

目次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势 杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)

交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测 郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)

基于扩展STIRPAT模型LMDI分解的碳排放脱钩因素 张江艳 (1888)

基于LEAP模型的工业园区碳达峰路径:以南京某国家级开发区为例 李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)

高校碳排放核算与分析:以北京A高校为例 曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)

北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素 俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)

碳排放权交易价格与全要素生产率:来自中国的证据 吴雪萍 (1926)

中国城市PM_{2.5}和PM₁₀时空分布特征和影响因素分析 李江苏, 段良荣, 张天娇 (1938)

2017~2021年苏皖鲁豫交界区域PM_{2.5}和O₃时空变化特征及影响因素 陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)

疫情管控期西安PM_{2.5}和O₃污染特征及成因分析 原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)

苏南五市秋冬季PM_{2.5}化学组成特征和空间差异 冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)

湖北咸宁细颗粒物PM_{2.5}来源 罗怡, 朱宽广, 陈璞琬, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)

邢台氨减排对京津冀PM_{2.5}改善的溢出效益 边泽君, 闻超玉, 郎建垒, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)

聊城市冬季PM_{2.5}载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析 张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)

高原城市拉萨典型VOCs排放源成分谱特征 郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)

北京市工业园区VOCs污染特征及健康风险评估案例:高新技术产业的环境影响 王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海滨, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)

高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析 雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)

水环境中抗病毒毒物的存在、行为与风险 葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)

黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险 王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤锋 (2054)

藏东多曲河流域总富集水化学特征及控制因素 李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)

西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源 张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)

基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程 孟令华 (2096)

丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素 张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)

金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素 王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴玺, 安永会 (2118)

德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价 刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王橹橹 (2129)

典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征 许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)

抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析 王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)

过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能 曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲子, 李大鹏, 黄勇 (2160)

矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应 刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张彤 (2171)

生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展 孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)

微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制 练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠军, 陈波 (2195)

紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制 马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)

土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应 郭善嵩, 胡思, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)

鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度 喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)

典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系 刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琼, 周瑞娟, 李霖 (2233)

污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响 郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)

宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能 胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)

大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制 郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)

基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演 叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)

秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响 叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林科 (2292)

长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响 王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)

土壤盐分变化对N₂O排放影响:基于Meta分析 黄艺华, 余冬立, 史祯琦, 胡磊, 潘永春 (2313)

基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测 郑慧玲, 郑辉峰 (2321)

基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟 张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)

防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系 徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)

长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力 赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)

冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响 鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)

辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应 周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)

高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征 张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)

生物炭与不同类型氮肥施肥对菜地土壤反硝化细菌群落的影响 柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)

大岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征 马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)

基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法 张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 郇允兵 (2417)

基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析 李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)

西南不同类型紫色土pH变化、重金属累积与潜在生态风险评估 张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)

重庆某铁矿周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析 廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)

金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)

赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果 刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)

施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响 张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价

刘楠¹, 陈盟^{1,2*}, 高东东³, 吴勇⁴, 王橛橛⁵

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541004; 2. 桂林理工大学岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 桂林 541004; 3. 四川省生态环境科学研究院, 成都 610041; 4. 成都理工大学环境与土木工程学院, 成都 610059; 5. 桂林理工大学地球科学学院, 桂林 541004)

摘要: 地下水是德阳市的重要供水水源, 了解其水化学特征及生态风险状况对可持续发展至关重要. 以德阳市平原区为研究对象, 采集 78 个地下水样, 分析其水化学特征及其影响因素, 运用绝对主成分-多元线性回归模型 (APCS-MLR) 进行水化学组分来源解析, 并综合运用熵权水质指数 (EWQI) 和人类健康风险评估模型 (HHRA) 进行地下水水质及健康风险评估. 结果表明, 地下水中 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 Mn^{2+} 和 TFe 浓度均值超过国家 III 类水质标准; Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 Mn^{2+} 和 TFe 变异系数介于 1.11~3.72, 含量起伏变化大, 局部富集程度高; 区内地下水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 和 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型为主, 分别占比 33.33%、25.64%、19.23% 和 14.10%. APCS-MLR 模型源解析结果表明, 地下水水化学组分主要来源为: 水岩作用源 (32.87%)、农业活动源 (12.75%)、生活污水和工业废水排放源 (12.40%)、原生地质环境和水岩作用复合源 (9.86%)、农业与工业复合源 (9.44%) 和未识别源 (22.69%). 熵权水质指数 (EWQI) 结果显示, 地下水质量 I 级和 II 级占比分别为 6.41% 和 74.36%, 达到优良和良好程度; 地下水质量为 III 级占比 11.54%, 质量中等; 地下水质量为 IV 级和 V 级占比分别为 6.41% 和 1.28%, 地下水质量差或极差; 影响地下水水质等级的主要指标依次为: $\text{TFe} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > \text{HCO}_3^-$. HHRA 模型结果显示区内潜在非致癌风险较低, 均未超过 1; 与皮肤接触相比, 直接摄入是这些指标危害人类的主要途径; 在相同环境下儿童比成人暴露更容易受到伤害. 整体而言, 区内地下水水质状况良好, 研究区东南部存在一定的潜在风险, 在地下水资源利用中应加强对该地区的地下水资源管理和污染防治.

关键词: 浅层地下水; 水化学特征; 绝对主成分-多元线性回归模型 (APCS-MLR); 熵权水质指数 (EWQI); 德阳市平原区
中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-2129-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202305110

Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City

LIU Nan¹, CHEN Meng^{1,2*}, GAO Dong-dong³, WU Yong⁴, WANG Xiao-tong⁵

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Security in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 3. Sichuan Academy of Eco-Environmental Sciences, Chengdu 610041, China; 4. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 5. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Taking the plain area of Deyang City as the research object, 78 groundwater samples were collected to analyze their hydrochemical characteristics and influencing factors. The absolute principal component-multiple linear regression model (APCS-MLR) was used to analyze the sources of hydrochemical components, the entropy-weight water quality index (EWQI) was used to evaluate groundwater quality, and the human health risk assessment model (HHRA) was used to evaluate health risk. The results showed that the average concentration values of Ca^{2+} , HCO_3^- , Mn^{2+} , and TFe in groundwater exceeded the national grade groundwater quality standards of Class III. The variation coefficients of Na^+ , K^+ , Cl^- , NO_3^- , Mn^{2+} , and TFe ranged from 1.11 to 3.72, with large fluctuations in content and a high degree of local enrichment. The chemical types of groundwater in the area were dominated by $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$, $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$, and $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, accounting for 33.33%, 25.64%, 19.23%, and 14.10%, respectively. The source apportionment results of the APCS-MLR model showed that the main sources of hydrochemical components in groundwater were water-rock interaction sources (32.87%), agricultural activities sources (12.75%), domestic sewage and industrial wastewater discharge sources (12.40%), the mixed source of primary geological environment and water-rock interaction (9.86%), mixed agricultural and industrial sources (9.44%), and unidentified sources (22.69%). The results of the entropy-weight water quality index (EWQI) showed that the groundwater quality of Grade I and Grade II accounted for 6.41% and 74.36%, respectively, which reached the excellent and good degrees. The groundwater quality of Grade III accounted for 11.54% and reached medium degree. The groundwater quality of Grade IV and Grade V accounted for 6.41% and 1.28%, respectively, indicating poor or extremely poor groundwater quality. The main indexes affecting groundwater quality grade were: $\text{TFe} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > \text{HCO}_3^-$. The HHRA model results showed that the potential non-carcinogenic risk in the region was low and did not exceed 1. Compared with skin contact, these indicators mainly harmed humans through direct ingestion. Children were more vulnerable to exposure than adults in the same environment. Overall, the groundwater quality in the area was good, and there was a certain potential risk in the southeast of the study area. Thus, the resource management and pollution prevention of local groundwater should be strengthened in future water resource utilization.

Key words: shallow groundwater; hydrochemical characteristics; absolute principal component-multiple linear regression model (APCS-MLR); entropy-weight water quality index (EWQI); plain zone of Deyang City

收稿日期: 2023-05-12; 修订日期: 2023-06-28

基金项目: 广西自然科学基金项目 (2020GXNSFBA297050); 广西科技基地和人才专项项目 (桂科 AD19110046)

作者简介: 刘楠 (1998~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为地下水环境调查与评价, E-mail: nancyangao@163.com

* 通信作者, E-mail: cattlpen@163.com

地下水在全球范围内是一种广泛而脆弱的自然资源^[1,2]，一旦被污染很难恢复到原来的状态^[3]。近年来，随着人口增加和资源消耗加剧，地下水资源面临着越来越大的压力，根据《中国生态环境状况公报》，76.10%的地下水不适合饮用^[4]。因此，了解地下水的污染来源和健康风险对保护人类健康和社会可持续发展具有重要意义。

地下水水质状况可以受到多种因素和过程的影响，由于工业化和城市化的快速发展，人口的大量增长，以及化肥的过度使用，地下水水质不断恶化^[5]。在过去的几十年里，针对地下水污染源识别方面，主要采用同位素示踪技术^[6]、主成分分析^[7]和绝对主成分-多元线性回归(APCS-MLR)模型^[8]等方法，其中APCS-MLR模型能够定量解析自然或人为源对每个变量的贡献^[9]，已成为源识别和源解析的常用工具。地下水水质评价方面多采用模糊综合评价^[10]、集对分析^[11]、粗糙集分析^[12]、多元分析^[13]和层次分析^[14]等方法，但以上评估方法在应用中须考虑主观性、精确性和不确定性等因素。水质指数法(water quality index, WQI)通过加权各评价指标的重要性来量化水质，广泛用于描述地下水水质^[15]，但其评价结果对参数权重比较敏感。熵权水质指数(entropy-weighted water quality index, EWQI)引入熵权消除主观因素对水质参数的影响，赋予参数合理权重，可以有效量化地下水质量^[16]。

