

目次

加速能源转型与产业结构调整的环境健康协同效益评估:以京津冀鲁地区为例	杨玺, 孙奕生, 常世彦, 李胜悦, 郑昊天, 王书肖, 张希良 (3627)
基于不同电力需求的中国减排降碳协同增效路径	向梦宇, 王深, 吕连宏, 张楠, 白梓函 (3637)
城市碳达峰碳中和行动评估方法与应用	张保留, 白梓函, 张楠, 吕连宏, 阳平坚 (3649)
基于可解释性机器学习的城市 O_3 驱动因素挖掘	董佳奇, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 张辉辉, 牛月圆, 段小琳 (3660)
基于响应曲面法的臭氧生成敏感性分析	朱禹寰, 陈冰, 张雅茹, 刘晓, 李光耀, 舍静, 陈强 (3669)
基于 WRF-CMAQ/ISAM 模型的榆林市夏季 O_3 来源解析	王伊凡, 仝纪龙, 陈羽翔, 林鑫, 刘永乐, 敖丛杰, 刘浩天 (3676)
基于轻量级梯度提升机的南京大气臭氧浓度预测	朱珈莹, 安俊琳, 冯悦政, 贺婕, 张玉欣, 王俊秀 (3685)
2022 年广东省冬季一次臭氧污染过程的气象成因及潜在源区分析	李婷苑, 陈靖扬, 龚宇, 沈劲 (3695)
夏季对流层臭氧辐射强迫对华北地区天气和空气质量的影响	杜楠, 陈磊, 廖宏, 朱佳, 李柯 (3705)
气象、本地光化学生成和外围传输对长沙市 2018~2020 年臭氧污染趋势变化影响的识别	杨俊, 杨雷峰, 丁华, 谢丹平, 刘妍妍, 余涛, 吕明, 袁自冰 (3715)
2000~2021 年成渝城市群 $PM_{2.5}$ 时空变化及驱动机制多维探测	徐勇, 郭振东, 郑志威, 戴强玉, 赵纯, 黄雯婷 (3724)
基于 GTWR-XGBoost 模型的四川省 $PM_{2.5}$ 小时浓度估算	吴迪, 杜宁, 王莉, 吴宇宏, 张少磊, 周彬, 张显云 (3738)
2013~2021 年邢台 $PM_{2.5}$ 重污染过程输送和增长特性	江琪, 盛黎, 靳雨晨, 王继康, 尤媛, 王飞 (3749)
基于高分辨率在线观测数据分析上海市城区秋冬季大气有机气溶胶化学特征及污染来源	朱书慧 (3760)
机动车尾气碳质气溶胶排放因子及其稳定碳同位素特征	于鸣媛, 王谦, 付明亮, 戈畅, 谢峰, 曹芳, 章炎麟 (3771)
沈阳工业区夏季 VOCs 组成特征及其对二次污染形成的贡献	关璐, 苏枫枫, 库盈盈, 胡建林, 于兴娜 (3779)
疫情管控期间深圳市城区 VOCs 的变化特征及减排效果评估	云龙, 林楚雄, 李成柳, 邱志诚, 古添发, 李光程, 张明棣, 郭健锋 (3788)
西安市冬季道路扬尘中有机质组成特征及其氧化潜势	王擎雯, 陈庆彩, 王超, 王瑞鹤, 刘国瑞, 李豪, 李艳广 (3797)
淮北孙疃矿区地表尘中多环芳烃类化合物的污染特征及致癌风险评价	徐振鹏, 钱雅慧, 洪秀萍, 罗钟庚, 高秀龙, 梁汉东 (3809)
雄安建设初期白洋淀水质时空差异及其对降雨和土地利用的响应	王子铭, 杨丽虎, 宋献方 (3820)
流域尺度污染溯源模拟-优化防控方法:以铜陵市顺安河流域为例	刘国王辰, 陈磊, 李佳奇, 张钰晨, 赵奕欣, 刘妍琪, 沈珍瑶 (3835)
南昌市浅层地下水水质评价及监测指标优化	郑紫吟, 储小东, 徐金英, 马志飞 (3846)
闪电河流域“三水”氢氧同位素特征及水体转换分析	杨丽娜, 贾德彬, 高瑞忠, 苏文旭, 卢方园, 郝玉胜 (3855)
金沙江丰富类和稀有类浮游真核微生物的分布特征与影响因素	燕炳成, 崔戈, 孙胜浩, 王沛芳, 王超, 吴程, 陈娟 (3864)
嘉陵江不同干扰断面河道沉积物细菌群落多样性	竹兰萍, 张拓, 李佳宁, 王佳颖, 郭伟亮, 徐飞, 张富斌 (3872)
水库水深变化对不同浮游微生物群落及网络互作关键种的影响	王洵, 廖琴, 王沛芳, 袁秋生, 胡斌, 邢小蕾, 徐浩森 (3881)
典型工业区地下水细菌群落多样性特征与环境因子响应初探	吴建强, 张书源, 王敏, 陈敏, 叶文娟, 熊丽君, 黄沈发 (3892)
太湖流域肥料施用策略调整对典型作物系统氮磷流失的影响	俞映倬, 王逸之, 杨根, 杨林章, 段婧婧, 韩雪梅, 薛利红 (3902)
基于机器学习的长江流域农田氮径流流失负荷估算	张有福, 潘哲祺, 陈丁江 (3913)
千岛湖地区上梧溪流域地表径流非点源氮污染分类识别	俞珂, 严璇, 唐张轩, 张方方, 何圣嘉, 姜培坤 (3923)
沱江和涪江水系干支流氮磷营养盐的空间分布特征	李子阳, 周明华, 徐鹏, 陈露, 刘祥龙, 林洪羽, 江南, 任兵, 张博文 (3933)
外秦淮河底泥污染及疏浚效果	张沐, 任增谊, 张曼, 赵琼, 尹洪斌 (3945)
新污染物多环芳烃衍生物的来源、分布与光化学行为	葛林科, 王子宇, 曹胜凯, 车晓佳, 朱超, 张蓬, 马宏瑞 (3957)
镉砷在针铁矿界面共吸附的相互作用机制	苏子贤, 刘赛红, 管玉峰, 陶亮 (3970)
环糊精键合 Fe-TAML 催化剂的制备及其活化 H_2O_2 氧化水中有机微污染物	刘清泉, 蔡本哲, 蔡喜运 (3978)
Co(II) 活化过一硫酸盐降解氨基三甲膦酸的性能及反应机制	朱敬林, 汪舒 (3990)
微塑料诱导下污泥造粒潜能变化及微生物富集特征	谢晴帆, 俞楠, 张妮, 谢周云, 单珂欣, 吴亦馨, 唐力, 夏静芬, 杨国靖 (3997)
中国农田土壤 Cd 累积分布特征及概率风险评价	王静, 魏恒, 潘波 (4006)
渝东南典型地质高背景区土壤重金属来源解析及污染评价	蒋玉莲, 余京, 王锐, 王佳彬, 李瑜, 余飞, 张云逸 (4017)
基于 PMF 模型的农田土壤重金属源暴露风险综合评价:以浙江省某电子垃圾拆解区为例	方嘉, 何影, 黄乃涛, 支裕优, 傅伟军 (4027)
乌鲁木齐市郊农田土壤及农作物中多环芳烃的污染特征及风险评价	范悦, 曹双瑜, 艾力江·努尔拉, 于芸云江·吗米提敏, 阿不都艾尼·阿不里, 谢宣宣, 古丽斯坦·阿不都拉, 刘河疆 (4039)
荒漠绿洲土壤抗生素抗性基因分布特征及驱动机制	黄福义, 周曙仡, 苏建强, 朱永官 (4052)
近 15 年我国土壤抗生素污染特征与生物修复研究进展	赵晓东, 乔青青, 秦宵睿, 李晓晶, 李永涛 (4059)
改性生物炭修复砷镉复合污染土壤研究进展	吕鹏, 李莲芳, 黄晓雅 (4077)
沼液还田对土壤-作物系统重金属累积的影响:Meta 分析	赵奇志, 杨志敏, 孔凡靖, 熊海灵, 朱康文, 陈玉成 (4091)
两种铁改性生物炭对微碱性砷镉污染土壤的修复效果	梁欣冉, 何丹, 郑墨华, 付庆灵, 胡红青, 朱俊 (4100)
秸秆离田对土壤 Cd 生物有效性及水稻 Cd 积累的影响	王子钰, 周航, 周坤华, 谭文韬, 蒋毅, 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4109)
秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质	赵惠丽, 于金艺, 刘涛, 王丽, 赵英 (4119)
基于环境 DNA 的复合污染土壤生物评价和胁迫诊断	黄湘云, 钟文军, 刘训杰, 毕婉娟, 钱林皓, 张效伟 (4130)
地质高背景区土壤-玉米重金属综合质量评价	张传华, 王钟书, 张力, 刘燕 (4142)
浙江省蔬菜生产系统重金属污染生态健康风险	张述敏, 刘翠玲, 杨桂玲, 邓美华 (4151)
生物炭配施磷肥对土壤养分、酶活性及紫花苜蓿养分吸收的影响	刘鑫裕, 王冬梅, 张泽洲, 张鹏, 樊桐桐 (4162)
低密度聚乙烯微塑料对空心菜生长和生理特征的影响	周颖, 蒋文婷, 刘训悦, 朱高荻, 唐荣贵, 章海波, 蔡延江 (4170)
沼液施用对麦茬口期土壤微生物群落结构特征及功能的影响	乔宇颖, 奚辉, 李娜, 陈喜靖, 沈阿林, 喻曼 (4179)
大同铅锌尾矿不同污染程度土壤细菌群落分析及生态功能特征	刘泽勋, 庄家尧, 刘超, 郑康, 陈玲 (4191)
马尾松采伐迹地火烧黑炭对土壤有机碳组分和碳转化酶活性的影响	姚智, 焦鹏宇, 吴晓生, 严强, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (4201)
《环境科学》征订启事(3648)	
《环境科学》征稿简则(3659)	
信息	(3714, 4150, 4178)

