

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 PM ₁₀ 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 O ₃ 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 O ₃ 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, 陈璞琰, 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, 郎建奎, 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, 王海林, 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)
水环境中抗病毒药物的存在、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, 张坤峰 (2054)
藏东多曲河流域总富集水化学特征及控制因素	李敬杰, 连晨, 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, 吴玲予, 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, 张勇 (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, 孟冠华, 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, 胡恩, 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, 邱小琮, 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 N ₂ O 排放影响: 基于 Meta 分析	黄艺华, 余冬立, 史祯琦, 胡磊, 潘春春 (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配施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)
太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, 邹允兵 (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)
重庆某铁矿区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)

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

(中化地质矿山总局山东地质勘查院, 泰安 271000)

摘要: 泰安市城区岩溶地下水较丰富, 是重要的地下水供水水源地. 基于泰安城区岩溶水和地表水的水化学和氢氧同位素(δD 、 $\delta^{18}O$ 和 3H)特征, 结合Gibbs图解、主要离子比值, 揭示岩溶地下水补给来源、补给年代、循环更新能力及主要的水-岩作用演化过程. 结果表明, 区内岩溶地下水阳离子以 Ca^{2+} 和 Na^+ 为主, 阴离子以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主, K^+ 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 Na^+ 和 SO_4^{2-} 的变异系数较大, 空间差异性较强, Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的含量较稳定. 水化学类型复杂多变, 主要为 $HCO_3 \cdot SO_4$ -Ca型、 $HCO_3 \cdot Cl$ -Ca型和 HCO_3 -Ca型. 大气降水是岩溶地下水和地表水的主要补给来源, 地下水在径流过程中经历了一定的蒸发作用, 但影响性相对较小; 岩溶地下水 3H 含量介于3.0~5.4 TU之间, 与现代水(指1952年核爆以后)水力联系密切, 循环更新能力较强, 更容易遭受污染, 在开发利用时应加强水资源保护. 岩溶地下水水化学演化特征受岩石风化作用、阳离子交替吸附作用和人类活动的共同影响, 水化学成分主要来源于碳酸盐矿物及少量硅铝酸盐矿物的风化溶解, 其演化主要受方解石等贫镁矿物的溶解作用影响, 白云岩风化溶解作用影响较小.

关键词: 岩溶地下水; 水化学特征; 氢氧同位素; 水-岩作用; 泰安城区

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-2096-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202305012

Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes

MENG Ling-hua

(Shandong Geological Prospecting Institute of China Chemical Geology and Mine Bureau, Tai'an 271000, China)

Abstract: The karst groundwater in the Tai'an urban area is abundant and is an important source of groundwater supply. Based on the hydrochemical and hydrogen and oxygen isotope (δD , $\delta^{18}O$, and 3H) characteristics of karst water and surface water in the Tai'an urban area, combined with Gibbs diagrams and main ion ratio, the source of karst groundwater recharge, recharge age, cyclic renewal capacity, and main water-rock interaction evolution process were revealed. The results showed that the main cations were Ca^{2+} and Na^+ , and the main anions were HCO_3^- and SO_4^{2-} in the karst groundwater. The coefficient of variation of K^+ , NO_3^- , Cl^- , Na^+ , and SO_4^{2-} was large, with strong spatial differences, and the content of Ca^{2+} and HCO_3^- was relatively stable. The hydrochemical types were complex and varied, mainly including $HCO_3 \cdot SO_4$ -Ca type, $HCO_3 \cdot Cl$ -Ca type, and HCO_3 -Ca type. Atmospheric precipitation was the main source of supply for karst groundwater and surface water, and groundwater underwent a certain level of evaporation during the runoff process, but its impact was relatively small. The 3H content of karst groundwater ranged from 3.0 to 5.4 TU, closely related to that of modern water (after the 1952 nuclear explosion), with strong cyclic renewal ability and greater susceptibility to pollution; therefore, water resource protection should be strengthened during development and utilization. The hydrochemical evolution characteristics of karst groundwater were jointly affected by the weathering of rocks, alternating adsorption of cations, and human activities. The hydrochemical composition was mainly derived from the weathering and dissolution of carbonate mineral and a small amount of silica aluminate minerals, and its evolution was mainly affected by the dissolution of magnesium-poor minerals such as calcite, whereas the weathering and dissolution of dolomite had little impact.

Key words: karst groundwater; hydrochemical characteristics; hydrogen and oxygen isotopes; water-rock interaction; Tai'an urban area

水文地球化学以水文地质学和地球化学为基础, 研究地下水化学成分的形成、分布及元素的迁移规律, 以此探究地下水的补给来源、演化过程和形成机制, 为地下水资源可持续开发提供科学依据^[1]. 当前, 环境同位素技术已成为水文地球化学研究的重要方法之一^[2], 在地下水研究中应用广泛. 其中运用较广的有D、 ^{18}O 、 3H 、 ^{14}C 、 ^{13}C 、 ^{15}N 和 ^{34}S 等^[3]. 上述同位素中, 氢氧稳定同位素(D和 ^{18}O)是研究地下水补给来源和演化规律的天然示踪剂^[4~7], 不同来源的水体往往具有不同的同位素组成特征. 例如Li等^[8]利用氢氧稳定同位素分析了黄土高原五大流域地下水径流及补给机制, 发现每个流域内地