关于德阳平原区地下水环境方面的研究很多，陈盟等^[17]分析认为溶滤作用、蒸发浓缩作用和阳离子交换吸附作用是德阳市、广汉市平原区浅层地下水水化学形成和演化的主要作用过程，而在德阳市旌阳区浅层地下水水化学演化规律及影响因素分析中认为人类活动(生活污水、农业施肥与农药等)对地下水水化学影响较大^[18]。张涵等^[19]研究表明农业活动、生活污水和工业排放是造成德阳市平原区地下水硝酸盐污染的主要影响因素，在农业地区主要来源是化肥和粪便，而在工业地区则主要是污水排放和大气降水^[20]，且在当前环境和增加农业用地利用的情况下硝酸盐污染有进一步加剧的可能性^[21]。以上研究成果为德阳地区地下水环境的后续研究提供了良好的基础，但缺乏对地下水来源的定性评价及定量解析，且针对德阳市平原区地下水水质评价的研究较少，对该区的地下水的可持续开发利用有一定的限制作用。

本研究以德阳市平原区地下水为研究对象，着重分析其水化学特征和影响因素，采用绝对主成分-多元线性回归(APCS-MLR)模型探讨其来源及量化贡献率，采用熵权水质指数(EWQI)开展地下水水

质评价，确定影响水质的关键性指标，并针对关键指标进行健康风险评价。本研究成果将丰富德阳平原区地下水的水化学演化、水环境和水污染方面的研究，以期对德阳平原区地下水水资源开发、地下水污染防治与修复和地下水环境保护提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

德阳市位于成都平原东北部，地处东经 $103^{\circ}45' \sim 105^{\circ}15'$ ，北纬 $30^{\circ}31' \sim 31^{\circ}42'$ 之间。属亚热带季风湿润性气候区，气候温和，四季分明，降水充沛。年平均气温 $15 \sim 17^{\circ}\text{C}$ ，年总降水量 $900 \sim 950 \text{ mm}$ ，降水量自西北向东南逐渐减少，降水量多集中在5~10月，占年降水量的87%~89%。区内水系发育，流域面积在 100 km^2 以上的河流共10条(段)，总长度 $1\,129 \text{ km}$ ，均为沱江水系，包括绵远河、石亭江、湔江和青白江，由西北流向东南。

本研究主要针对平原区，为沱江冲积平原地带，在原有冰水扇状平原被破坏的基础上，形成沿河流方向由北西向南东的近代河流冲洪积扇、漫滩、一级阶地和冰水扇状残留平原相间组成的复合冲洪积平原，近代河流的长期切割形成埂-槽-埂相间的地形，海拔在 $450 \sim 590 \text{ m}$ 。地层主要由：全新统冲积(Q_4^{al})砂砾卵石层、全新统冲洪积($Q_4^{\text{al+pl}}$)砂砾卵石层、上更新统冰水堆积(Q_3^{gl})泥质砂砾卵石层、中-上更新统堆积(Q_{2-3}^{gl})泥质砂砾卵石层、中更新统堆积(Q_2^{gl})泥质砂砾卵石层、全新统坡残积($Q_4^{\text{al+el}}$)砂砾卵石层、上更-全新统坡残积($Q_{3-4}^{\text{al+el}}$)砂砾卵石层(图1和图2)。地下水类型为第四系孔隙水，富水性由强到弱不等，富水性变化大。地下水补给来源有大气降水、渠系入渗、库塘入渗和农灌入渗等。在冲洪积扇中下部，由于地下水水力坡度进一步变缓，地下水水位埋深变浅，地下水多分布在扇间洼地，或在扇与上更新统接触地带，以下降泉形式向主要河流排泄。此外，蒸发也是区内重要的排泄方式。

1.2 样品采集与分析

水样采集点均为德阳市平原区大口径民用井或机井，大口径民用井采用人工取水，机井采用水泵抽水取水，均按照饮用水标准进行采集，共采集78个地下水样，采样点分布见图1。分析参数包括pH值、电导率(EC)、溶解性总固体(TDS)、总硬度(TH)、主要阳离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})、主要阴离子(NO_3^- 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-})及部分金属离子(Mn^{2+} 、 TFe 、 Al^{3+})，pH、EC和TDS用DDS-308A便携式设备进行原位测试，TH采用EDTA滴定法测

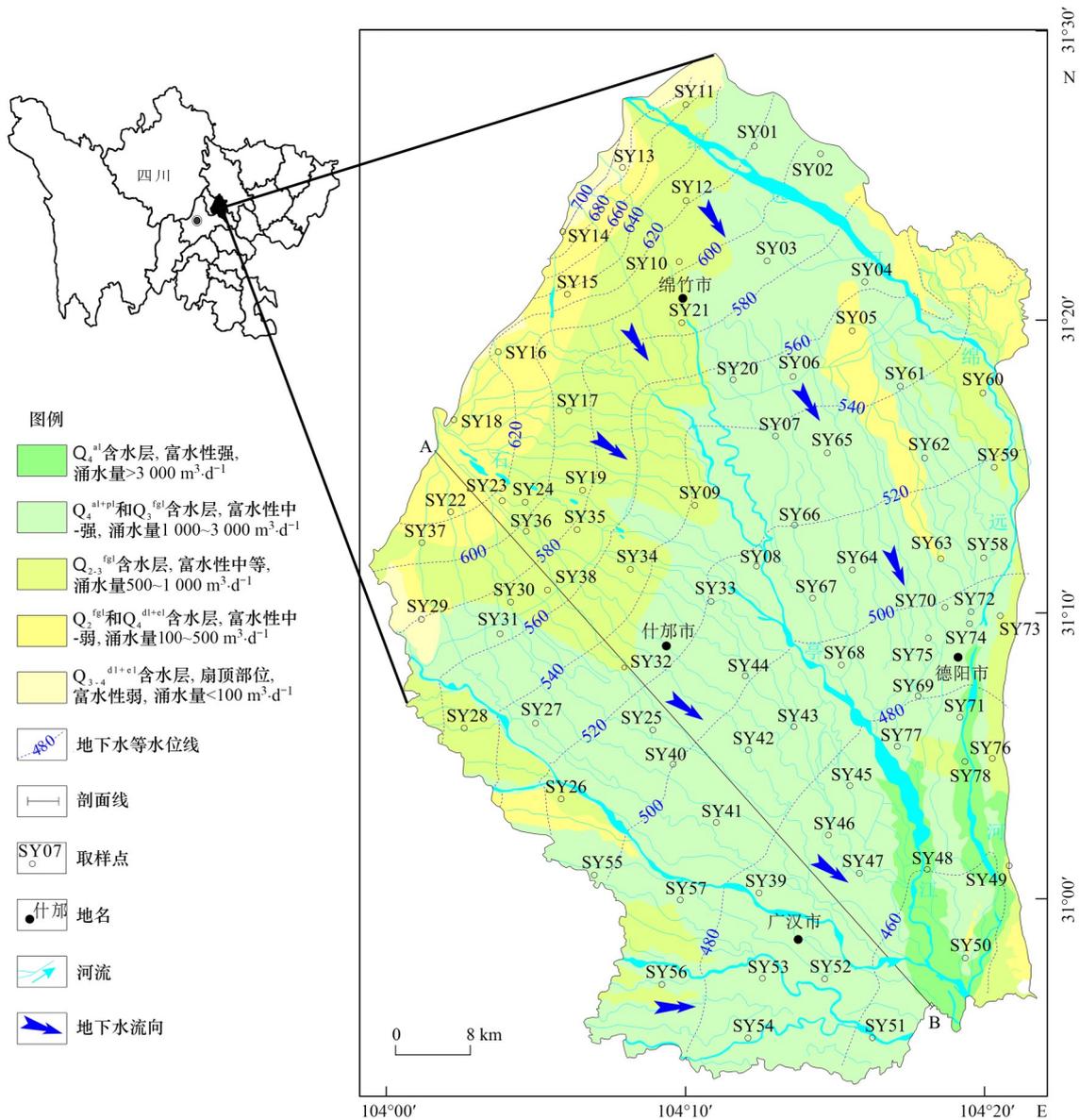


图 1 研究区水文地质示意
 Fig. 1 Hydrogeological of the study area

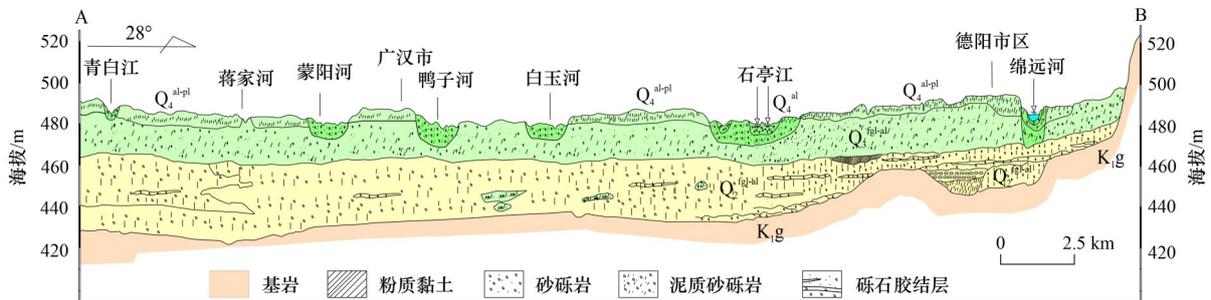


图 2 研究区水文地质剖面
 Fig. 2 Hydrogeological profile of the study area

定；在 24 h 内对样品进行了分析， HCO_3^- 浓度采用革兰滴定法测定； Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 分别采用 Wayee IC6100 离子色谱法进行测定； Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 TFe 和 Mn^{2+} 用 AA6100 原子吸收分光光度计进行分析；所有测试均一式三份，以确保分析的准确性。

参数分析误差采用阳离子-阴离子浓度平衡法进行检测，测定误差 $< 5\%$ 。

1.3 研究方法

1.3.1 描述性与多元统计分析

采用 Excel 2016 对原始数据进行整理计算，研

究区地下水水质指标含量描述性统计和多元统计分析在 SPSS 19.0 软件中进行. 地下水污染风险平面空间分布在 ArcGIS 10.2 软件通过贝叶斯克里金插值法绘制, 数据图形绘制主要由 Origin 2021 完成.