南昌市浅层地下水水质评价及监测指标优化

郑紫吟¹, 储小东^{1,2}, 徐金英¹, 马志飞^{1*}

(1. 南昌大学资源与环境学院, 鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 南昌 330031; 2. 江西省地质调查勘查院地质环境监测所, 南昌 330006)

摘要: 地下水环境监测过程中保证地下水水质评价代表性的同时尽量优化监测指标数量, 对地下水环境管理具有重要的意义。选取南昌市地区 2014 年和 2019 年浅层地下水监测数据, 运用统计分析、Piper 三线图和熵权水质指数 (EWQI) 分析水化学特征及水质变化, 并耦合逐步多元线性回归分析构建基于水质评价的关键指标优化方法, 评估此方法应用的可行性。结果表明, 南昌市地下水 2014 年和 2019 年水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型; pH 值、 NO_3^- 、 I^- 、Fe 和 Mn 等 5 项超标指标是水质变化的主要影响因子; 2019 年水质状况总体上高于 2014 年, 基本为“中等”水质, 二者 EWQI 平均值分别为 53.72 和 82.34; 基于关键指标优化方法构建的最优模型 $\text{EWQI}_{\text{min-4}}$ 能够较好地代表实际的 EWQI, 关键指标包括 Mn、 NO_3^- 、TH、Fe、pH 值和 I^- , 其决定系数 (R^2) 和百分比误差 (PE) 值分别为 0.865 和 10.61%。因此, 基于熵权水质指数构建的地下水监测指标优化方法可作为优化指标重要参考, 为区域地下水环境管理提供技术方法。

关键词: 地下水水质; 熵权水质指数 (EWQI); 逐步多元线性回归; 关键指标; 优化方法

中图分类号: X523; X824 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)07-3846-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202208006

Evaluation of Shallow Groundwater Quality and Optimization of Monitoring Indicators in Nanchang

ZHENG Zi-yin¹, CHU Xiao-dong^{1,2}, XU Jin-ying¹, MA Zhi-fei^{1*}

(1. Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resource Utilization, Ministry of Education, School of Resources & Environment, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Geological Environment Monitoring Institute of Jiangxi Geological Survey and Exploration Institute, Nanchang 330006, China)

Abstract: In the process of groundwater environmental monitoring, while ensuring the representativeness of groundwater quality evaluation, the number of monitoring indicators should be optimized as much as possible, which is of great significance to groundwater environmental management. Based on monitoring data of shallow groundwater in Nanchang in 2014 and 2019, the chemical characteristics of water and the changes in water quality were analyzed via statistical analysis, a Piper three-line diagram, and the entropy-weighted water quality index (EWQI). Furthermore, a key indicator optimization method based on water quality evaluation was constructed by coupling stepwise multiple linear regression analysis. The feasibility of this method was also evaluated. The results showed that the water chemistry type of groundwater in 2014 and 2019 was mainly $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, and the five abnormal indicators pH value, NO_3^- , I^- , Fe, and Mn were the main influencing factors of water quality change. The water quality in 2019 was generally higher than that in 2014, which was considered as overall “moderate,” and the average EWQI values of the two years were 53.72 and 82.34, respectively. The optimal model $\text{EWQI}_{\text{min-4}}$ constructed based on the key indicator optimization method could better represent the actual EWQI; the key indicators included Mn, NO_3^- , TH, Fe, pH value, and I^- ; and the determination coefficient (R^2) and percentage error (PE) values were 0.865 and 10.61%, respectively. Therefore, the optimization method of groundwater monitoring indicators based on entropy-weighted water quality evaluation could be used as an important reference for optimizing monitoring indicators and provide a method for regional groundwater environmental management.

Key words: groundwater quality; entropy-water quality index (EWQI); stepwise multiple linear regression; key indicators; optimization method

地下水是维持生态稳定、确保人类生活用水和支持经济稳定发展的基础之一^[1,2]。然而,随着全球人口增加、城市快速扩张和工业化进程加快,地下水水质问题是区域发展面临的重要问题之一,制约了社会经济的可持续发展,且人为因素已成为地下水环境演变的主要驱动因素^[3~5]。因此,开展地下水水质评价对于地下水污染防治至关重要,然而评价方法的选择及监测指标数量优化对于准确进行水质评价至关重要^[6]。

目前,地下水水质评价方法已开展了大量的研究^[7],常用方法主要有模糊综合评价法^[8]、灰色聚类法^[9]、人工神经网络法^[10]和水质综合指数法^[11,12]等。相比其他方法,水质综合指数法 (WQI) 是以多种水质指标综合的无量纲数,可综合反映水

环境质量状况,已被广泛用于水环境质量评价^[13,14]。熵权水质指数 (EWQI) 是利用信息熵为水质参数分配权重,有效避免 WQI 评价指标权重计算过程中人为因素影响^[15~17]。因此,基于 EWQI 主要是通过计算 EWQI 值、空间插值和地学统计方法评价区域地下水水质及其变化规律,发现 EWQI 能够较真实地反映出区域地下水水质情况^[18,19]。如 Li 等^[20]利用熵权水质指数评价结果与空间插值方法联用,更直观和全面地了解华北平原东南部地下水

收稿日期: 2022-08-01; 修订日期: 2022-09-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41907168); 江西省地下水重要考核指标环境背景值调查及重点地区地下水监测管控体系建设项目 (Z155110010004-50502)

作者简介: 郑紫吟 (1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为地下水水质评价优化, E-mail: 17879319613@163.com

* 通信作者, E-mail: groundwater308b@126.com

水质状况;同时,研究人员基于 EWQI 值采用空间自相关指数和数理统计方法准确地解释了区域地下水质量及空间变异性^[21,22].通常情况下,指标数量越多 WQI 值越能真实地反映出区域地下水水质,但过多的指标增加地下水环境监测工作难度及成本.目前,基于地表水关键水质指标建立的最小水质指数,能较好代表 WQI 变化,有利于降低监测成本,已应用于优化地表水水质指标^[23~25],但采用熵权水质指数方法构建适用于地下水监测指标优化研究鲜见报道.

南昌市是国家生态文明试验区的典型示范城市,近年来对区域地下水环境监测管理提出了更高的要求,同时作为鄱阳湖流域经济发展快速的城市,南昌市地下水水质已受到污染^[26~28].因此,本文选取南昌市地区浅层孔隙水作为研究对象,在分析研究区地下水水化学特征基础上,采用熵权水质指数法对比分析南昌市地下水水质变化,同时采用逐步多元线性回归分析与 EWQI 联用,构建地下水监测指标优化方法,探索影响水质关键污染因子,建立最小熵权水质指数($EWQI_{min}$),以最合理的监测指标数量,寻找一个经济平衡点,降低监测成本,以获得最大的地下水环境信息量,以期为区域地下水水质评价和监测提供方法依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

南昌市($115^{\circ}27' \sim 116^{\circ}35'E$, $28^{\circ}10' \sim 29^{\circ}11'N$)地处江西省中部偏北地区,土地面积约7000 km²,位于赣江和抚河下游,濒临中国最大的淡水湖鄱阳湖.整个地势西北高东南低,主要由35.8%的平原、29.8%的水域、34.4%的丘陵和低丘组成^[29].南昌市属亚热带湿润季风气候,年降水量1600~1700 mm,年降水日数147~157 d,年暴雨日数5.6 d,年平均相对湿度78.5%;年日照时数1723~1820 h,日照率40%,年无霜期251~272 d.研究区地下水类型主要为松散岩类孔隙水,由全新统、上更新统和中更新统冲积砂及砂砾石层组成,分布于赣江和抚河河谷平原区,含水层厚度一般范围为10.0~28.0 m,平均厚度为15.2 m,渗透系数为4~160.9 m·d⁻¹,区域含水层富水性好,水量丰富;该含水层补给来源有河水侧向补给,大气降水垂向补给,排泄方式以人工开采和补给河流为主^[30],受人工开采地下水的影响,研究区内地下水以南钢为中心形成降落漏斗,漏斗中心区沿西北-东南方向呈不规则的椭圆状展布.另外,由于研究区内大部地势平坦,地水径流速度较缓,地表地下水交互

频繁,且自净能力较差,使得浅层地下水的水质易受人为活动影响^[31].

