914-928.
- [12] 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.
- [13] 刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 等. 沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5428-5439.
Liu J T, Cai W T, Cao Y T, *et al.* Hydrochemical characteristics of groundwater and the origin in alluvial-proluvial fan of Qinhe River [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5428-5439.
- [14] Chen K P, Jiao J J, Huang J M, *et al.* Multivariate statistical evaluation of trace elements in groundwater in a coastal area in Shenzhen, China [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **147**(3): 771-780.
- [15] 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.
- [16] 刘海, 康博, 沈军辉. 基于反向地球化学模拟的地下水形成作用: 以安徽省泗县为例[J]. *现代地质*, 2019, **33**(2): 440-450.
Liu H, Kang B, Shen J H. Formation of groundwater based on inverse geochemical modeling: a case study from the Sixian county, Anhui province [J]. *Geoscience*, 2019, **33**(2): 440-450.
- [17] Machiwal D, Jha M K. Identifying sources of groundwater contamination in a hard-rock aquifer system using multivariate statistical analyses and GIS-based geostatistical modeling techniques [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2015, **4**: 80-110.
- [18] 鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 等. 新疆祁漫塔格地区地下水化学特征及成因分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, **33**(2): 85-92.
Lu H, Zeng Y Y, Zhou J L, *et al.* Hydrochemical characteristics of the groundwater in qimantage area of Xinjiang and the formation causes [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2022, **33**(2): 85-92.
- [19] 杨锐, 周金龙, 魏兴, 等. 新疆和田东部平原区地下水化学特征及演化规律[J]. *环境化学*, 2022, **41**(4): 1367-1379.
Yang R, Zhou J L, Wei X, *et al.* Hydrochemical characteristics and evolution of groundwater in the eastern plain of Hotian Prefecture, Xinjiang [J]. *Environmental Chemistry*, 2022, **41**(4): 1367-1379.
- [20] Ali S, Shekhar S, Chandrasekhar T, *et al.* Influence of the water - sediment interaction on the major ions chemistry and fluoride pollution in groundwater of the older alluvial plains of Delhi, India [J]. *Journal of Earth System Science*, 2021, **130**(2): 98, doi: 10.1007/s12040-021-01585-3.
- [21] Tian H, Du J Z, Ma S M, *et al.* Application of water quality index and multivariate statistical analysis in the hydrogeochemical assessment of shallow groundwater in Hailun, northeast China [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2021, **27**(3): 651-667.
- [22] Zhang Z Y, Guo Y N, Wu J H, *et al.* Surface water quality and health risk assessment in Taizhou city, Zhejiang Province (China) [J]. *Exposure and Health*, 2022, **14**(1): 1-16.
- [23] Mthembu P P, Elumalai V, Li P Y, *et al.* Integration of heavy metal pollution indices and health risk assessment of groundwater in semi-arid coastal aquifers, South Africa [J]. *Exposure and Health*, 2022, **14**(2): 487-502.
- [24] Li P Y, Qian H, Wu J H. Groundwater quality assessment based on improved water quality index in Pengyang County, Ningxia, Northwest China [J]. *Journal of Chemistry*, 2010, **7**, doi: 10.1155/2010/451304.
- [25] 汤加富, 许卫. 郟庐断裂带南段并无巨大平移——来自安徽境内的证据[J]. *地质评论*, 2002, **48**(5): 449-456.
Tang J F, Xu W. No huge strike slip in the southern sector of the Tancheng-Lujiang fault-tectonic evidence from Anhui province [J]. *Geological Review*, 2002, **48**(5): 449-456.
- [26] 宋仁亮. 基于大地热流的郟庐断裂带(安徽段)构造控热探讨[J]. *上海国土资源*, 2021, **42**(4): 61-67.
Song R L. Discussion on tectonic control heat of the Tan-Lu fault zone (Anhui section) based on terrestrial heat flow [J]. *Shanghai Land & Resources*, 2021, **42**(4): 61-67.
- [27] 宋仁亮, 钱家忠, 马雷, 等. 郟庐断裂带(安徽段)地质环境调查与评价研究[J]. *安徽地质*, 2021, **31**(1): 57-62.
Song R L, Qian J Z, Ma L, *et al.* Investigation and evaluation of the geo-environment of the Tan-Lu fault zone (Anhui section) [J]. *Geology of Anhui*, 2021, **31**(1): 57-62.
- [28] 王兆荣. 郟庐断裂带温泉水和氩同位素与断裂关系探讨[J]. *矿物岩石地球化学通讯*, 1992, **31**(2): 92-93.