1.3.2 绝对主成分分析-多元线性回归受体模型 (APCS-MLR)

APCS-MLR 的基本原理是利用主成分分析 (PCA) 得到标准化因子得分和特征向量, 进行 APCS-MLR 定量源解析^[22, 23].

(1) 首先, 原始数据标准化如下:

$$Z_{ij} = \frac{C_{ij} - \bar{C}_j}{\delta_j} \quad (1)$$

式中, C_{ij} 为第 i 个样本中第 j 种指标的浓度, \bar{C}_j 和 δ_j 为所有样本中第 j 种指标的平均浓度和标准偏差.

(2) 引入浓度为 0 的人为样本, 进行标准化, 计算公式为:

$$Z_0 = \frac{0 - \bar{C}_j}{\delta_j} = -\frac{\bar{C}_j}{\delta_j} \quad (2)$$

(3) 通过 PCA 主成分分析可以得到标准化后的指标浓度样本的因子得分, 每种指标元素的绝对主成分因子 (APCS) 可由真实样本的因子得分减去 Z_0 的因子得分来估计. 再将 APCS 作为自变量, 以指标的实测浓度为因变量进行多元线性回归分析, 得到的回归系数可将 APCS 转化为每个指标对每个样本的含量贡献, 计算式如下:

$$C_j = b_{0j} + \sum_{k=1}^p (b_{kj} \cdot \text{APCS}_k) \quad (3)$$

式中, C_j 为指标 j 的浓度, b_{0j} 为指标 j 多元回归的常数项, b_{kj} 为源 k 对指标 j 的回归系数; APCS_k 是绝对主成分因子得分, p 为因子个数, $b_{kj} \cdot \text{APCS}_k$ 为源 p 对 C_j 的贡献率, 所有样本的 $b_{kj} \cdot \text{APCS}_k$ 平均值代表了源的平均贡献. 在 APCS-MLR 模型中, 贡献率计算过程中可能出现负值, 从而误导源分摊的准确性. 为解决这一问题, 将所有数据进行归一化处理, 表示对应水源对水质参数的贡献率.

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - (x_{ij})_{\min}}{(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}} \quad (4)$$

1.3.3 熵权水质指数 (EWQI)

EWQI 的基本思想是通过熵值确定评价指标的权重, 将大量的水质数据转化为反映水质状况的代表性值^[24]. 熵权法具有较强的客观性, 能有效地消除权重计算中的人为影响. 因此, EWQI 比传统的水质指数法更合理. 计算 EWQI 的算法按照以下步骤进行^[25, 26]:

(1) 根据原始数据建立矩阵 X , 如式(5).

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (5)$$

(2) 根据式(6)分别将负向指标进行正向化处理, 由于计算时会出现 0 值, 所以对整体数据平移 0.000 1, 根据式(7)建立矩阵 Y .

$$y_{ij} = \frac{(x_{ij})_{\max} - x_{ij}}{(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}} + 0.000 1 \quad (6)$$

$$Y = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \cdots & y_{mn} \end{pmatrix} \quad (7)$$

(3) 归一化, 计算概率矩阵 P , P 中的元素 P_{ij} 根据式(8)计算.

$$P_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}} \quad (8)$$

式中, P_{ij} 为概率矩阵元素.

(4) 根据式(9)计算第 j 个指标的信息熵 e_j .

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m P_{ij} \cdot \ln P_{ij} \quad (9)$$

式中, e_j 为第 j 个指标的信息熵.

(5) 根据式(10)计算第 j 个指标的熵权 w_j .

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (10)$$

(6) 根据式(11)计算每个水化学指标(离子)的定量分级 q_j .

$$q_j = \frac{C_j}{S_j} \times 100 \quad (11)$$

式中, C_j 为地下水水化学离子的实测浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), S_j 为根据相应的标准确定的离子浓度 (国标、世卫组织标准).

(7) 根据式(12)计算 EWQI, 根据 EWQI 的结果将水质分为 5 类 (表 1), 其中 I ~ II 类水质较好, 适合饮用, III ~ V 类水质较差, 不适宜饮用^[27].

$$\text{EWQI} = \sum_{j=1}^n (w_j \cdot q_j) \quad (12)$$

表 1 EWQI 等级分类
Table 1 Classification of EWQI

EWQI	等级	描述
≤50	I	优秀
51~100	II	良好
101~150	III	中等
151~200	IV	差
> 200	V	极差

1.3.4 人类健康风险评价

健康风险评价(HHRA)模型对于支持水质评估和管理至关重要.受污染的水可能通过多种接触途径对人类构成健康风险,最常见的是饮水和皮肤接触^[28].美国环保署(USEPA)建立了人类健康风险评价模型^[29].2014年,中华人民共和国环境保护部发布了新的《污染场地风险评估技术导则》.新技术指南中推荐的人体健康风险评估模型是在USEPA模型的基础上建立的,但为反映中国的实际污染情况,赋予了独特的参数.HHRA模型中HI值小于1,潜在的非致癌风险很低,HI值在1~4范围为中度潜在风险,超过4为高度潜在风险.模型及参数值参考文献[8,30].

2 结果与讨论

2.1 地下水水化学特征

水化学分析及理化参数描述性统计结果见表2.总体而言,该地区地下水pH区间为6.22~7.90,平均值为7.06,总体呈中性-弱碱性.地下水中Na⁺、K⁺、Cl⁻、NO₃⁻、Mn²⁺和TFe变异系数介于1.11~3.72,空间变异性明显,局部富集程度高,受人类活动影响较大^[31].地下水水质中Ca²⁺、HCO₃⁻、Mn²⁺和TFe均不同程度超过国家Ⅲ类水质标准^[32],TH、Mg²⁺、

Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻和Al³⁺在个别样点上超过标准值.Ca²⁺和HCO₃⁻的超标率分别为89.74%和61.54%,可能来自方解石溶解的产物,Mn²⁺和TFe的超标率分别为24.36%和32.05%,可能来自于含水层中锰和氧化铁矿物的风化作用,并且工业废水和垃圾渗滤液可能使其加剧^[33].

研究区内地下水水样的主要阳离子浓度排序为:Ca²⁺ > Mg²⁺ > Na⁺ > K⁺,阴离子浓度排序为:HCO₃⁻ > SO₄²⁻ > Cl⁻.根据Piper三线图解分析(图3),地下水样主要集中于1、3和5区,地下水阳离子中碱土金属离子浓度超过碱金属离子,弱酸根超过强酸根,碳酸盐硬度超过50.00%.区内地下水主导阳离子为Ca²⁺,毫克当量百分比均超60.00%,Mg²⁺次之,为20.00%左右;HCO₃⁻为主导阴离子,SO₄²⁻次之.按照舒卡列夫地下水化学分类方法^[34],区内地下水化学类型分为9种,以HCO₃·SO₄-Ca、HCO₃-Ca·Mg、HCO₃·SO₄-Ca·Mg和HCO₃-Ca·Mg型为主,分别占比33.33%、25.64%、19.23%和14.10%.其中SY71的水化学类型为SO₄·HCO₃-Na·Ca,Na⁺为主导阳离子, $\rho(\text{Na}^+)$ 为140.00 mg·L⁻¹,该值远远高于该地区其它位点,而 $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 为59.12 mg·L⁻¹,低于平均水平108.44 mg·L⁻¹,可能是Na⁺解吸进入水中和Ca²⁺交换吸附在矿物表面^[35].

表2 研究区水化学特征参数¹⁾

Table 2 Hydrogeochemical parameters for the water samples in the study area

项目	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数	标准值	超标率/%
EC/ $\mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$	1 450.00	140.00	736.99	194.12	0.26	/	/
pH	7.90	6.22	7.06	0.32	0.05	6.5~8.5	1.28
$\rho(\text{TDS})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	840.99	238.08	450.67	115.93	0.26	1 000	/
$\rho(\text{TH})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	717.77	181.89	370.77	99.93	0.27	450	21.79
$\rho(\text{Na}^+)/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	140.00	0.70	15.03	16.76	1.11	200	/
$P(\text{K}^+)/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	26.25	0.08	2.08	3.68	1.77	200	/
$\rho(\text{Ca}^{2+})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	196.39	53.99	108.44	27.63	0.25	75	89.74
$\rho(\text{Mg}^{2+})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	55.23	10.70	24.74	8.48	0.34	50	1.28
$\rho(\text{Cl}^-)/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	257.90	3.21	26.98	32.59	1.21	250	1.28
$\rho(\text{SO}_4^{2-})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	276.97	4.68	105.95	39.41	0.37	250	1.28
$\rho(\text{HCO}_3^-)/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	442.52	120.11	295.34	86.91	0.29	250	61.54
$\rho(\text{NO}_3^-)/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	160.82	0.04	18.51	22.37	1.21	88.6	1.28
$\rho(\text{Mn}^{2+})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2.47	0.01	0.14	0.36	2.64	0.10	24.36
$\rho(\text{TFe})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	30.22	0.05	0.99	3.67	3.72	0.3	32.05
$\rho(\text{Al}^{3+})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.21	0.02	0.05	0.03	0.66	0.20	1.28

1) pH值无量纲,标准差和变异系数无量纲;标准值为地下水质量标准Ⅲ类标准(GB/T 14848-2017);“/”表示无该值;超标率=超标样本数/总样本数

Gibbs图常用于定性分析地下水中各种离子的起源机制,主要受到蒸发浓缩、水-岩作用或大气降水作用的控制^[36].以水-岩作用为主导因素的样点分布在Gibbs图中部偏左侧,受大气降水作用控制的样点分布在右下角, $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 受蒸发作用控制的样点