1.2 样品采集及分析测试

2014年和2019年对南昌市浅层地下水进行取样分析,其中2014年共采集样品76组,取样井为乡村饮用水井和压水井,井深一般介于4~32 m之间;2019年共采集地下水样品159组,其中压水井68组,监测井42组,其余部分为机井和大口井,取水深度大多小于40 m.采样时通过便携式GPS设备记录采样点的位置(图1);在收集水样之前,用水样清洗容器3~4次,将每个水样储存在2.5 L白色聚乙烯瓶中用于理化分析,并使用0.5 L聚乙烯瓶用于收集水样进行金属分析,用几滴浓HNO₃处理0.5 L瓶中的样品,以减少化学变化、吸附和沉淀,并保持金属离子溶解在水溶液中^[32].收集后,将瓶子密封,贴上标签,并立即运送到实验室.物理化学指标如pH值、电子电导率(EC)和氧化还原电位(Eh)使用多参数水质分析仪(Hach DR900)进行现场检测.总硬度(TH)使用乙二胺四乙酸二钠滴定法测定,总溶解固体(TDS)通过重量法(105℃)测定.Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、总铁(Fe)和总锰(Mn)浓度采用电感耦合等离子体发射光谱法测量,HCO₃⁻和CO₃²⁻浓度使用滴定法确定,NO₃⁻、Cl⁻和SO₄²⁻浓度采用离子色谱法测定.采样方法、采样程序、样品保存和分析均按照国家地下水水质标准方法进行^[33].

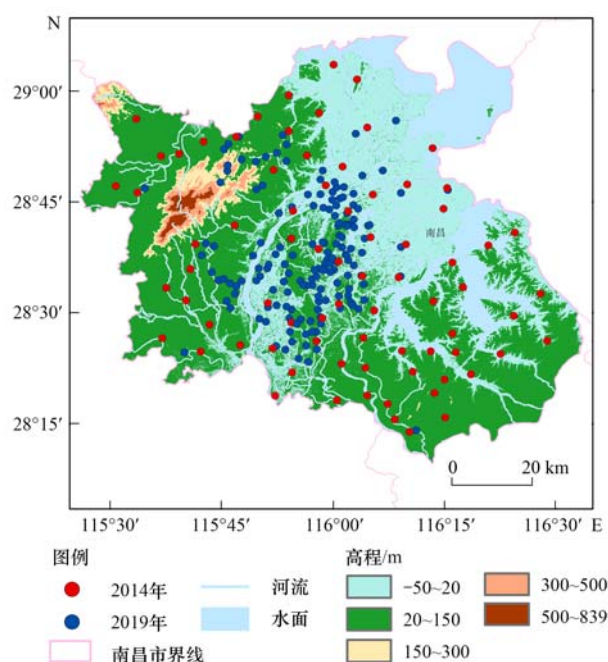


图1 南昌市地下水采样点位置示意

Fig. 1 Location of groundwater sampling sites in Nanchang

1.3 数据处理方法

1.3.1 熵权水质指数

熵权水质指数可作为分析研究区地下水的水质

分布情况方法^[34~36],EWQI 方法的思路是通过信息熵(e_j)确定水化学指标的权重(w_j),并将大量的水质数据转化为反映水质状况的代表性数值^[37].EWQI 的计算过程非常复杂,需要遵循以下 5 个步骤.

(1) 建立初始水质矩阵

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{X}$ 为初始数据矩阵, m 为地下水样本数量, n 为水化学指标.

(2) 标准化数据

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \in (0,1) \quad (2)$$

$$p_{ij} = \frac{1 + y_{ij}}{\sum_{i=1}^m (1 + y_{ij})} \in (0,1) \quad (3)$$

式中, x_{ij} 为第 i 个水样的第 j 个水化学指标的原始值, $\max(x_j)$ 和 $\min(x_j)$ 分别为初始矩阵中第 j 个水化学指标的最大值和最小值.一般来说,初始水质数据中的水化学指标在量级和维度上差异很大,计算出的权重也有很大差异.因此,有必要对初始水质数据进行标准化.

(3) 确定权重

$$e_j = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (4)$$

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n 1 - e_j} \in (0,1) \quad (5)$$

式中, e_j 为第 j 个水化学指标的信息熵, w_j 为第 j 个水化学指标的熵权. e_j 越小,对水化学指标和 w_j 的影响越大;当 w_j 大于 0.1,则为地下水质量的主要因素, w_j 越高,影响越大.

(4) 确定分级的量化标准

$$q_{ij} = \begin{cases} (c_{ij}/s_j) \times 100 \\ |(c_{ipH} - 7)/(8.5 - 7) \times 100| \end{cases} \quad (6)$$

式中, c_{ij} 为第 i 个样本中测量的第 j 个指标, s_j 为中国地下水水质标准的第 j 个指标(pH 除外)的标准允许值, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.pH 的限值为 6.5~8.5,该表达式确保在 pH=7 时 q_{pH} 为 0.

(5) 熵加权水质指数计算

$$\text{EWQI}_i = \sum_{j=1}^n w_j q_{ij} \quad (7)$$

根据计算的 EWQI 值,研究区地下水水质可分为“极差”到“极好”之间 5 个等级.

1.3.2 地下水监测指标优化方法构建

为了掌握影响南昌市地下水 EWQI 值的关键指标,并建立 EWQI_{min} 模型,对 2019 年的水质监测数据采用逐步多元线性回归分析来筛选出影响 EWQI 的基础指标和补充指标.逐步多元线性回归能够根据方差贡献计算和共线性验证确定有效曲线,从而建立拟合优化模型.基于线性回归分析结果选择 EWQI_{min} 中使用的指标,计算 EWQI_{min} 值,计算方法同式(1)~(7)EWQI 的计算方式相同,其水质的归一化值和权重选取与 EWQI 相同,详细流程见图 2.再分别采用决定系数(R^2)和百分比误差(PE)来评价模型的拟合优度和预测能力,建立最优 EWQI_{min} 模型.其中 PE 值越接近 0,表示模拟的精度越高.

$$\text{PE} = \sum \left| \frac{P}{O} - 1 \right| \times 100/n \quad (8)$$

式中, P 为基于所选指标的 EWQI_{min} 值, O 为基于所有指标的 EWQI 值.

EWQI_{min} 最优模型建立之后,可用 2014 年的水质监测数据($n=76$)对模型进行验证,判断该模型是否对研究区域具有普遍适用性.

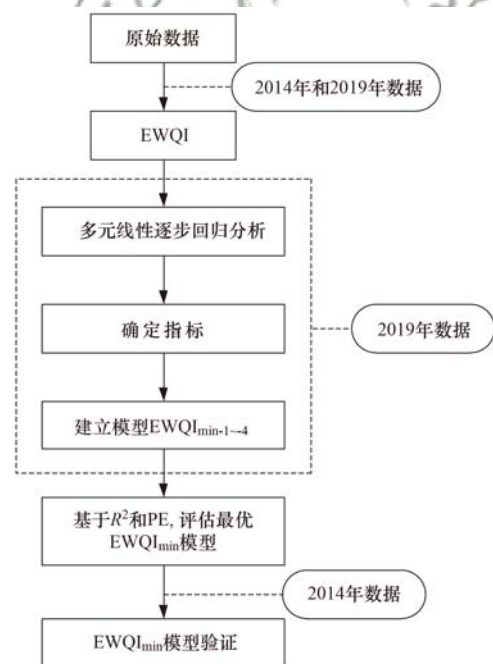


图2 EWQI_{min} 模型流程

Fig. 2 EWQI_{min} model flow

2 结果与讨论

2.1 地下水水化学特征分析

结合研究区浅层地下水监测指标检出率情况,选取 2014 年和 2019 年 16 个水质指标进行描述性统计分析研究区地下水水化学特征变化,结果见表 1.2014 年和 2019 年研究区地下水普遍呈弱酸性,pH 值超标率分别为 30.19% 和 56.60%;2014 年和 2019 年水样 TDS 变化范围分别为 18.00~656

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $18.00\sim524.15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TH 分别为 $0.75\sim266.12\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $6.20\sim318.11\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均以软淡水类型为主;其中除 NO_3^- 和 I^- 外,其他主要指标均未超过《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)Ⅲ类限值.另外,由图3可知2014年和2019年研究区地下水主要阳离子是 Ca^{2+} ,主要阴离子是 HCO_3^- ,表明2014年水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型,其次是 $\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$ 型,2019年则主要是 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型,其次是 Cl-Ca-Mg 型.