- [29] 上官志冠, 都吉夔, 臧伟, 等. 郟庐断裂及胶辽断块区现代地热流体地球化学[J]. *中国科学(D辑)*, 1998, **28**(1): 23-29.
Shanguang Z G, Du J K, Zang W, *et al.* Modern hot spring geochemistry at the Tanlu fault and Jiaoliao block in eastern China [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 1998, **41**(1): 87-94.
- [30] 陶士振, 刘德良. 郟庐断裂带及邻区地热场特征、温泉形成因素及气体组成[J]. *天然气工业*, 2000, **20**(6): 42-47.
Tao S Z, Liu D L. Geothermal field characteristics of Tanlu fault zone and its neighbouring regions, thermal spring genesis and its gas composition [J]. *Natural Gas Industry*, 2000, **20**(6): 42-47.
- [31] 童颜. 郟庐断裂带安徽段饮用天然矿泉水形成机理与开发利用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.

- Tong Y. Study on formation mechanism, exploitation and utilization of drinking natural mineral water in Anhui Section of Tanlu Fault zone[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [32] 章浩南. 基于GIS的郟庐断裂带安徽段红层地下水水质评价及其空间分布规律研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- Zhang H N. GIS-based red-bed groundwater in the Anhui segment of the Tan-lu fault zone water quality assessment and spatial distribution characteristics [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [33] 卫佳佳. 基于GIS的郟庐断裂带安徽段地下水水质空间分布特征分析与预测[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- Wei J J. Analysis and prediction of spatial distribution characteristics of groundwater quality in Anhui Section of Tan-Lu Fault Zone based on GIS [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [34] 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.
- [35] Wang Y H, Li P Y. Appraisal of shallow groundwater quality with human health risk assessment in different seasons in rural areas of the Guanzhong Plain (China)[J]. Environmental Research, 2022, **207**. doi: 10.1016/j.envres.2021.112210.
- [36] 何锦, 张幼宽, 赵雨晴, 等. 鲜水河断裂带虾拉沱盆地断面地下水水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1236-1244.
- He J, Zhang Y K, Zhao Y Q, et al. Hydrochemical characteristics and possible controls of Groundwater in the Xialatuo Basin Section of the Xianshui River[J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1236-1244.
- [37] 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.
- [38] 涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 等. 珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 1885-1897.
- Tu C L, Yin L H, He C Z, et al. Hydrochemical composition characteristics and control factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River [J]. Environmental Science, 2022, **43**(4): 1885-1897.
- [39] 罗进, 安艳玲, 吴起鑫, 等. 赤水河中下游冬季河水水化学空间分布特征分析[J]. 地球与环境, 2014, **42**(3): 297-305.
- Luo J, An Y L, Wu Q X, et al. Spatial distribution of surface water chemical components in the middle and lower reaches of the Chishui River Basin [J]. Earth and Environment, 2014, **42**(3): 297-305.
- [40] 李晓强, 韩贵琳, 董爱国, 等. 九龙江丰水期水化学组成特征及其控制因素[J]. 生态学杂志, 2018, **37**(3): 697-706.
- Li X Q, Han G L, Dong A G, et al. Hydrogeochemical characteristics and controlling factors in Jiulong river (Fujian Province) during the flood season [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, **37**(3): 697-706.
- [41] 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 等. 新疆喀什三角洲地下水水化学特征及演化规律[J]. 环境科学, 2019, **40**(9): 4042-4051.
- Wei X, Zhou J L, Nai W H, et al. Hydrochemical characteristics and evolution of groundwater in the Kashgar Delta area in Xinjiang [J]. Environmental Science, 2019, **40**(9): 4042-4051.
- [42] Qu S, Duan L M, Shi Z M, et al. Hydrochemical assessments and driving forces of groundwater quality and potential health risks of sulfate in a coalfield, northern Ordos Basin, China [J]. Science of the Total Environment, 2022, **835**. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155519.
- [43] 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.
- [44] Marandi A, Shand P. Groundwater chemistry and the Gibbs Diagram [J]. Applied Geochemistry, 2018, **97**: 209-212.
- [45] 张涛, 何锦, 李敬杰, 等. 蛤蟆通河流域地下水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.
- [46] Tardy Y. Characterization of the principal weathering types by the geochemistry of waters from some European and African crystalline massifs [J]. Chemical Geology, 1971, **7**(4): 253-271.
- [47] 张宏鑫, 吴亚, 罗炜宇, 等. 雷州半岛岭北地区地下水水文地球化学特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 4924-4935.
- Zhang H X, Wu Y, Luo W Y, et al. Hydrogeochemical investigations of groundwater in the Lingbei area, Leizhou Peninsula [J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 4924-4935.