分布在右上角^[37].在图4中, $\rho(\text{TDS})$ 范围为238.08~840.99 mg·L⁻¹,阳离子Na⁺/(Na⁺+Ca²⁺)范围为0.01~0.70,阴离子Cl⁻/(Cl⁻+HCO₃⁻)范围为0.01~0.45,大部分样点都分布在岩石风化作用控制区域,表明水岩相互作用主导了地下水水质形成的水文地球化学

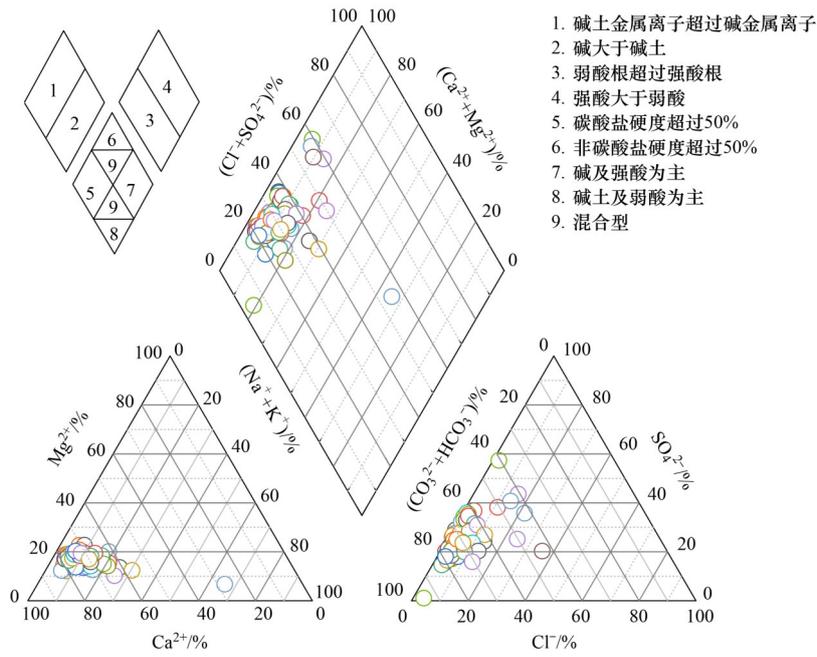


图3 研究区采样点水样 Piper 三线图

Fig. 3 Piper of groundwater samples from the study area

过程,是导致研究区水化学形成的关键水化学过程.此外,还有个别地下水样品落在虚线外,说明该区地下水除受到上述作用影响以外,还可能受到人为因素和地质环境等其他因素的影响^[38].

2.2 基于 APCS-MLR 模型的来源解析

通过 Bartlett 球形度检验结果 ($0.00 < 0.05$) 与 KMO 度量值检验结果 ($0.65 > 0.50$),各个元素间相关性强、可以采用主成分分析.将提取到的5个主成分(特征值大于1.00)的标准化的因子进行正交旋转,旋转后的累计贡献率为77.31%(表3),可以表示研究对象的大部分信息.采用归一化数据矩阵进行 PCA 分析,分析结果见表4,并划分为强载荷

(> 0.75)、中等载荷 ($0.50 \sim 0.75$) 和弱载荷 ($0.30 \sim 0.50$)^[39].

F1 对 TDS、TH、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 有较强的正载荷,分别为 0.85、0.98、0.96、0.94 和 0.78,对 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 Mn^{2+} 有弱正载荷,分别为 0.42、0.40 和 0.30,占总方差的 32.87%. TH 有高载荷表明区内原生地球水化学特征对地下水环境存在必然的影响^[40]. Ca^{2+} 和 HCO_3^- 是碳酸盐类溶解的产物, Mg^{2+} 是白云岩、白云质灰岩溶解的产物, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要由水岩相互作用和地下水运动驱动^[19], 潜水含水层松散, 径流条件相对较好, 易使地层中的钙镁化合物发生强烈的交替作用, 致使 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 增多, TH 随之上升.

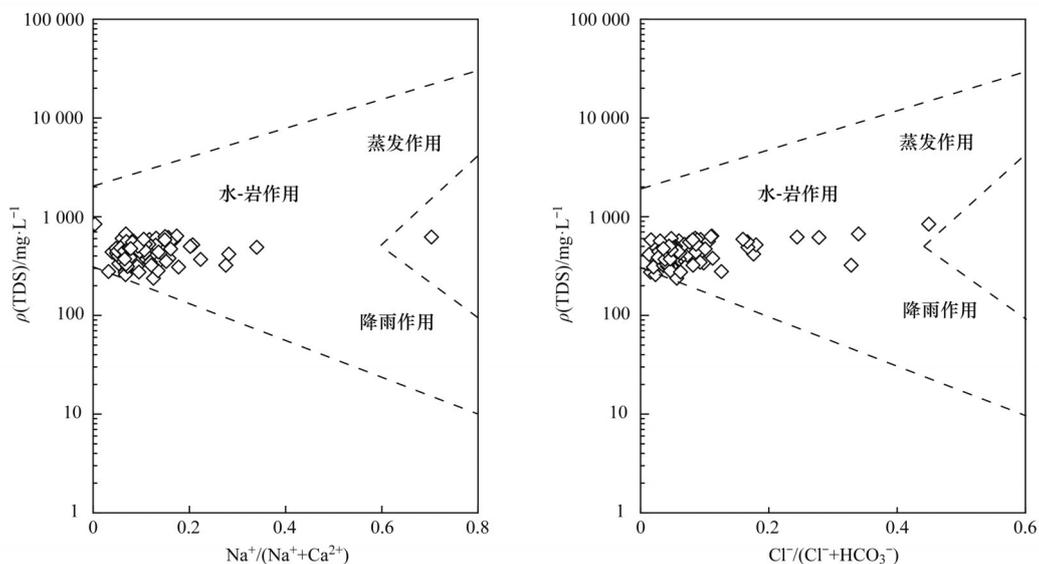


图4 地下水水化学 Gibbs 图

Fig. 4 Gibbs of groundwater chemistry

表3 研究区主成分总方差解释

Table 3 Interpretation of total variance of principal components in the study area

成份	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	合计	方差/%	累计/%	合计	方差/%	累计/%	合计	方差/%	累计/%
F1	5.11	36.49	36.49	5.11	36.49	36.49	4.60	32.87	32.87
F2	1.79	12.75	49.24	1.79	12.75	49.24	1.79	12.75	45.62
F3	1.51	10.80	60.05	1.51	10.80	60.05	1.74	12.40	58.02
F4	1.30	9.29	69.33	1.30	9.29	69.33	1.38	9.86	67.87
F5	1.12	7.98	77.31	1.12	7.98	77.31	1.32	9.44	77.31

地下水中的 Cl^- 和 SO_4^{2-} 分别与盐岩的溶解和硫化物矿物的自然溶解有关^[41],可造成TDS的升高。 Mn^{2+} 可能是锰黏土矿物溶解的产物,包括锰橄榄石(Mn_2SiO_4)和菱锰矿(MnCO_3)等的溶解^[42],致使地下水中 Mn^{2+} 升高。因此,F1可视为水岩作用。

F2对 K^+ 和 Cl^- 有较强的正载荷,分别为0.85和0.73,对pH有中等的负载荷(-0.52),解释总方差的12.75%。 K^+ 一般被认为来源于天然矿物,但其容易被粘土吸附和植物利用,导致在地下水中浓度较低,而研究区农业耕作施用肥料包括钾肥和畜禽粪便等^[43],降雨淋滤使 K^+ 进入地下水中,致使地下水中 K^+ 升高。农业废水排放不当进入地下水中,也会造成地下水 Cl^- 升高^[44]。因此,F2可以认为是农业活动的影响。

F3对 Na^+ 和 SO_4^{2-} 有较强的正载荷,分别为0.80和0.76,对TDS和 Cl^- 有弱正载荷,分别为0.46和0.32。 Na^+ 常在生活污水和畜禽粪便中检测到^[44],畜禽养殖场化粪池渗漏和畜禽粪便管理不当导致 Na^+ 进入地下水。 SO_4^{2-} 通常归因于自然条件下硫酸盐沉积物的溶解和硫矿物的氧化,部分采样点 SO_4^{2-} 浓度超过地下水标准限值,可能是生活污水和工业废水排放不当所致^[31]。因此,F3可以被识别为生活污水和工业废水排放的影响。

F4对pH和TFe有中等正载荷,分别为0.52和0.52,对 Mn^{2+} 有较弱的负载荷(-0.17),对 Al^{3+} 有中等负载荷(-0.72)。成都平原上第四纪上更新统含水层和中更新统弱含水层,与上部的农田土壤接触,富含铁锰结核,由于岩性和含水介质渗透性能差异,使地下径流受阻、滞留,形成还原环境,土壤中Fe、Mn矿物或氧化物发生溶解并释放 Fe^{2+} 或 Mn^{2+} ^[45],此外降水和地下水位的季节性波动也能够引起土壤氧化还原电位(Eh)的变化,进而影响地下水中的 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 含量^[46]。另外,在原有冰水扇状平原被破坏的基础上,形成沿河流方向由北西向南东的近代河流冲洪积扇、漫滩、一级阶地和冰水扇状残留平原相间组成的复合冲、洪积平原,来自西部山区的松散沉积物也富含较高的铁锰含量。而 Mn^{2+} 的弱载

荷可能是微生物群落优先促进锰离子的沉淀,也可能是结核中Mn含量低于Fe,而Fe/Mn值与其矿物组成和丰度有关^[47]。 Al^{3+} 可能来自石英及铝硅酸盐矿物的溶解^[18],铝硅酸盐类在全等溶解的情况下的主要产物是高岭石 $[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$,高岭石在酸性条件下可溶出 Al^{3+} 。因此,F4可认为是原生地质环境和水岩作用的复合影响。