2014年和2019年研究区地下水 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 最大值分别为 $139.58\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $144.56\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值分别为 $25.19\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $27.07\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,超标率分别为20.75%和3.40%.有研究表明地下水受到人类活动影响时,其浓度通常高于 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [38,39].因此,研究区内地下水已受到人类活动影响,可能与区域内农业肥料、工业废水和生活污水等人为活动有

关[40~43],并且人类活动对地下水的硝酸盐影响加剧.2014年和2019年地下水中 $\rho(\text{Fe})$ 平均值分别为 $0.66\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.22\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,超标率分别为11.32%和0.63%; $\rho(\text{Mn})$ 平均值分别为 $0.30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.38\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,超标率分别为16.98%和33.96%;Mn的超标率普遍高于Fe的超标率,且分布范围更广,更普遍.研究区内地下水出现高Fe和Mn现象,可能由于研究区内人类活动加剧红壤中铁和锰释放输入造成[44].此外,变异系数(CV)通常能够反映一个指标的区域尺度内的稳定程度[45].2014年和2019年样品pH值的变异系数和标准偏差非常小,表明pH值的离散程度低,总体上分布均匀; $\text{K}^+、\text{NO}_3^-、\text{SO}_4^{2-}、\text{I}^-、\text{Fe}$ 和Mn的变异系数普遍偏大,进一步表明工业和农业活动的点污染和扩散污染等是造成以上指标稳定性差的主要因素.

表1 地下水指标浓度的描述性统计¹⁾

Table 1 Descriptive statistics of groundwater parameter concentration

因子	2014年(n=76)							2019年(n=159)							标准限值
	最小值	最大值	平均值	标准差	中位数	变异系数	超标率	最小值	最大值	平均值	标准差	中位数	变异系数	超标率	
pH	4.55	7.38	6.27	0.48	6.32	7.72	30.19	5.03	9.14	6.47	0.64	6.41	9.91	56.60	6.5~8.5
TH	0.75	266.12	93.68	64.42	72.36	68.77	0	6.20	318.11	95.36	61.60	86.00	64.59	0	450
TDS	18.00	656.00	188.66	123.08	157.00	65.24	0	18.00	524.15	172.69	97.88	152.00	56.68	0	1000
Ca^{2+}	—	68.82	23.64	17.12	18.46	73.32	/	1.10	80.15	22.55	16.78	18.30	74.39	/	/
Na^+	2.62	132.72	20.85	18.64	15.81	89.42	0	2.47	60.60	15.45	10.33	12.30	66.89	0	200
Mg^{2+}	0.15	29.84	8.20	6.35	6.81	77.47	/	0.77	32.20	9.42	6.40	8.20	67.94	/	/
K^+	0.42	107.70	8.41	15.86	3.75	188.69	/	0.19	79.00	6.72	10.16	2.85	151.22	/	/
HCO_3^-	24.83	288.62	94.25	63.98	71.38	67.89	/	5.51	360.00	76.15	57.78	59.60	75.87	/	/
NO_3^-	—	139.58	25.19	26.46	16.69	105.06	1.89	—	144.56	27.07	29.57	16.30	109.21	4.40	20
SO_4^{2-}	1.59	201.55	22.33	30.38	10.61	136.06	0	0.04	147.95	24.97	23.35	19.00	93.53	0	250
Cl^-	1.50	89.56	22.45	19.39	15.15	86.35	0	0.41	80.50	19.77	15.46	16.50	78.20	0	250
F^-	0.034	0.71	0.18	0.11	0.17	59.83	0	—	0.66	0.10	0.13	0.045	123.52	0	1
I^-	0.003	0.63	0.040	0.089	0.010	222.80	6.29	0.0006	0.17	0.019	0.023	0.012	118.99	3.14	0.08
Fe	—	18.70	0.66	2.46	0.070	372.38	11.32	—	30.1	0.22	2.38	0.02	1075.08	0.63	0.3
Mn	—	3.12	0.30	0.65	0.01	214.54	16.98	0.0002	8.34	0.38	0.97	0.011	255.40	33.96	0.1

1)pH无量纲,其余指标单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,变异系数和超标率单位为%;标准限值参照《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)Ⅲ类限值;“—”表示未检出,“/”表示在参照标准《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)中无相应限值要求

2.2 研究区地下水水质状况

考虑到 $\text{K}^+、\text{Ca}^{2+}、\text{Mg}^{2+}$ 和 HCO_3^- 没有对应的地下水质量标准限值,故选取11个地下水指标采用熵权水质指数对南昌市地下水水质进行评价,以掌握地下水水质变化情况.通常情况下,当指标的熵权重(w_j)大于0.1,表明该指标为地下水水质的主要影响因素[46].由表2可知,2014年 $\text{NO}_3^-、\text{Cl}^-$ 和TH这3个指标权重大于0.1;2019年 $\text{NO}_3^-、\text{Cl}^-、\text{TH}、\text{F}^-$ 和TDS这5个指标权重大于0.1, NO_3^- 的权重最大,表明随着时间变化区域内浅层地下水水质主要影响因素存在一定的差异.通过公式(1)~(7)计算

得到EWQI值(见图4),2014年和2019年研究区地下水EWQI值范围分别在 $7.97\sim507.41$ 和 $8.57\sim462.09$,平均值分别为82.34和53.72,总体水质都为“中等”.在2014年,28.95%的水样为优,34.21%为良好,15.79%为中等,5.26%为差,15.79%为极差;2019年水样中优37.11%,良30.82%,中等20.13%,差5.03%,极差6.92%.2014~2019年,地下水水质良好、差和极差的占比减少,优和中等的占比增加,表明研究区内地下水水质整体上得到一定改善.

为了分析地下水指标对EWQI的影响,对这11

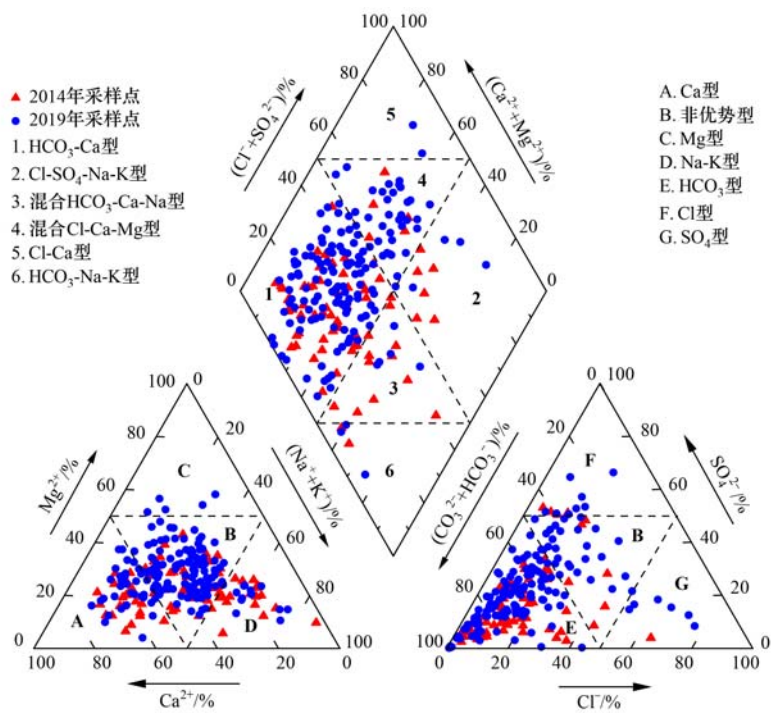


图3 南昌市浅层地下水 Piper 三线图
Fig. 3 Ternary diagrams for ions in shallow groundwater in Nanchang