- [48] 郑涛, 焦团理, 胡波, 等. 涡河流域中部地区地下水水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 766-775.
- Zheng T, Jiao T L, Hu B, et al. Hydrochemical characteristics and origin of groundwater in the central Guohe River Basin [J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 766-775.
- [49] 郭小娇, 王慧玮, 石建省, 等. 白洋淀湿地地下水系统水化学变化特征及演化模式[J]. 地质学报, 2022, **96**(2): 656-672.
- Guo X J, Wang H W, Shi J S, et al. Hydrochemical characteristics and evolution pattern of groundwater system in Baiyangdian wetland, North China Plain [J]. Acta Geologica Sinica, 2022, **96**(2): 656-672.
- [50] Liu F, Song X F, Yang L H, et al. Identifying the origin and geochemical evolution of groundwater using hydrochemistry and stable isotopes in the Subei Lake basin, Ordos energy base, Northwestern China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, **19**(1): 551-565.
- [51] Ma B, Jin M G, Liang X, et al. Groundwater mixing and mineralization processes in a mountain-oasis-desert basin, northwest China: hydrogeochemistry and environmental tracer indicators [J]. Hydrogeology Journal, 2018, **26**(1): 233-250.
- [52] Guo Y L, Zhang C, Xiao Q, et al. Hydrogeochemical characteristics of a closed karst groundwater basin in North China [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2020, **325**(2): 365-379.
- [53] 余冲, 徐志方, 刘文景, 等. 韩江流域河水地球化学特征与硅酸盐岩风化——风化过程硫酸作用[J]. 地球与环境, 2017, **45**(4): 390-398.
- Yu C, Xu Z F, Liu W J, et al. River water geochemistry of Hanjiang River, implications for silicate weathering and sulfuric acid participation [J]. Earth and Environment, 2017, **45**(4): 390-398.
- [54] 吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 等. 贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1565-1572.
- Lü J M, An Y L, Wu Q X, et al. Hydrochemical characteristics and sources of Qingshuijiang River basin at wet season in Guizhou Province [J]. Environmental Science, 2015, **36**(5): 1565-1572.
- [55] 吴通航, 刘海燕, 张卫民, 等. 鄱阳湖流域赣江下游水化学特征及人类健康风险评估[J]. 现代地质, 2022, **36**(2): 427-438.
- Wu T H, Liu H Y, Zhang W M, et al. Hydrochemical characteristics and human health risk assessment in downstream Ganjiang river of the Poyang lake basin [J]. Geoscience, 2022, **36**(2): 427-438.
- [56] Wu H W, Wu J L, Li J, et al. Spatial variations of hydrochemistry and stable isotopes in mountainous river water from the Central Asian headwaters of the Tajikistan Pamirs [J]. CATENA, 2020, **193**. doi: 10.1016/j.catena.2020.104639.
- [57] 刘鑫, 向伟, 马小军, 等. 黄土高原中部浅层地下水水化学特征及影响因素[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(11): 5201-5209.
- Liu X, Xiang W, Ma X J, et al. Hydrochemical characteristics and controlling factors of shallow groundwater in the Chinese Loess Plateau [J]. China Environmental Science, 2021, **41**(11): 5201-5209.

CONTENTS

Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Time Series Decomposition	YAO Qing, DING Jing, YANG Xu, <i>et al.</i> (2487)
Ozone Sensitivity Analysis in Urban Beijing Based on Random Forest	ZHOU Hong, WANG Ming, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i> (2497)
Prediction of Ozone Pollution in Sichuan Basin Based on Random Forest Model	YANG Xiao-tong, KANG Ping, WANG An-yi, <i>et al.</i> (2507)
Establishment and Effective Evaluation of Haikou Ozone Concentration Statistical Prediction Model	FU Chuan-bo, LIN Jian-xing, TANG Jia-xiang, <i>et al.</i> (2516)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Ozone Concentration and Health Benefit Assessment in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2015 to 2020	GAO Ran, LI Qin, CHE Fei, <i>et al.</i> (2525)
Water-soluble Inorganic Ion Content of PM _{2.5} and Its Change Characteristics in Urban Area of Beijing in 2022	CHEN Yuan-yuan, CUI Di, ZHAO Ze-xi, <i>et al.</i> (2537)
Pollution Characteristics, Source, and Health Risk Assessment of Metal Elements in PM _{2.5} Between Winter and Spring in Zhengzhou	TAO Jie, YAN Hui-jiao, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (2548)
Characteristics, Sources Apportionment, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs and Their Derivatives Before and After Heating in Zibo City	SUN Gang-li, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i> (2558)