F5对 NO_3^- 有较强的正载荷(0.83),对 Mn^{2+} 有中等负载荷(-0.68),对 HCO_3^- 有弱负载荷(-0.34)。地下水中 NO_3^- 与土壤有机氮的转化和化肥的施用有关^[48],春季初施肥后,降雨造成硝酸盐淋溶和氨氮等进入地下水;此外食品、燃料和炼油等工厂排出大量的含氮废弃物,经过生物和化学转换后均形成硝酸盐进入环境中,工业废水中也检测到 NO_3^- ^[49]。研究区部分化工工业废水含锰等金属元素^[19]。因此,F5可以认为是农业与工业的复合影响。

表4 旋转因子载荷矩阵

Table 4 Rotation factor loading matrix

指标	F1	F2	F3	F4	F5
pH	0.19	-0.52	0.19	0.52	0.06
TDS	0.85	0.20	0.46	0.12	0.05
TH	0.98	0.14	0.07	-0.01	-0.01
Na^+	-0.12	0.01	0.80	0.36	-0.14
K^+	0.11	0.85	-0.06	0.03	0.07
Ca^{2+}	0.96	0.11	0.10	-0.01	0.00
Mg^{2+}	0.94	0.12	0.06	0.07	-0.05
Cl^-	0.42	0.73	0.32	0.18	0.01
SO_4^{2-}	0.40	-0.02	0.76	-0.19	0.11
HCO_3^-	0.78	-0.25	-0.16	0.24	-0.34
NO_3^-	0.08	0.15	0.126	-0.14	0.83
Mn^{2+}	0.30	0.16	0.27	-0.17	-0.68
TFe	0.12	-0.07	0.14	0.52	0.03
Al^{3+}	0.05	-0.25	0.13	-0.72	0.10

基于主成分分析识别来源,采用APCS-MLR模型确定各来源具体贡献,源解析结果见图5。

水岩作用(F1)对TDS、TH、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Mn^{2+} 和TFe的贡献率分别为:38.53%、47.02%、21.27%、27.51%、51.55%、32.44%、21.97%、34.58%、29.76%和23.23%,能够

代表地下水中的大部分离子. Ca^{2+} (47.51%) 和 Mg^{2+} (51.55%) 的贡献率较大, 主要由水-岩相互作用和地下水运动驱动^[50]. TDS (38.53%) 贡献率较大, 表明原生地球水化学特征对地下水环境存在一定的影响^[51]. 此外, 地下水位上升后, 岩层中岩盐和石膏等矿物溶解产生的 Cl^- 和 SO_4^{2-} 也可造成 TDS 上升. 张涵等^[19] 提到成都平原上第四纪更新世含水层和中更新世含水层富含铁锰结核, 为研究区地下水提供了潜在的铁锰来源.

农业活动 (F2) 对 HCO_3^- 、TFe、 Mn^{2+} 和 Na^+ 的贡献率分别为 32.59%、26.16%、20.31% 和 17.89%, 对 K^+ (0.00%) 和 Cl^- (0.55%) 的贡献率极低. 与上述主成分分析 K^+ 和 Cl^- 的较强正载荷有明显差异, 可能是 K^+ 和 Cl^- 来源于农业活动的点源污染, 空间异质性较大 (变异系数分别为 1.77 和 1.21), 导致线性回归分析中数据拟合较弱. Fe 和 Mn 自然可能来自含水层中锰和氧化铁矿物的风化作用^[33], 成都平原主要粮食作物以水稻为主, 淹水条件下, Eh 降低诱导铁锰氧化物还原性溶解^[46], 造成水中铁锰含量增大. Na^+ 常在畜禽粪便中检测到, 降雨淋滤导致 Na^+ 进入地下水中.

生活污水和工业废水 (F3) 对 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 TFe 的贡献率分别为 31.93%、23.96%、22.08% 和 31.94%. 由于农村地区污水收集网络不完善, 生活污水管理不当导致 Na^+ 进入地下水. Cl^- 和 SO_4^{2-} 在工业排放废水中被广泛检测到^[52]. Fe 在矿产开采和精炼酸性废水的还原条件的影响下, 沉积物中大量的 Fe 会溶解进入地下水中.

原生地质环境和水岩相互作用 (F4) 主要集中在 SO_4^{2-} (25.76%)、 NO_3^- (42.79%) 和 Al^{3+} (53.84%). 地下水中的 SO_4^{2-} 可归因于天然硫化物矿物的溶解、大气沉积和黄铁矿矿物的沉淀^[53]. 研究区农业土地利用占主导地位 (占总面积的 58.70%)^[19], 经过几十年的耕作, 研究区土壤中储存大量硝酸盐, 而成都平原上第四纪上更新统含水层和中更新统弱含水层, 与上部的农田土壤接触, 地下水位回升将大大缩短硝酸盐进入到含水层的时间^[54]; 同时, Liu 等^[55] 和 Jutglar 等^[55] 研究也表明干湿循环可能导致土壤中储存的硝酸盐进入地下水. Al^{3+} 可能来自铝硅酸盐类的不全等溶解^[17].

农业与工业复合源 (F5) 对除 pH 外的其它指标的贡献率均在 10.00%~20.00%. 其中 Mn^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 NO_3^- 的贡献率分别为 19.77%、16.07%、15.83% 和 13.80%. 工业废水中常检测到 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 NO_3^- , 此外, 研究区部分化工工业废水中含有锰及其它金属元素. Na^+ 和 K^+ 的贡献率分别为 16.67% 和 16.03%,

畜禽粪便中含有 Na^+ , 农业中常施用钾肥, 降雨淋滤会使其进入地下水中.

除上述来源外, 各地下水水质参数的未识别源的贡献率为 0.00%~66.06%, 平均为 15.13%, 对 pH (66.06%) 和 K^+ (47.11%) 的贡献最大, 可能是多种因素共同作用的结果.

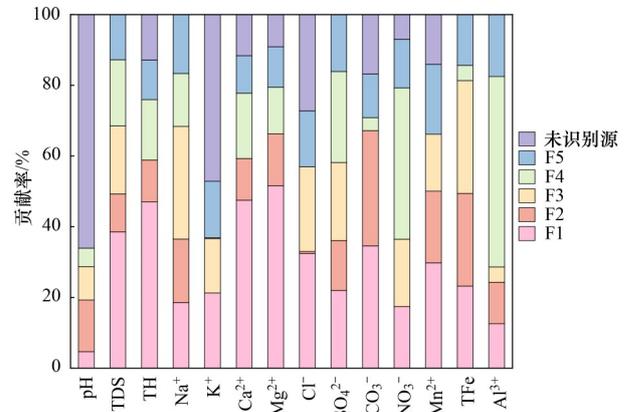


图5 公因子对各指标的贡献率

Fig. 5 Common factor contribution rate of each index

2.3 基于EWQI的地下水水质评价

EWQI被广泛应用于评价水化学参数对整体水质的综合影响^[56]. 在本研究中, 基于采集的78个地下水水样, 选取TDS、TH、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 NO_3^- 、 Mn^{2+} 、TFe和 Al^{3+} 共计13个指标进行水质评价, 通过式(5)~(12)计算得到EWQI值, 采用经典贝叶斯克里金法生成地下水数据集的EWQI空间分布 (图6). 研究区地下水EWQI值范围为35.92~347.62, 平均值为140.00. 其中, 地下水质量为I级和II级分别占比6.41%和74.36%, 总计80.77%达到优良程度, 可直接用于饮用; 地下水质量为III级的占比为11.54%, 中等质量; 地下水质量为IV级和V级分别占比6.41%和1.28%, 地下水质量差或极差, 处于完全非饮用质量等级^[57].

图6中显示EWQI较小值主要分布于西部上游区域, 较大值分布于东南部, 整体呈现沿区域地下水流向呈递增趋势. EWQI较大值采样点包括SY43、SY45、SY52、SY53、SY58和SY73点位. SY43和SY45位于冰水-流水堆积泥质砂砾卵石层 ($Q_{2+3}^{\text{gl+al}}$), 含水层富水性和导水性较弱, 地下水的循环交替较慢, 蒸发较强, 且TFe含量较高; SY52和SY53主要位于广汉市新丰镇的新工业区, SY52的TFe含量较高, SY53的 Mn^{2+} 含量较高, 受原生地质环境影响比较显著^[17]; SY58位于冰水-流水堆积泥质砂砾卵石层 ($Q_{2+3}^{\text{gl+al}}$) 且 Mn^{2+} 含量较高, 受原生地质环境影响比较显著; SY73位于德阳市市区范围且TFe含量较高, 可能受原生地质环境和人类活动影响^[18].