表2 信息熵和指标的熵权

Table 2 Information entropy and entropy weight of parameters

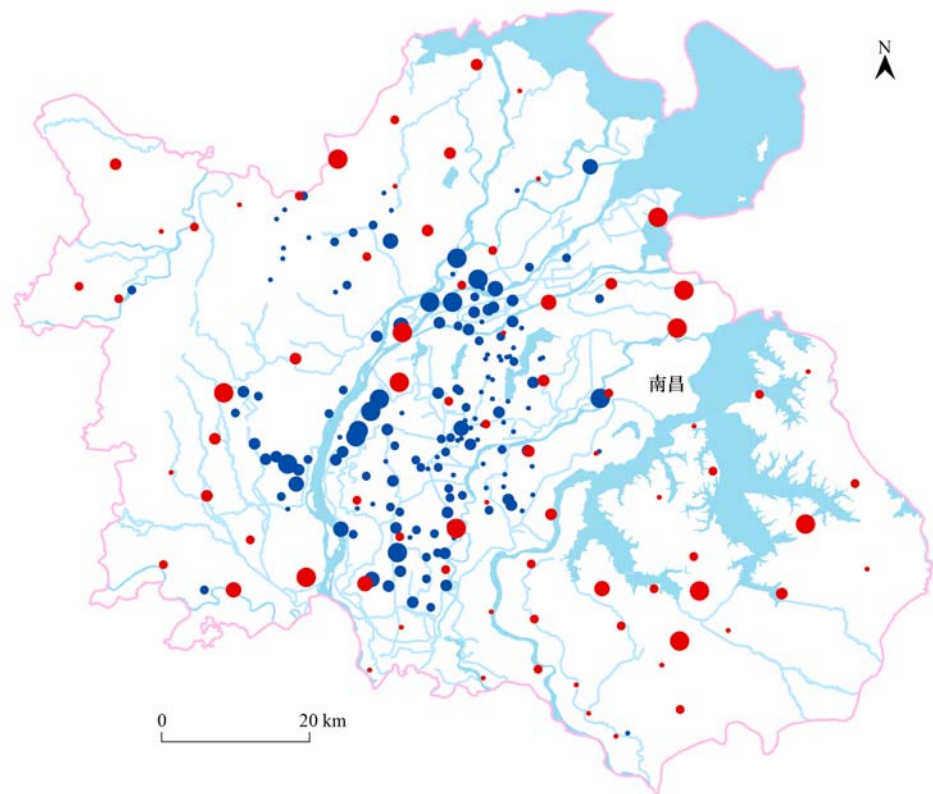
指标	年份	pH	Na ⁺	I ⁻	F ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	TH	TDS	Fe	Mn
信息熵 (<i>e_f</i>)	2014	0.998 6	0.998 4	0.998 2	0.998 2	0.997 3	0.998 1	0.996 6	0.996 4	0.997 5	0.998 5	0.996 4
	2019	0.998 7	0.998 1	0.998 7	0.997 4	0.997 3	0.998 3	0.997 8	0.997 8	0.997 9	0.999 5	0.998 9
熵权 (<i>w_f</i>)	2014	0.052 2	0.063 6	0.068 4	0.071 0	0.104 4	0.074 9	0.131 6	0.138 3	0.098 3	0.058 9	0.138 2
	2019	0.065 5	0.098 6	0.065 4	0.133 2	0.138 9	0.085 9	0.114 7	0.114 2	0.105 6	0.024 1	0.053 9

个指标与EWQI进行了Pearson相关分析,结果如图5所示.2014年和2019年pH值、I⁻、F⁻、Fe和Mn这5项指标与各指标的相关性系数最大值未超过0.5,与各指标相关性较弱.这说明pH值、I⁻、F⁻、Fe和Mn是本研究所选11个指标中相对独立的影响因素,可从不同方面反映地下水环境质量状况可行性.2014年和2019年Na⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻、TH和TDS之间相关系数大部分均在0.5以上,说明各指标相关性较高,存在信息重叠,其中NO₃⁻和Cl⁻呈中度正相关,表明硝酸盐和氯化物的来源在一定程度上相同,可能来自生活污水和垃圾渗滤液等^[47,48].同时,Na⁺、SO₄²⁻、TH和TDS的显著相关性指示了高离子浓度地下水的地质风化和水文地球化学演化,并可能与人类活动有关^[49].2014年Na⁺、I⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻、TH、TDS、Fe和Mn与EWQI呈显著相关性,对比2014年,2019年的I⁻、NO₃⁻、Cl⁻、TH、TDS、Fe和Mn始终与EWQI呈显著相关性.其中Mn与EWQI呈强正相关,这些离子都与人类活动的溶质输入密切相关,表明研究区地下水的水质已受到研究区内工业废水、生活污水和

农业活动等人类活动的影响.

2.3 研究区地下水监测指标优化

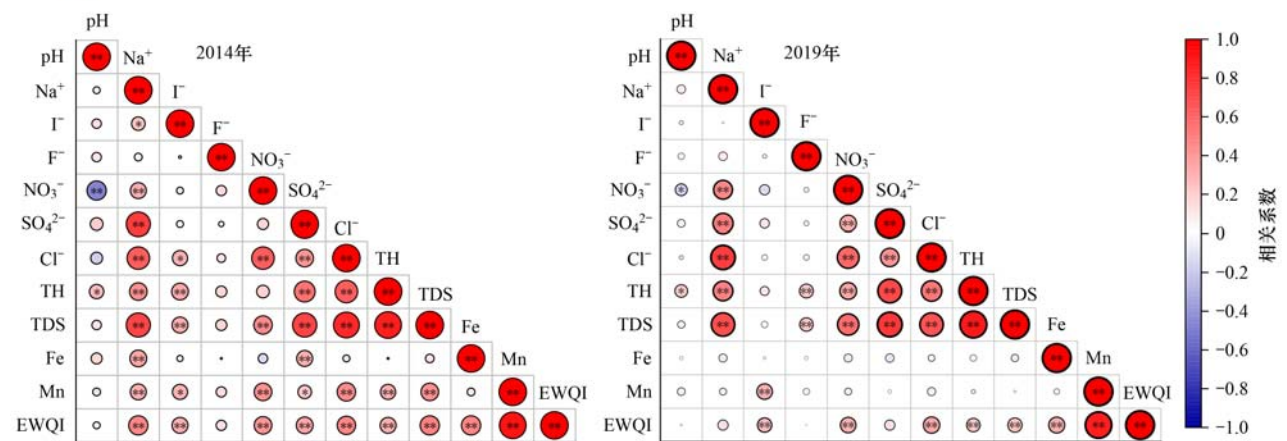
通过对2019年的11个水质指标与EWQI进行逐步多元线性回归(见表3),发现Mn对EWQI值的贡献最大(模型1, $R^2 = 0.433$),随后依次增加NO₃⁻、TH和Fe,显著增加了回归模型的 R^2 值,分别为0.755、0.808和0.850(模型2~4).此外,pH和I⁻的加入也略微提高了模型的性能.因此,选择Mn、NO₃⁻、TH和Fe指标作为评估该研究区地下水水质的基本指标建立优化模型EWQI_{min}.此外,考虑到评估pH和I⁻对EWQI_{min}模型性能的影响,分别建立4个优化模型EWQI_{min-1}、EWQI_{min-2}、EWQI_{min-3}和EWQI_{min-4}(见表4),并通过 R^2 和PE来比较模型的拟合优度和预测能力,从而判断模型的可行性.结果表明,模型EWQI_{min-2}和EWQI_{min-4}相较于模型EWQI_{min-1}和EWQI_{min-3}具有更低的PE值,更高的 R^2 值,与EWQI呈密切的相关性(图6和表4).所有模型中,模型EWQI_{min-4}模拟精度最高(PE = 10.61%),预测性能最优($R^2 = 0.865$),更适合代表研究区地下水的EWQI值.为了更好地验证模型的准确性,同



值范围	水质	2014年(n=76)			2019年(n=159)		
		点位	样本数量/组	占比/%	点位	样本数量/组	占比/%
EWQI<25	优秀	•	22	28.95	•	59	37.11
25≤EWQI<50	良好	•	26	34.21	•	49	30.82
50≤EWQI<100	中等	•	12	15.79	•	32	20.13
100≤EWQI<150	差	•	4	5.26	•	8	5.03
EWQI≥150	极差	•	12	15.79	•	11	6.92

图 4 南昌地区 EWQI 空间分布格局

Fig. 4 Spatial distribution pattern of EWQI in Nanchang



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

图 5 2014 年和 2019 年研究区地下水不同水质指标与 EWQI 的相关性

Fig. 5 Correlations between different groundwater quality indicators and the EWQI in the study area in 2014 and 2019

时考虑到 2014 年地下水点位与 2019 年差异性,以 2014 年水质数据验证 $EWQI_{min-4}$ 更具有代表性. 由图 7 可知, $EWQI_{min-4}$ 模型与 2014 年 EWQI 具有显著且密切的相关性 ($P < 0.001$), 其中 R^2 值和 PE 值分别为 0.934 和 6.86%, 表明前者能较好地反映 2014 年真实的 EWQI. 因此, 包含 Mn、 NO_3^- 、TH、Fe、pH 值和 I^- 这 6 个关键水质指标的 $EWQI_{min-4}$ 模型为研究区最佳的 $EWQI_{min}$ 模型, 其表现出较好的水质评价性能, 以上优化指标可作为研究区地下水水质监测及评价主要参考指标.