Components Characteristic and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Transition Period of Heating Season in Xi'an with High Time Resolution	LI Meng-jin, ZHANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (2571)
Source and Cause Analysis of High Concentration of Inorganic Aerosol During Two Typical Pollution Processes in Winter over Tianjin	LU Miao-miao, HAN Su-qin, LIU Ke-xin, <i>et al.</i> (2581)
Spatial-temporal Variation and Spatial Differentiation Geographic Detection of PM _{2.5} Concentration in the Shandong Province Based on Spatial Scale Effect	XU Yong, WEI Meng-xin, ZOU Bin, <i>et al.</i> (2596)
Characteristics of VOCs Emissions and Ozone Formation Potential for Typical Chemicals Industry Sources in China	WU Ting, CUI Huan-wen, XIAO Xian-de, <i>et al.</i> (2613)
Formation Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources of Volatile Organic Compounds During an Air Pollution Episode in Autumn, Langfang	ZHANG Jing-qiao, LIU Zheng, DING Wen-wen, <i>et al.</i> (2622)
Scale Effects of Landscape Pattern on Impacts of River Water Quality: A Meta-analysis	WANG Yu-cang, DU Jing-jing, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2631)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter in Inflow Rivers of Baiyangdian Lake Water in Summer Flood Season	MENG Jia-jing, DOU Hong, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (2640)
Analysis on Hydrochemical Evolution of Shallow Groundwater East of Yongding River in Fengtai District, Beijing	HU Yu-xin, ZHOU Rui-jing, SONG Wei, <i>et al.</i> (2651)
Hydrochemical Characteristics, Controlling Factors and Water Quality Evaluation of Shallow Groundwater in Tan-Lu Fault Zone (Anhui Section)	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (2665)
Effects of Pesticides Use on Pesticides Residues and Its Environmental Risk Assessment in Xingkai Lake (China)	WANG Wei-qing, XU Xiong, LIU Quan-zhen, <i>et al.</i> (2678)
Characteristics of Microorganisms and Antibiotic Resistance Genes of the Riparian Soil in the Lanzhou Section of the Yellow River	WEI Cheng-chen, WEI Feng-yi, XIA Hui, <i>et al.</i> (2686)
Analysis of the Spatiotemporal Distribution of Algal Blooms and Its Driving Factors in Chaohu Lake Based on Multi-source Datasets	JIN Xiao-long, DENG Xue-liang, DAI Rui, <i>et al.</i> (2694)
Characteristics of Epiphytic Bacterial Community on Submerged Macrophytes in Water Environment Supplemented with Reclaimed Water	HE Yun, LI Xue-mei, LI Hong-quan, <i>et al.</i> (2707)
Effects of Water Level Fluctuations and Vegetation Restoration on Soil Prokaryotic Microbial Community Structure in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	MEI Yu, HUANG Ping, WANG Peng, <i>et al.</i> (2715)
Bacterial Community Structure of Typical Lake Sediments in Yinchuan City and Its Response to Heavy Metals	MENG Jun-jie, LIU Shuang-yu, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2727)
Effect of Thermal Hydrolysis Pretreatment Time on Microbial Community Structure in Sludge Anaerobic Digestion System	ZHANG Han, ZHANG Han, WANG Jia-wei, <i>et al.</i> (2741)
Source Apportionment of Morphine in Wastewater	SHAO Xue-ting, ZHAO Yue-tong, JIANG Bing, <i>et al.</i> (2748)
Ecological Environment Dynamical Evaluation of Hutuo River Basin Using Remote Sensing	LI Yan-cui, YUAN Jin-guo, LIU Bo-han, <i>et al.</i> (2757)
Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Ecosystem Service Value in the Yellow River Basin	WANG Yi-qi, SUN Xue-ying (2767)
Ecosystem Service Trade-off Synergy Strength and Spatial Pattern Optimization Based on Bayesian Network: A Case Study of the Fenhe River Basin	CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, <i>et al.</i> (2780)
Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau	LI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, <i>et al.</i> (2793)
Spatial-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021	ZHOU Yi-ting, YAN Jun-xia, LIU Ju, <i>et al.</i> (2806)
Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios	CUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, <i>et al.</i> (2817)
Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration	WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, <i>et al.</i> (2828)
Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China	JIANG Ke, JIA Ya-nan, YANG Yan, <i>et al.</i> (2840)
Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses	HUANG Shi-wei, ZHAO Yi-kai, ZHU Xin-yu, <i>et al.</i> (2848)
Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm	HU Zhi-ru, ZHAO Wan-fu, SONG Yin-xian, <i>et al.</i> (2859)
Effects of Application of Different Organic Materials on Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields	SUN Kai, CUI Yu-tao, LI Shun-jin, <i>et al.</i> (2871)
Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity	ZHOU Lian-hao, ZENG Quan-chao, MEI Tang-ying-ze, <i>et al.</i> (2881)
Effects of Controlled-release Blended Fertilizer on Crop Yield and Greenhouse Gas Emissions in Wheat-maize Rotation System	GAO Wei, WANG Xue-xia, XIE Jian-zhi, <i>et al.</i> (2891)
Effect of Biochar on NO ₃ ⁻ -N Transport in Loessial Soil and Its Simulation	BAI Yi-ru, LIU Xu, ZHANG Yu-han, <i>et al.</i> (2905)
Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil in China: A Meta-analysis	YANG Li, BAI Zong-xu, BO Wen-hao, <i>et al.</i> (2913)
Critical Review on Heavy Metal Contamination in Urban Soil and Surface Dust	WANG Xiao-yu, LIU En-feng, YANG Xiang-meng, <i>et al.</i> (2926)
Research Progress on Solidification and MICP Remediation of Soils in Heavy Metal Contaminated Site	CHEN Yue-ru, GAO Wen-yan, CHEN Hong-ren, <i>et al.</i> (2939)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metal in Coal Mine Area near the Yellow River in Shandong	DAI Wen-ting, ZHANG Hui, WU Xia, <i>et al.</i> (2952)
Heavy Metal Content and Risk Assessment of Sediments and Soils in the Juma River Basin	HAN Shuang-bao, YUAN Lei, ZHANG Qiu-xia, <i>et al.</i> (2962)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in the Yellow River Floodplain of Yinchuan City	YU Lu-jia, MA Hai-jun, WANG Cui-ping (2971)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of a City in Guangdong Province Based on Source Oriented and Monte Carlo Models	CHEN Lian, ZOU Zi-hang, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i> (2983)
Chemical Speciation, Influencing Factors, and Regression Model of Heavy Metals in Farmland of Typical Carbonate Area with High Geological Background, Southwest China	TANG Rui-ling, XU Jin-li, LIU Bin, <i>et al.</i> (2995)
Hg Content Characteristics and Safe Planting Zoning of Paddy Soil and Rice in Guizhou Province	WEI Mei-liu, ZHOU Lang, HUANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3005)
Cadmium Phytoremediation Effect of Sweet Sorghum Assisted with Citric Acid on Typical Parent Soil in Southern China	LIU Meng-yu, LUO Xu-feng, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (3016)
Effects of Modified Distillers' Grains Biochar on Cadmium Forms in Purple Soil and Cadmium Uptake by Rice	XIAO Nai-chuan, WANG Zi-fang, YANG Wen-na, <i>et al.</i> (3027)
Effects of Biochar on Growth and Pollutant Accumulation of Lettuce in Soil Co-contaminated with Tetracycline and Copper	ZHENG Chen-ge, PEI Huan-huan, ZHANG Ya-shan, <i>et al.</i> (3037)
Effects of Vermicomposting on Compost Quality and Heavy Metals: A Meta-analysis	JIANG Ji-shao, HOU Rui, CUI Hui-lin, <i>et al.</i> (3047)
Advances in the Effects of Microplastics on Soil N ₂ O Emissions and Nitrogen Transformation	LIU Yi-ge, YANG An-qi, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i> (3059)
Effects of Land Use Patterns on Soil Microplastic Pollution in the Luoshijiang Sub-watershed of Erhai Lake Basin	DAI Liu-yun, HOU Lei, WANG Hua, <i>et al.</i> (3069)
Characteristics of Microplastic Pollution in Sediment of Silty Coast in Culture Bay	SONG Ke-xin, HE Jin-cheng, LI Chang-hua, <i>et al.</i> (3078)
Effect of Polyethylene Microplastics on the Microbial Community of Saline Soils	WANG Zhi-chao, LI Zhe, LI Jia-chen, <i>et al.</i> (3088)
Characterization of Microplastic Surface Bacterial Community Structure and Prediction of Ecological Risk in Poyang Lake, China	YU Jin-li, ZHAO Jun-kai, LUO Si-qi, <i>et al.</i> (3098)
Energy-saving and Emission Reduction Path for Road Traffic in Key Coastal Cities of Guangdong, Fujian and Zhejiang	XU Yi-nuo, WENG Da-wei, WANG Shuo, <i>et al.</i> (3107)
Life Cycle Carbon Reduction Benefits of Electric Heavy-duty Truck to Replace Diesel Heavy-duty Truck	XU Yuan-yuan, GONG De-hong, HUANG Zheng-guang, <i>et al.</i> (3119)