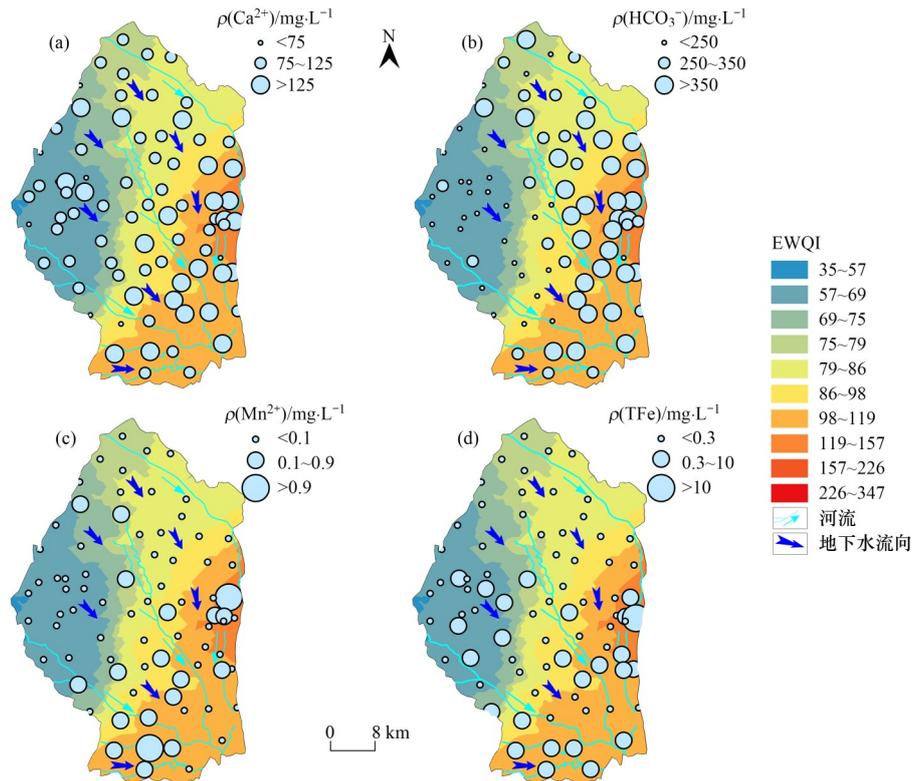


图6 EWQI与水化学参数的分布

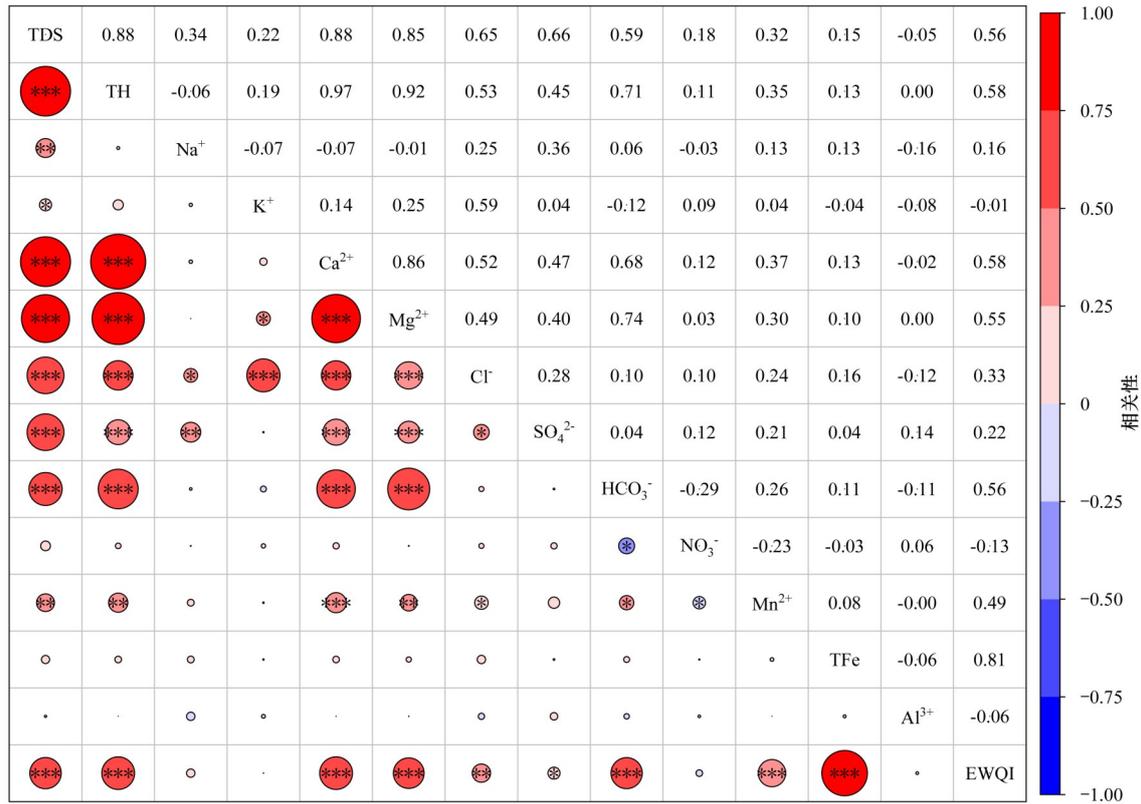
Fig. 6 Distribution of EWQI versus hydrochemical parameters

为了分析地下水指标对EWQI的影响,将13个指标与EWQI进行了Pearson相关分析,结果如图7所示.其中,Na⁺、K⁺、NO₃⁻、Mn²⁺、TFe和Al³⁺与其他各指标相关性较弱,相关性系数均未超过0.50,表明以上指标具有相对独立的影响因素,具备从不同方面反映地下水环境质量状况可行性^[58].TDS、TH、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻和HCO₃⁻之间相关系数大部分均在0.50以上,说明各指标相关性较高,存在信息重叠^[59],其中Cl⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺和Mg²⁺呈中等相关,表明4个指标之间存在较大的同源可能性,Cl⁻和SO₄²⁻分别与岩盐的溶解和硫化物矿物的自然溶解有关,Ca²⁺和Mg²⁺主要由水岩相互作用和地下水运动驱动;TDS、TH、Ca²⁺、Mg²⁺和HCO₃⁻之间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^[60].其中TDS、TH、Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻和Mn²⁺与EWQI呈中等相关性,TFe与EWQI呈强正相关,TFe可能来自于含水层中氧化铁矿物的风化作用,并且人类活动可能加剧红壤中铁的释放输入.相关性分析结果表明研究区地下水水质主要受到原生地质背景的影响,人类活动可能使其加剧,地下水EWQI值主要受Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻、Mn²⁺和TFe浓度控制.

通过对13个水质指标与EWQI进行逐步多元线性回归(表5),发现TFe对EWQI值的贡献最大(模型1, $R^2 = 0.653$),随后依次将Ca²⁺、Mn²⁺和HCO₃⁻与

EWQI进行多元线性回归,增加了回归模型的 R^2 值,分别为0.888、0.962和0.997(模型2~4).此外,Mg²⁺的加入也略微提高了模型的性能(模型5, $R^2 = 0.999$).因此,选择TFe、Ca²⁺、Mn²⁺和HCO₃⁻指标作为评估该研究区地下水水质的基本指标.

根据地下水样品离子浓度的实测值,参照地下水Ⅲ类质量标准,将 $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 划分为<75、75~125和>125 mg·L⁻¹, $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 划分为<250、250~350和>350 mg·L⁻¹, $\rho(\text{Mn}^{2+})$ 划分为<0.10、0.10~0.90和>0.90 mg·L⁻¹, $\rho(\text{TFe})$ 划分为<0.3、0.3~10.0和>10.0 mg·L⁻¹各3个区间,并绘制在图6中.如图6(a)所示, $\rho(\text{Ca}^{2+}) > 125 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的采样点分布较密集,且各浓度Ca²⁺在整个研究区分布较均匀,表明Ca²⁺对水质评价结果有一定影响.HCO₃⁻含量较高的采样点主要集中在中部和东部区域[图6(b)].SY43和SY73样品中HCO₃⁻的浓度较低,但其EWQI值较大,表明HCO₃⁻对水质评价结果影响较小.如图6(c)和6(d)所示,Mn²⁺和TFe浓度较高的采样点均位于东部区域,Mn²⁺浓度低区间和TFe中等浓度区间的采样点多位于西部区域,Mn²⁺和TFe较大浓度区间在中部区域部分分布,表明Mn²⁺和TFe对研究区地下水水质评价结果的影响较大.总体而言,TFe浓度大小分布与EWQI空间分布更为接近,表5中EWQI与TFe的 $R^2 = 0.653$,表明TFe对EWQI值的贡献最大.



*表示 $P < 0.05$, 在 0.05 水平(双侧)上显著相关,**表示 $P < 0.01$, 在 0.01 水平(双侧)上显著相关,***表示 $P \leq 0.001$, 在 0.001 水平(双侧)上显著相关;相关性系数越接近 1, 颜色越接近深红色, 圆也越大;相关性系数越接近 -1, 颜色越接近深蓝色, 圆也越大

图 7 研究区地下水不同水质指标与 EWQI 的相关性

Fig. 7 Correlations between different groundwater quality indicators and the EWQI in the study area

表 5 逐步多元线性回归结果

Table 5 Stepwise multiple linear regression results

模型	线性模型	R^2	P
1	$EWQI = 79.30 + 9.52TFe$	0.653	< 0.001
2	$EWQI = -2.92 + 8.79TFe + 0.77Ca^{2+}$	0.888	< 0.001
3	$EWQI = 10.41 + 8.68TFe + 0.60Ca^{2+} + 34.95Mn^{2+}$	0.962	< 0.001
4	$EWQI = 2.17 + 8.60TFe + 34.52Mn^{2+} + 0.33Ca^{2+} + 0.13HCO_3^-$	0.997	< 0.001
5	$EWQI = 4.55 + 8.62TFe + 34.72Mn^{2+} + 0.25Ca^{2+} + 0.12HCO_3^- + 0.40Mg^{2+}$	0.999	< 0.001

综上所述, 平原区的东南部水质状况较差, TFe 是影响地下水质量的主要贡献指标, Ca^{2+} 次之, 不同指标对区内地下水水质的影响强度依次为: $TFe > Ca^{2+} > Mn^{2+} > HCO_3^-$, 以上指标可作为研究区地下水水质监测及评价主要参考指标.

2.4 人类健康风险评价

依据 EWQI 风险评价结果, 选取 Mn 和 Fe 两项指标进行人类健康风险评价, 确定各指标经饮水途径和皮肤接触途径所引起的个人平均年健康风险^[61].