表 3 逐步多元线性回归结果

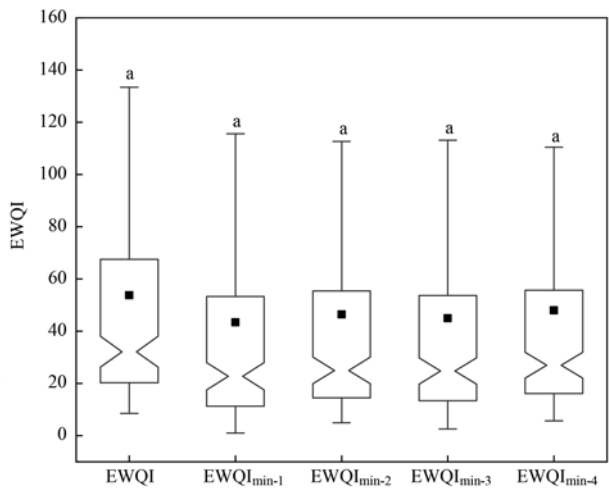
Table 3 Stepwise multiple linear regression results

模型	线性模型	R^2	P
1	$EWQI = 1.488 + 0.024Mn$	0.433	<0.001
2	$EWQI = 1.300 + 0.025Mn + 0.135NO_3^-$	0.755	<0.001
3	$EWQI = 1.190 + 0.025Mn + 0.113NO_3^- + 0.633TH$	0.808	<0.001
4	$EWQI = 1.187 + 0.024Mn + 0.119NO_3^- + 0.587TH + 0.009Fe$	0.850	<0.001
5	$EWQI = 1.103 + 0.024Mn + 0.108NO_3^- + 0.701TH + 0.009Fe + 0.158pH$	0.866	<0.001
6	$EWQI = 1.084 + 0.023Mn + 0.111NO_3^- + 0.668TH + 0.009Fe + 0.158pH + 0.100I^-$	0.871	<0.001

表 4 $EWQI_{min}$ 模型指标选择结果

Table 4 Parameter selection results of the $EWQI_{min}$ model

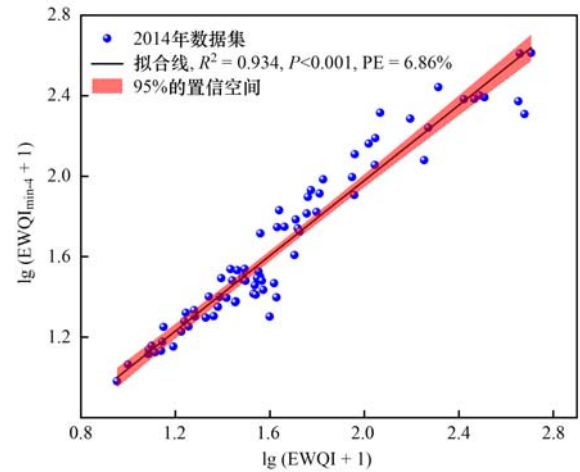
模型	指标	R^2	P	PE/%
$EWQI_{min-1}$	Mn、 NO_3^- 、TH 和 Fe	0.838	<0.001	19.23
$EWQI_{min-2}$	Mn、 NO_3^- 、TH、Fe 和 pH	0.853	<0.001	13.52
$EWQI_{min-3}$	Mn、 NO_3^- 、TH、Fe 和 I^-	0.847	<0.001	16.32
$EWQI_{min-4}$	Mn、 NO_3^- 、TH、Fe、pH 和 I^-	0.865	<0.001	10.61



相同小写字母表示差异不显著

图 6 $EWQI$ 和各 $EWQI_{min}$ 模型值比较

Fig. 6 Comparison of $EWQI$ and $EWQI_{min}$ model values



基于 2014 年数据集并考虑以下指标:

Mn、 NO_3^- 、TH、Fe、pH 值和 I^-

图 7 $EWQI$ 与 $EWQI_{min-4}$ 之间的关系

Fig. 7 Relationship between $EWQI$ and $EWQI_{min-4}$

3 结论

(1) 南昌市地下水普遍呈弱酸性, 以软淡水类型为主, 2014 年水化学类型主要为 HCO_3^- -Ca 型, 其次是 HCO_3^- -Ca-Na 型, 2019 年则主要是 HCO_3^- -Ca 型, 其次是 Cl-Ca-Mg 型; 对比 2014 年, 2019 年研究区内地下水硝酸盐超标率较大, 铁和锰含量均出现较高异常值, 主要是因研究区内人类活动和地质条件变化导致。

(2) 2014 年和 2019 年地下水样品的 $EWQI$ 值分别在 7.97 ~ 507.41 和 8.57 ~ 462.09 之间, 平均值分别为 82.34 和 53.72, 总体水质都为“中等”; 2014 ~ 2019 年, 地下水水质良好、差和极差的占比减少, 优和中等的占比增加, 区域内浅层地下水水质整体得到一定改善。

(3) 基于地下水水质数据构建的 $EWQI_{min}$ 模型主要包括关键指标为 Mn、 NO_3^- 、TH、Fe、pH 值和 I^- , 其表现出较好的水质评价性能, 以上优化指标可作为研究区地下水水质监测及评价主要参考指标。 $EWQI_{min}$ 的建立有利于当地的水资源管理, 包括水质评估和水质控制相关政策的制定, 并为相关研究筛选关键水质指标和快速评估水质提供了参考。

参考文献:

[1] Liu J T, Gao Z J, Wang Z Y, *et al.* Hydrogeochemical processes and suitability assessment of groundwater in the Jiaodong Peninsula, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, **192**(6), doi: 10.1007/s10661-020-08356-5.