成人和儿童的人类健康风险评价结果用 HQ 和 HI 表示(表 6). 经饮用途径引起的成人和儿童的 HQ_{Mn} 值分别为 $1.73 \times 10^{-3} \sim 4.27 \times 10^{-1}$ 和 $3.33 \times 10^{-3} \sim 8.24 \times 10^{-1}$, 平均值分别为 2.38×10^{-2} 和 4.59×10^{-2} ; 成人和儿童的 HQ_{Fe} 分别为 $8.30 \times 10^{-4} \sim 5.12 \times 10^{-1}$ 和 $1.60 \times 10^{-3} \sim$

9.87×10^{-1} , 平均值分别为 1.67×10^{-2} 和 3.22×10^{-2} , 饮用途径对成人和儿童的 HQ 均小于 1, 潜在非致癌风险较低; 经皮肤接触途径引起的成人和儿童的 HQ_{Mn} 值分别为 $7.80 \times 10^{-6} \sim 1.93 \times 10^{-3}$ 和 $1.26 \times 10^{-5} \sim 3.11 \times 10^{-3}$, 平均值分别为 1.07×10^{-4} 和 1.73×10^{-4} , 成人和儿童的 HQ_{Fe} 分别为 $1.23 \times 10^{-5} \sim 7.59 \times 10^{-3}$ 和 $1.23 \times 10^{-5} \sim 7.59 \times 10^{-3}$, 平均值分别为 2.48×10^{-4} 和 2.48×10^{-4} , 皮肤接触对成人和儿童的 HQ 也小于 1, 比饮用途径引起的风险低 1~3 个数量级. HI 评价结果显示成人和儿童的 HI_{Mn} 值分别为 $1.74 \times 10^{-3} \sim 4.29 \times 10^{-1}$ 和 $3.35 \times 10^{-3} \sim 8.27 \times 10^{-1}$, 均值分别为 2.39×10^{-2} 和 4.60×10^{-2} ; 成人和儿童的 HI_{Fe} 值分别为 $8.42 \times 10^{-4} \sim 5.19 \times 10^{-1}$ 和 $1.61 \times 10^{-3} \sim 9.95 \times 10^{-1}$, 均值分别为 1.70×10^{-2} 和 3.25×10^{-2} , 结果显示, HI_{Fe} 的最大值大于 HI_{Mn} , 但最小值和平均值均

小于 HI_{Mn} ，可能与Fe的高变异有关(表2)。

总体而言，所有的 HQ_{oral} 、 HQ_{dermal} 和 HI_i 值都小于1，表明潜在的非致癌风险较低。与皮肤接触相比，直接摄入是这些指标危害人类的主要途径。儿童的 HQ_{oral} 、 HQ_{dermal} 和 HI_i 值高于成人，表明在相同环境下

儿童比成人暴露更容易受到伤害。采集的地下水样中无高度潜在风险，地下水水质整体较好。SY73样本对儿童的 HI_i 值接近1，对儿童的慢性风险不可忽视，主要是由于TFe浓度超标，在今后的防治中应重点关注。

表6 饮水及皮肤接触健康风险评价结果

Table 6 Assessment results of health risks through drinking water intake and dermal contact

项目	元素	HQ_{oral}		HQ_{dermal}		HI_i	
		成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
最大值	Mn	4.27×10^{-1}	8.24×10^{-1}	1.93×10^{-3}	3.11×10^{-3}	4.29×10^{-1}	8.27×10^{-1}
	Fe	5.12×10^{-1}	9.87×10^{-1}	7.59×10^{-3}	7.59×10^{-3}	5.19×10^{-1}	9.95×10^{-1}
最小值	Mn	1.73×10^{-3}	3.33×10^{-3}	7.80×10^{-6}	1.26×10^{-5}	1.74×10^{-3}	3.35×10^{-3}
	Fe	8.30×10^{-4}	1.60×10^{-3}	1.23×10^{-5}	1.23×10^{-5}	8.42×10^{-4}	1.61×10^{-3}
平均值	Mn	2.38×10^{-2}	4.59×10^{-2}	1.07×10^{-4}	1.73×10^{-4}	2.39×10^{-2}	4.60×10^{-2}
	Fe	1.67×10^{-2}	3.22×10^{-2}	2.48×10^{-4}	2.48×10^{-4}	1.70×10^{-2}	3.25×10^{-2}

3 结论

(1)研究区地下水中大部分参数存在空间变异性， Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 Mn^{2+} 和TFe的变化范围大，介于1.11~3.72，局部富集程度高，含量变化大。区内地下水化学类型以 $HCO_3^- \cdot SO_4^{2-} \cdot Ca$ 、 $HCO_3^- \cdot Ca \cdot Mg$ 、 $HCO_3^- \cdot SO_4^{2-} \cdot Ca \cdot Mg$ 和 $HCO_3^- \cdot Ca$ 型为主，分别占比33.33%、25.64%、19.23%和14.10%。

(2)提取特征值大于1的5个主成分(累计贡献率为77.31%)，并基于APCS-MLR模型进行来源解析结果显示，污染源贡献率依次为：水岩作用(32.87%)、农业活动(12.75%)、生活污水和工业废水排放(12.40%)、原生地质环境和水岩作用(9.86%)、农业与工业活动(9.44%)和未识别源(22.69%)。

(3) Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 Mn^{2+} 和TFe在不同程度超过国家Ⅲ类地下水水质标准，TH、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 Al^{3+} 在个别样点上超过国家Ⅲ类地下水水质标准。地下水水质评价结果显示地下水质量为Ⅰ级和Ⅱ级占比分别为6.41%和74.36%，达到优良和良好程度，可直接用于饮用；地下水质量为Ⅲ级占比11.54%，质量中等；地下水质量为Ⅳ级和Ⅴ级占比分别为6.41%和1.28%，地下水质量差或极差，处于完全非饮用质量等级；对地下水水质评价结果影响依次为： $TFe > Ca^{2+} > Mn^{2+} > HCO_3^-$ 。

(4)人类健康风险评价结果显示区内潜在非致癌风险较低，均未超过1。与皮肤接触相比，直接摄入是这些指标危害人类的主要途径。在相同环境下儿童比成人暴露更容易受到伤害。整体而言，区内地下水水质状况良好，研究区东南部存在一定的潜在风险，在地下水资源利用中应加强对该地区的地

下水资源管理和污染防治。

参考文献：

- [1] Shrestha S, Kafle R, Pandey V P. Evaluation of index-overlay methods for groundwater vulnerability and risk assessment in Kathmandu valley, Nepal[J]. Science of the Total Environment, 2017, **575**: 779-790.
- [2] Zhai Y Z, Zheng F X, Zhao X B, et al. Identification of hydrochemical genesis and screening of typical groundwater pollutants impacting human health: a case study in northeast China[J]. Environmental Pollution, 2019, **252**: 1202-1215.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Wu W Y, Liao R K, Hu Y Q, et al. Quantitative assessment of groundwater pollution risk in reclaimed water irrigation areas of northern China[J]. Environmental Pollution, 2020, **261**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114173.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 等. 基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2624-2631.
- [9] Kong X L, Wang S Q, Ding F, et al. Source of nitrate in surface water and shallow groundwater around Baiyangdian lake area based on hydrochemical and stable isotopes[J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2624-2631.
- [10] Chang F J, Huang C W, Cheng S T, et al. Conservation of groundwater from over-exploitation-Scientific analyses for groundwater resources management[J]. Science of the Total Environment, 2017, **598**: 828-838.
- [11] Meng L, Zuo R, Wang J S, et al. Apportionment and evolution of pollution sources in a typical riverside groundwater resource area using PCA-APCS-MLR model[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2018, **218**: 70-83.
- [12] 付蓉洁, 辛存林, 于爽, 等. 石河西南子流域地下水重金属来源解析及健康风险评价[J]. 环境科学, 2023, **44**(2): 796-806.

- Fu R J, Xin C L, Yu S, *et al.* Analysis of heavy metal sources in groundwater and assessment of health risks: an example from the southwest sub-basin of the Shiqi river[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(2): 796-806.
- [10] Zhang Z X, Ma C M, Zhang D, *et al.* Integrating the impact of large-scale hydraulic engineering with a sustainable groundwater development strategy: a case study of Zhengzhou city, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **838**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156579.
- [11] Zhang Q Y, Xu P P, Chen J, *et al.* Evaluation of groundwater quality using an integrated approach of set pair analysis and variable fuzzy improved model with binary semantic analysis: a case study in Jiaokou irrigation district, east of Guanzhong basin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **767**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145247.
- [12] 黄鹤, 梁秀娟, 肖霄, 等. 基于粗糙集的支持向量机地下水水质评价模型[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(2): 619-625.
Huang H, Liang X J, Xiao X, *et al.* Model of groundwater quality assessment with support vector machine based on rough set[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(2): 619-625.
- [13] 刘明坤, 童俊, 胡波, 等. 金泽水库上游来水及库区水质变化时空分布特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(10): 4461-4468.
Liu M K, Tong J, Hu B, *et al.* Spatio-temporal distribution characteristics of the water quality in the Jinze reservoir and its inflow[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4461-4468.
- [14] Das B, Pal S C. Assessment of groundwater vulnerability to over-exploitation using MCDA, AHP, fuzzy logic and novel ensemble models: a case study of Goghat- I and II blocks of west Bengal, India[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, **79**(5), doi: 10.1007/s12665-020-8843-6.
- [15] 刘彦龙, 郑易安. 黄河干流水质评价与时空变化分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1332-1345.
Liu Y L, Zheng Y A. Water quality assessment and spatial-temporal variation analysis in Yellow river basin[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1332-1345.
- [16] 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.
- [17] 陈盟, 吴勇, 高东东, 等. 广汉市平原区浅层地下水化学演化及其控制因素[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2016, **46**(3): 831-843.
Chen M, Wu Y, Gao D D, *et al.* Shallow groundwater hydrogeochemical evolution process and controlling factors in plain zone of Guanghan city[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2016, **46**(3): 831-843.
- [18] 陈盟, 吴勇, 高东东, 等. 旌阳区平原区浅层地下水水化学演化及影响因素分析[J]. *科学技术与工程*, 2020, **20**(14): 5506-5513.
Chen M, Wu Y, Gao D D, *et al.* Shallow groundwater hydrogeochemical evolution and influencing factors in plain zone of Jingyang district, Deyang city[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, **20**(14): 5506-5513.
- [19] 张涵, 李奇翎, 郭珊珊, 等. 成都平原典型区地下水污染时空异质性及污染源分析[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(10): 3516-3527.
Zhang H, Li Q L, Guo S S, *et al.* Spatial-temporal heterogeneity and pollution sources of groundwater pollution in typical area of Chengdu plain[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(10): 3516-3527.
- [20] Zhang H, Xu Y, Cheng S Q, *et al.* Application of the dual-isotope approach and Bayesian isotope mixing model to identify nitrate in groundwater of a multiple land-use area in Chengdu plain, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **717**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137134.
- [21] Zhang H, Yang R X, Wang Y, *et al.* The evaluation and prediction of agriculture-related nitrate contamination in groundwater in Chengdu plain, southwestern China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2019, **27**(2): 785-799.
- [22] Sheng D R, Meng X H, Wen X H, *et al.* Contamination characteristics, source identification, and source-specific health risks of heavy metal(loid)s in groundwater of an arid oasis region in northwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **841**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156733.
- [23] Lv J S. Multivariate receptor models and robust geostatistics to estimate source apportionment of heavy metals in soils[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **244**: 72-83.
- [24] 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.
- [25] Pak H Y, Chuah C J, Tan M L, *et al.* A framework for assessing the adequacy of water quality index-quantifying parameter sensitivity and uncertainties in missing values distribution[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **751**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141982.
- [26] Zhang S, Han Y Y, Peng J Y, *et al.* Human health risk assessment for contaminated sites: a retrospective review[J]. *Environment International*, 2023, **171**, doi: 10.1016/j.envint.2022.107700.
- [27] Latha P S. Evaluation of groundwater quality for domestic and irrigation purposes in a coastal alluvial aquifer using multivariate statistics and entropy water quality index approach: a case study from west Godavari delta, Andhra Pradesh (India)[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2022, **81**(10), doi: 10.1007/s12665-022-10387-9.
- [28] Qiao J B, Zhu Y J, Jia X X, *et al.* Distributions of arsenic and other heavy metals, and health risk assessments for groundwater in the Guanzhong plain region of China[J]. *Environmental Research*, 2020, **181**, doi: 10.1016/j.envres.2019.108957.
- [29] Hu G J, Mian H R, Abedin Z, *et al.* Integrated probabilistic-fuzzy synthetic evaluation of drinking water quality in rural and remote communities[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, **301**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113937.
- [30] Zhang Q Y, Qian H, Xu P P, *et al.* Effect of hydrogeological conditions on groundwater nitrate pollution and human health risk assessment of nitrate in Jiaokou Irrigation District[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **298**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126783.
- [31] Zhang H, Cheng S Q, Li H F, *et al.* Groundwater pollution source identification and apportionment using PMF and PCA-APCA-MLR receptor models in a typical mixed land-use area in southwestern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **741**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140383.
- [32] GB/T 14848-2017, 地下水质量标准[S].
- [33] Zhang Y B, Zhang Q L, Chen W F, *et al.* Hydrogeochemical analysis and groundwater pollution source identification based on self-organizing map at a contaminated site[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, **616**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128839.
- [34] 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.
- [35] 涂春霖, 杨润柏, 马一奇, 等. 黔西拖长江流域水化学演化特征及驱动因素[J]. *环境科学*, 2023, **44**(2): 740-751.

- Tu C L, Yang R B, Ma Y Q, *et al.* Characteristics and driving factors of hydrochemical evolution in Tuochangjiang river basin, western Guizhou province [J]. *Environmental Science*, 2023, **44** (2): 740-751.
- [36] 刘元晴, 周乐, 吕琳, 等. 河北省顺平县地下水化学特征及其成因分析[J]. *环境科学*, 2023, **44**(5): 2601-2612.
- Liu Y Q, Zhou L, Lv L, *et al.* Hydrochemical characteristics and control factors of groundwater in Shunping county, Hebei province [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(5): 2601-2612.
- [37] 孙龙, 刘廷玺, 段利民, 等. 平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因[J]. *环境科学*, 2022, **43**(12): 5547-5559.
- Sui L, Liu T X, Duan L M, *et al.* Hydrochemical characteristics and fluorine distribution and causes of different water bodies in Pingshuo mining area [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(12): 5547-5559.
- [38] 王诗语, 孙从建, 陈伟, 等. 典型西北山地-绿洲系统不同水体水化学特征及其水力关系分析[J]. *环境科学*, 2023, **44**(3): 1416-1428.
- Wang S Y, Sun C J, Chen W, *et al.* Analysis of water chemistry characteristics and hydraulic relationships of different water bodies in typical mountain-oasis systems in the Northwest Inland Area [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(3): 1416-1428.
- [39] Jin L, Ye H Y, Shi Y S, *et al.* Using PCA-APCS-MLR model and SIAR model combined with multiple isotopes to quantify the nitrate sources in groundwater of Zhuji, east China [J]. *Applied Geochemistry*, 2022, **143**, doi: 10.1016/j.apgeochem.2022.105354.
- [40] Li X, Huang X, Zhang Y H. Spatio-temporal analysis of groundwater chemistry, quality and potential human health risks in the Pinggu basin of North China plain: evidence from high-resolution monitoring dataset of 2015-2017 [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **800**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149568.
- [41] Jiang Q H, Wang B, Jin G Q, *et al.* The response patterns of riverbank to the components carried by different pollution sources in the river: experiments and models [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, **617**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128903.
- [42] Ghofizadeh M H, Melesse A M, Reddi L. Water quality assessment and apportionment of pollution sources using APCS-MLR and PMF receptor modeling techniques in Three Major Rivers of south Florida [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **566-567**: 1552-1567.
- [43] Vespasiano G, Cianflone G, Romanazzi A, *et al.* A multidisciplinary approach for sustainable management of a complex coastal plain: the case of Sibari plain (southern Italy) [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, **109**: 740-759.
- [44] Ram R, Purtschert R, Adar E M, *et al.* Controls on the $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ input ratio of paleo-groundwater in arid environments: new evidence from $^{81}\text{Kr}/\text{Kr}$ data [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **762**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144106.
- [45] Fan J X, Zhao G L, Sun J X, *et al.* Effect of humic acid on Se and Fe transformations in soil during waterlogged incubation [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **684**: 476-485.
- [46] Bhutiani R, Kulkarni D B, Khanna D R, *et al.* Water quality, pollution source apportionment and health risk assessment of heavy metals in groundwater of an industrial area in north India [J]. *Exposure and Health*, 2016, **8**(1): 3-18.
- [47] Chen R H, Teng Y G, Chen H Y, *et al.* Groundwater pollution and risk assessment based on source apportionment in a typical cold agricultural region in northeastern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **696**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133972.
- [48] Gutiérrez M, Biagioni R N, Alarcón-Herrera M T, *et al.* An overview of nitrate sources and operating processes in arid and semiarid aquifer systems [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **624**: 1513-1522.
- [49] Rao N S, Das R, Gugulothu S. Understanding the factors contributing to groundwater salinity in the coastal region of Andhra Pradesh, India [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2022, **250**, doi: 10.1016/j.jconhyd.2022.104053.
- [50] 陈清飞, 陈安强, 叶远行, 等. 滇池流域土地利用变化对地下水水质的影响[J]. *中国环境科学*, 2023, **43**(1): 301-310.
- Chen Q F, Chen A Q, Ye Y H, *et al.* Effects of land use change on groundwater quality in the Dianchi lake basin [J]. *China Environmental Science*, 2023, **43**(1): 301-310.
- [51] 赵卫东, 赵芦, 龚建师, 等. 宿州矿区浅层地下水污染评价及源解析[J]. *地学前缘*, 2021, **28**(5): 1-14.
- Zhao W D, Zhao L, Gong J S, *et al.* Pollution assessment and source apportionment of shallow groundwater in Suzhou mining area, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, **28**(5): 1-14.
- [52] Ghahremanzadeh H, Noori R, Baghvand A, *et al.* Evaluating the main sources of groundwater pollution in the southern Tehran aquifer using principal component factor analysis [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2018, **40** (4): 1317-1328.
- [53] Liu J T, Peng Y M, Li C S, *et al.* Characterization of the hydrochemistry of water resources of the Weibei plain, northern China, as well as an assessment of the risk of high groundwater nitrate levels to human health [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **268**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115947.
- [54] Min L L, Liu M Y, Wu L, *et al.* Groundwater storage recovery raises the risk of nitrate pollution [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, **56**(1): 8-9.
- [55] Jutglar K, Hellwig J, Stoelzle M, *et al.* Post-drought increase in regional-scale groundwater nitrate in southwest Germany [J]. *Hydrological Processes*, 2021, **35**(8), doi: 10.1002/hyp.14307.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] Adimalla N. Spatial distribution, exposure, and potential health risk assessment from nitrate in drinking water from semi-arid region of south India [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2020, **26**(2): 310-334.
- [59] 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.
- Lv 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.
- [60] 徐进, 何江涛, 彭聪, 等. 柳江盆地浅层地下水硝酸型水特征和成因分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 4142-4149.
- Xu J, He J T, Peng C, *et al.* Characteristics and genesis of NO_3^- type water in shallow groundwater in Liujiang basin [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 4142-4149.
- [61] Zhang Y H, Dai Y S, Wang Y, *et al.* Hydrochemistry, quality and potential health risk appraisal of nitrate enriched groundwater in the Nanchong area, southwestern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **784**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147186.

CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition	ZHANG Jiang-yan (1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China	WU Xue-ping (1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and PM ₁₀ in Chinese Cities	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shandong, and Henan from 2017 to 2021	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM _{2.5} and O ₃ Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963)
PM _{2.5} Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes	MENG Ling-hua (2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, <i>et al.</i> (2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304)
Effect of Different Soil Salinities on N ₂ O Emission: A Meta-analysis	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity	LU Ze-rang, CHEN Jia-yan, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chen, <i>et al.</i> (2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seedling Systems	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)