[2] 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.
- [3] Qian H, Chen J, Howard K W F. Assessing groundwater pollution and potential remediation processes in a multi-layer aquifer system[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114669.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 郇环, 廉新颖, 杨昱, 等. 基于级别差法的地下水水质评价方法筛选技术研究[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(2): 402-410.
Huan H, Lian X Y, Yang Y, *et al.* Screening method for groundwater quality assessment based on level difference method[J]. *Environmental Science*, 2020, **33**(2): 402-410.
- [7] 雷正国, 陶月赞. 地下水水源地水质评价方法探讨[J]. *节水灌溉*, 2019, (8): 80-83, 89.
Lei Z G, Tao Y Z. Discussion on water quality assessment method for groundwater source[J]. *Water Saving Irrigation*, 2019, (8): 80-83, 89.
- [8] 薛伟锋, 褚莹倩, 吕莹, 等. 基于主成分分析和模糊综合评价的地下水水质评价——以大连市为例[J]. *环境保护科学*, 2020, **46**(5): 87-92.
Xue W F, Chu Y Q, Lyu Y, *et al.* Groundwater quality assessment based on principal component analysis and fuzzy comprehensive evaluation——taking Dalian as an example[J]. *Environmental Protection Science*, 2020, **46**(5): 87-92.
- [9] 董颖, 李兢, 武宏梅, 等. 基于级别特征值的灰色聚类法在黄河干流水质评价中的应用研究[J]. *环境科学与管理*, 2019, **44**(10): 175-179.
Dong Y, Li J, Wu H M, *et al.* Application of grey clustering method based on level eigenvalue in water quality evaluation of Yellow River[J]. *Environmental Science and Management*, 2019, **44**(10): 175-179.
- [10] 袁瑞强, 钟钰翔, 龙西亭. 洞庭湖上游平原浅层地下水水质综合评价[J]. *水资源保护*, 2021, **37**(6): 121-127.
Yuan R Q, Zhong Y X, Long X T. Comprehensive evaluation of shallow groundwater quality in upper plain of Dongting Lake[J]. *Water Resources Protection*, 2021, **37**(6): 121-127.
- [11] 赵爽, 倪兆奎, 黄冬凌, 等. 基于 WQI 法的鄱阳湖水水质演变趋势及驱动因素研究[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(1): 179-187.
Zhao S, Ni Z K, Huang D L, *et al.* Evolution of water quality of Poyang Lake using WQI method and driving factors identification[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(1): 179-187.
- [12] Hamlat A, Guidoum A. Assessment of groundwater quality in a semiarid region of Northwestern Algeria using water quality index (WQI)[J]. *Applied Water Science*, 2018, **8**(8), doi: 10.1007/s13201-018-0863-y.
- [13] 胡莹莹, 王义成, 周毓彦, 等. 基于综合水质指数的白洋淀流域水质评价[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, **53**(3): 145-154.
- Hu Y Y, Wang Y C, Zhou Y Y, *et al.* Water quality assessment of Baiyangdian watershed based on a comprehensive water quality index[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, **53**(3): 145-154.
- [14] Naik M R, Mahanty B, Sahoo S K, *et al.* Assessment of groundwater geochemistry using multivariate water quality index and potential health risk in industrial belt of central Odisha, India[J]. *Environmental Pollution*, 2022, **303**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.119161.
- [15] Zhang Y H, He Z H, Tian H H, *et al.* Hydrochemistry appraisal, quality assessment and health risk evaluation of shallow groundwater in the Mianyang area of Sichuan Basin, southwestern China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, **80**(17), doi: 10.1007/s12665-021-09894-y.
- [16] Wu C, Wu X, Qian C, *et al.* Hydrogeochemistry and groundwater quality assessment of high fluoride levels in the Yanchi endorheic region, northwest China[J]. *Applied Geochemistry*, 2018, **98**: 404-417.
- [17] Adimalla N, Qian H, Li P Y. Entropy water quality index and probabilistic health risk assessment from geochemistry of groundwaters in hard rock terrain of Nanganur County, South India[J]. *Geochemistry*, 2020, **80**(S4), doi: 10.1016/j.chemer.2019.125544.
- [18] Zhang X, Zhao R, Wu X, *et al.* Hydrogeochemistry, identification of hydrogeochemical evolution mechanisms, and assessment of groundwater quality in the southwestern Ordos Basin, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, **29**(1): 901-921.
- [19] Wu C, Fang C, Wu X, *et al.* Hydrogeochemical characterization and quality assessment of groundwater using self-organizing maps in the Hangjinqi gasfield area, Ordos Basin, NW China[J]. *Geoscience Frontiers*, 2021, **12**(2): 781-790.
- [20] Li C S, Gao Z J, Chen H L, *et al.* Hydrochemical analysis and quality assessment of groundwater in southeast North China Plain using hydrochemical, entropy-weight water quality index, and GIS techniques[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, **80**(16), doi: 10.1007/s12665-021-09823-z.
- [21] Islam A R M T, Ahmed N, Bodrud-Doza M, *et al.* Characterizing groundwater quality ranks for drinking purposes in Sylhet district, Bangladesh, using entropy method, spatial autocorrelation index, and geostatistics[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(34): 26350-26374.
- [22] Subba Rao N, Sunitha B, Adimalla N, *et al.* Quality criteria for groundwater use from a rural part of Wanaparthi District, Telangana State, India, through ionic spatial distribution (ISD), entropy water quality index (EWQI) and principal component analysis (PCA)[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, **42**(2): 579-599.
- [23] Shafi M, Prakash C, Gani K M. Application of remodeled water quality indices for the appraisal of water quality in a Himalayan Lake[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2022, **194**(8), doi: 10.1007/s10661-022-10268-5.
- [24] Nong X Z, Shao D G, Zhong H, *et al.* Evaluation of water quality in the South-to-North Water Diversion Project of China using the water quality index (WQI) method[J]. *Water Research*, 2020, **178**, doi: 10.1016/j.watres.2020.115781.
- [25] Wu Z S, Wang X L, Chen Y W, *et al.* Assessing river water quality using water quality index in Lake Taihu Basin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **612**(2): 914-922.
- [26] 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价[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.
- [27] 赵楠芳, 鄢笑宇, 李青, 等. 鄱阳湖环湖区浅层地下水化学特征及形成机制[J]. 人民长江, 2021, **52**(1): 44-48.
- Zhao N F, Yan X Y, Li Q, *et al.* Hydrochemical characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in around-lake area of Poyang Lake [J]. *Yangtze River*, 2021, **52**(1): 44-48.
- [28] 陈昌剑, 马青山, 徐卫东, 等. 南昌平原区孔隙地下水水化学特征及成因分析[J]. 地下水, 2021, **43**(3): 13-15, 96.
- Chen C J, Ma Q S, Xu W D, *et al.* Hydrochemical and genetic analysis of pore groundwater in Nanchang Plain [J]. *Groundwater*, 2021, **43**(3): 13-15, 96.
- [29] Lan Y Y. Analysis of the influence of Nanchang Metro Line 4 on groundwater [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, **61**, doi: 10.1088/1755-1315/61/1/012112.
- [30] Ma Q S, Ge W Y, Tian F J. Geochemical characteristics and controlling factors of chemical composition of groundwater in a part of the Nanchang section of Ganfu Plain [J]. *Sustainability*, 2022, **14**(13), doi: 10.3390/su14137976.
- [31] 储小东, 熊祚勇, 危洪波, 等. 南昌市地下水质量动态监测[J]. 河南水利与南北水调, 2018, **47**(12): 35-36.
- [32] HJ 494-2009, 水质 采样技术指导[S].
- [33] HJ 164-2020, 地下水环境监测技术规范[S].
- [34] Singh K R, Dutta R, Kalamdhad A S, *et al.* Information entropy as a tool in surface water quality assessment [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, **78**(1), doi: 10.1007/s12665-018-7998-x.
- [35] Ji Y J, Wu J H, Wang Y H, *et al.* Seasonal variation of drinking water quality and human health risk assessment in Hancheng City of Guanzhong Plain, China [J]. *Exposure and Health*, 2020, **12**(3): 469-485.
- [36] Siddique J, Menggui J, Shah M H, *et al.* Integrated approach to hydrogeochemical appraisal and quality assessment of groundwater from Sargodha District, Pakistan [J]. *Geofluids*, 2020, **2020**, doi: 10.1155/2020/6621038.
- [37] Adimalla N, Li P Y, Qian H. Evaluation of groundwater contamination for fluoride and nitrate in semi-arid region of Nirmal Province, South India; a special emphasis on human health risk assessment (HHRA) [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2019, **25**(5): 1107-1124.
- [38] Chen Q, Jia C P, Wei J C, *et al.* Geochemical process of groundwater fluoride evolution along global coastal plains: evidence from the comparison in seawater intrusion area and soil salinization area [J]. *Chemical Geology*, 2020, **552**, doi: 10.1016/j.chemgeo.2020.119779.
- [39] Naderi M, Jahanshahi R, Dehbandi R. Two distinct mechanisms of fluoride enrichment and associated health risk in springs' water near an inactive volcano, southeast Iran [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **195**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110503.
- [40] Adimalla N, Qian H. Groundwater quality evaluation using water quality index (WQI) for drinking purposes and human health risk (HHR) assessment in an agricultural region of Nanganur, south India [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **176**: 153-161.
- [41] 寇馨月, 丁军军, 李玉中, 等. 青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(7): 3232-3241.
- Kou X Y, Ding J J, Li Y Z, *et al.* Identifying the sources of groundwater NO_3^- -N in agricultural region of Qingdao [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3232-3241.
- [42] 袁宏颖, 杨树青, 张万锋, 等. 河套灌区浅层地下水 NO_3^- -N 时空变化及驱动因素[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 1898-1907.
- Yuan H Y, Yang S Q, Zhang W F, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics and driving factors of nitrogen of shallow groundwater in Hetao Irrigation District [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 1898-1907.
- [43] Kwon E, Park J, Park W B, *et al.* Nitrate vulnerability of groundwater in Jeju Volcanic Island, Korea [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **807**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151399.
- [44] Zanotti C, Caschetto M, Bonomi T, *et al.* Linking local natural background levels in groundwater to their generating hydrogeochemical processes in Quaternary alluvial aquifers [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **805**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150259.
- [45] Abdul-Wahab D, Adomako D, Abass G, *et al.* Hydrogeochemical and isotopic assessment for characterizing groundwater quality and recharge processes in the Lower Anayari catchment of the Upper East Region, Ghana [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2021, **23**(4): 5297-5315.
- [46] 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.
- [47] 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 等. 快速城镇化进程中珠江三角洲硝酸型地下水赋存特征及驱动因素[J]. 环境科学, 2021, **42**(10): 4761-4771.
- Lü X L, Liu J T, Han Z T, *et al.* Geochemical characteristics and driving factors of NO_3^- type groundwater in the rapidly urbanizing Pearl River Delta [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4761-4771.
- [48] Manu E, Afrifa G Y, Ansah-Narh T, *et al.* Estimation of natural background and source identification of nitrate-nitrogen in groundwater in parts of the Bono, Ahafo and Bono East regions of Ghana [J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 2022, **16**, doi: 10.1016/j.gsd.2021.100696.
- [49] Snousy M G, Wu J H, Su F M, *et al.* Groundwater quality and its regulating geochemical processes in Assiut Province, Egypt [J]. *Exposure and Health*, 2022, **14**(2): 305-323.

CONTENTS

Assessing the Environmental and Health Co-benefits of Accelerated Energy Transition and Industrial Restructuring: A Case Study of the BTHS Region	YANG Xi, SUN Yi-sheng, CHANG Shi-yan, <i>et al.</i> (3627)
Synergistic Paths of Reduced Pollution and Carbon Emissions Based on Different Power Demands in China	XIANG Meng-yu, WANG Shen, LÜ Lian-hong, <i>et al.</i> (3637)
Evaluation Method and Application for Urban Carbon Peaking & Neutrality Performance	ZHANG Bao-liu, BAI Zi-han, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3649)
Revealing Driving Factors of Urban O ₃ Based on Explainable Machine Learning	DONG Jia-qi, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (3660)
Sensitivity Analysis of Ozone Formation Using Response Surface Methodology	ZHU Yu-huan, CHEN Bing, ZHANG Ya-ru, <i>et al.</i> (3669)
Analysis of O ₃ Sources in Yulin City in Summer Based on WRF-CMAQ/ISAM Model	WANG Yi-fan, TONG Ji-long, CHEN Yu-xiang, <i>et al.</i> (3676)
Atmospheric Ozone Concentration Prediction in Nanjing Based on LightGBM	ZHU Jia-ying, AN Jun-lin, FENG Yue-zheng, <i>et al.</i> (3685)
Meteorological Formation Mechanisms and Potential Sources of an Ozone Pollution Process in Winter of 2022 in Guangdong Province	LI Ting-yuan, CHEN Jing-yang, GONG Yu, <i>et al.</i> (3695)
Impact of Summer Tropospheric Ozone Radiative Forcing on Meteorology and Air Quality in North China	DU Nan, CHEN Lei, LIAO Hong, <i>et al.</i> (3705)
Identification of Impacts from Meteorology and Local and Transported Photochemical Generation on Ozone Trends in Changsha from 2018 to 2020	YANG Jun, YANG Lei-feng, DING Hua, <i>et al.</i> (3715)
Spatio-temporal Variation and Multi-dimensional Detection of Driving Mechanism of PM _{2.5} Concentration in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration from 2000 to 2021	XU Yong, GUO Zhen-dong, ZHENG Zhi-wei, <i>et al.</i> (3724)
Estimation of PM _{2.5} Hourly Concentration in Sichuan Province Based on GTWR-XGBoost Model	WU Di, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (3738)
Transmission and Growth Characteristics of Severe PM _{2.5} Pollution Events from 2013 to 2021 in Xingtai, Hebei	JIANG Qi, SHENG Li, JIN Yu-chen, <i>et al.</i> (3749)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Urban Shanghai During Cold Season Based on High Time-resolution Measurements of Organic Molecular Markers	ZHU Shu-hui (3760)
Emission Factors of Carbonaceous Aerosol and Stable Carbon Isotope for In-use Vehicles	YU Ming-yuan, WANG Qian, FU Ming-liang, <i>et al.</i> (3771)
Composition Characteristics of Volatile Organic Compounds and Associated Contributions to Secondary Pollution in Shenyang Industrial Area in Summer	GUAN Lu, SU Cong-cong, KU Ying-ying, <i>et al.</i> (3779)
Characteristics of VOCs and Assessment of Emission Reduction Effect During the Epidemic Lockdown Period in Shenzhen Urban Area	YUN Long, LIN Chu-xiong, LI Cheng-liu, <i>et al.</i> (3788)
Characteristics of Organic Matter Composition and Oxidation Potential in Road Dust in Winter in Xi'an	WANG Qing-wen, CHEN Qing-cai, WANG Chao, <i>et al.</i> (3797)
Contamination Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Compounds in Surface Dust of Suntuan Mining Area in Huaibei	XU Zhen-peng, QIAN Ya-hui, HONG Xiu-ping, <i>et al.</i> (3809)
Spatial-temporal Variation in Water Quality and Its Response to Precipitation and Land Use in Baiyangdian Lake in the Early Stage of the Construction of Xiong'an New Area	WANG Zi-ming, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (3820)
Simulation of Pollution Apportionment and Optimization of Control Methods in Watershed Scale: A Case Study of the Shun'an Watershed in Tongling City	LIU Guo-wangchen, CHEN Lei, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (3835)
Evaluation of Shallow Groundwater Quality and Optimization of Monitoring Indicators in Nanchang	ZHENG Zi-yin, CHU Xiao-dong, XU Jin-ying, <i>et al.</i> (3846)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics and Influencing Factors of "Three Waters" in Shandian River Basin	YANG Li-na, JIA De-bin, GAO Rui-zhong, <i>et al.</i> (3855)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Abundant and Rare Planktonic Microeukaryotes in Jinsha River	YAN Bing-cheng, CUI Ge, SUN Sheng-hao, <i>et al.</i> (3864)
Bacterial Community Diversity in Channel Sediments of Different Disturbance Sections of the Jialing River	ZHU Lan-ping, ZHANG Tuo, LI Jia-ning, <i>et al.</i> (3872)
Effects of Reservoir Water Depth on Different Plankton Communities and Keystone Species of Network Interaction	WANG Xun, LIAO Qin, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (3881)
Correlation Between the Diversity Characteristics of Groundwater Bacterial Community and Environmental Factors in Typical Industrial Areas	WU Jian-qiang, ZHANG Shu-yuan, WANG Min, <i>et al.</i> (3892)
Effects of Fertilizer Application Strategy Adjustments on Nitrogen and Phosphorus Loss from Typical Crop Systems in Taihu Lake Region	YU Ying-liang, WANG Yi-zhi, YANG Bei, <i>et al.</i> (3902)
Estimation of Cropland Nitrogen Runoff Loss Loads in the Yangtze River Basin Based on the Machine Learning Approaches	ZHANG Yu-fu, PAN Zhe-qi, CHEN Ding-jiang (3913)
Classification and Identification of Non-point Source Nitrogen Pollution in Surface Flow of the Shangwu River Watershed in the Qiandao Lake Region	YU Ke, YAN Yan, TANG Zhang-xuan, <i>et al.</i> (3923)
Spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in the Main Stream and Typical Tributaries of Tuojiang River and Fujiang River	LI Zi-yang, ZHOU Ming-hua, XU Peng, <i>et al.</i> (3933)
Sediment Pollution and Dredging Effect of Waqinhuai River	ZHANG Mu, REN Zeng-yi, ZHANG Man, <i>et al.</i> (3945)
Critical Review on Environmental Occurrence and Photochemical Behavior of Substituted Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	GE Lin-ke, WANG Zi-yu, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (3957)
Cadmium and Arsenic Interactions During Co-adsorption onto Goethite	SU Zi-xian, LIU Sai-hong, GUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Catalyst Cyclodextrin-Fe-TAML to Activate H ₂ O ₂ and Oxidize Organic Micropollutants in Water	LIU Qing-quan, CAI Ben-zhe, CAI Xi-yun (3978)
Performance and Reaction Mechanism of Co(II) Mediated Activation of Peroxymonosulfate for Degrading Nitrilotris (Methylene Phosphonic Acid)	ZHU Jing-lin, WANG Shu (3990)
Change in Granulation Potential and Microbial Enrichment Characteristics of Sludge Induced by Microplastics	XIE Qing-fan, YU Nan, ZHANG Ni, <i>et al.</i> (3997)
Accumulation Characteristics and Probabilistic Risk Assessment of Cd in Agricultural Soils Across China	WANG Jing, WEI Heng, PAN Bo (4006)
Source Analysis and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Geological High Background Area in Southeastern Chongqing	JIANG Yu-lian, YU Jing, WANG Rui, <i>et al.</i> (4017)
Integrated Analysis on Source-exposure Risk of Heavy Metals in Farmland Soil Based on PMF Model: A Case Study in the E-waste Dismantling Area in Zhejiang Province	FANG Jia, HE Ying, HUANG Nai-tao, <i>et al.</i> (4027)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Farmland Soil and Crops in the Suburbs of Urumqi	FAN Yue, CAO Shuang-yu, Nuerla Ailijiang, <i>et al.</i> (4039)
Distribution and Driving Mechanisms of Antibiotic Resistance Genes in Desert-Oasis Continuum	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yidan, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4052)
Characteristics of Antibiotic Contamination of Soil in China in Past Fifteen Years and the Bioremediation Technology: A Review	ZHAO Xiao-dong, QIAO Qing-qing, QIN Xiao-rui, <i>et al.</i> (4059)
Modified Biochar for Remediation of Soil Contaminated with Arsenic and Cadmium: A Review	LÜ Peng, LI Lian-fang, HUANG Xiao-ya (4077)
Effect of Biogas Slurry Return to Field on Heavy Metal Accumulation in Soil-crop System: A Meta-analysis	ZHAO Qi-zhi, YANG Zhi-min, KONG Fan-jing, <i>et al.</i> (4091)
Remediation Effect of Two Iron-modified Biochars on Slightly Alkaline Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	LIANG Xin-ran, HE Dan, ZHENG Zhao-hua, <i>et al.</i> (4100)
Effects of Straw Removal Measure on Soil Cd Bioavailability and Rice Cd Accumulation	WANG Zi-yu, ZHOU Hang, ZHOU Kun-hua, <i>et al.</i> (4109)
Application of Desulphurized Gypsum with Straw to Improve Physicochemical Properties of Saline-alkali Land in Yellow River Delta	ZHAO Hui-li, YU Jin-yi, LIU Tao, <i>et al.</i> (4119)
Biological Evaluation and Key Stress Factor Diagnosis of Compound Contaminated Soil Based on Environmental DNA	HUANG Xiang-yun, ZHONG Wen-jun, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4130)
Comprehensive Quality Assessment of Soil-Maize Heavy Metals in High Geological Background Area	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (4142)
Ecological Risk and Health Risk of Heavy Metal Pollution in Vegetable Production System of Zhejiang Province	ZHANG Shu-min, LIU Cui-ling, YANG Gui-ling, <i>et al.</i> (4151)
Effect of Biochar with Phosphorus Fertilizer on Soil Nutrients, Enzyme Activity, and Nutrient Uptake of <i>Alfalfa</i>	LIU Xin-yu, WANG Dong-mei, ZHANG Ze-zhou, <i>et al.</i> (4162)
Effects of Low-density Polyethylene Microplastics on the Growth and Physiology Characteristics of <i>Ipomoea aquatica</i> Forsk	ZHOU Ying, JIANG Wen-ting, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4170)
Effects of Biogas Slurry Application on Soil Microbial Communities Structure and Function During Wheat-rice Stubble Period	QIAO Yu-ying, XI Hui, LI Na, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Soil Bacterial Community Structure and Ecological Function Characteristics in Different Pollution Levels of Lead-zinc Tailings in Datong	LIU Ze-xun, ZHUANG Jia-yao, LIU Chao, <i>et al.</i> (4191)
Effect of Fire-deposited Charcoal on Soil Organic Carbon Pools and Associated Enzyme Activities in a Recently Harvested <i>Pinus massoniana</i> Plantation Subjected to Broadcast Burning	YAO Zhi, JIAO Peng-yu, WU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (4201)