下水稳定同位素组成总体各不相同; 王雨山等^[9]发现白洋淀不同水体氢氧同位素特征差异较大, 从而揭示了白洋淀湿地水文循环过程. 放射性同位素 3H 产生于大气层上部, 一般常用于定性区分核爆(1952年)前后补给的地下水, 评估地下水更新能力^[10]. 水化学特征表征了地下水与围岩介质之间的相互作用^[11], 主要受大气降水、水文地质条件和含水层岩性等自然因素和人类活动影响. 近年来, 随

收稿日期: 2023-05-03; 修订日期: 2023-07-05

基金项目: 山东省泰安市城区城市地质调查项目(SDGP370900202002000094, DGP370900202102000047)

作者简介: 孟令华(1984~), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为区域水工环地质调查和城市地质调查, E-mail: 401199685@qq.com

着同位素技术在地下水研究中的快速发展, 众多专家学者在地下水起源、循环与演化、水-岩作用过程和不同水体间的相互转化等方面, 往往采用水化学与氢氧同位素相结合的研究方式^[12~15], 相互补充及促进。例如, Moussa 等^[16]利用水化学及 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 、 ^3H 和 ^{14}C 等同位素特征探究突尼斯东北部哈马迈特·纳贝尔沿海平原浅层地下水补给来源及成因; 杨楠等^[17]利用水化学和氢氧稳定同位素研究兴隆县地下水补给来源及水文地球化学演化过程; 袁建飞等^[18]利用水化学、 ^2H 、 ^{18}O 和 ^3H 等研究了西昌市仙人洞地下水补给来源和径流特征, 识别了主要的水-岩作用过程; 张雅等^[19]利用地表水和地下水水化学特征及氢氧同位素分析了济南东源饮用水源地地下水补给来源及主要的水-岩作用控制过程; 彭凯等^[20]利用水化学、 ^2H 和 ^{18}O 等同位素研究了北方岩溶发育区济南市岩溶地下水的补给来源。已有研究成果表明, 结合氢氧同位素和水化学特征的研究方法可以很好地探究地下水演化过程, 从而对水资源合理开发利用和生态环境保护具有重要指示意义。

泰安市位于泰山脚下, 北依省会济南, 是重要的历史文化名城, 也是鲁中地区中心城市之一。泰安城区一带碳酸盐岩隐伏分布区岩溶发育, 地下水资源较丰富, 是泰安市重要的供水水源地。自 20 世纪 80 年代以来, 随着泰安市社会经济的快速发展, 城市用水量不断增加, 岩溶地下水多年超量开采, 产生了较严重的环境地质问题^[21], 严重制约着城市规划布局和可持续发展。因此, 目前对泰安市岩溶地下水的研究多集中在因地下水超采引发的岩溶塌陷^[22~25]和地下水污染^[26~28]等环境地质问题上, 而对城区岩溶地下水水化学、同位素特征及地下水来源、演化的研究鲜有报道。在此背景下, 本文对泰安市城区岩溶地下水进行系统采样, 测定地下水水化学组分及 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 ^3H 等环境同位素值, 查明岩溶地下水水化学和氢氧同位素特征, 以此揭示地下水补给来源、补给年代、循环更新能力和主要的水-岩作用演化过程, 旨在为地下水资源合理开发利用及保护提供科学依据。

1 研究区概况

研究区为泰安市城区, 地处鲁中山区西北部, 为泰山山前倾斜平原及牟汶河冲、洪积平原, 北倚泰山, 南傍大汶河和徂徕山, 处于泰莱断陷盆地的西端, 总体地势西、北部高, 东、南部低^[29]。研究区属暖温带半湿润大陆性季风气候, 1957~2021 年平均气温为 12.9°C , 平均降水量为 $1\,124.35\text{ mm}$, 年内降水主要集中在 7 月和 8 月, 占年降水量的

50.03%, 多年平均蒸发量为 $1\,102.60\text{ mm}$ 。研究区水系较发育, 呈放射状发育于泰山南坡, 东南部为大汶河两大主流之一的牟汶河, 其两岸分布呈树枝状的支流数十条。

区内地下水类型包括第四系孔隙水、碎屑岩类孔隙裂隙水、岩溶水和基岩裂隙水这 4 类, 其中第四系孔隙水分布于泰山山前倾斜平原及河谷两侧的冲洪积平原, 受季节性影响明显, 单井涌水量一般为 $100\sim 500\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$; 古近系碎屑岩类孔隙裂隙水和前寒武系基岩裂隙水富水性较差, 单井涌水量一般小于 $100\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。寒武-奥陶系裂隙岩溶水是研究区的主要含水岩组, 目前仍保障泰安城区周边工农业用水需求, 农灌季节开采量约 $4.84\times 10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。岩溶水含水岩组大部隐伏于泰山断裂以南和牟汶河北岸旧县村以北, 仅在朱家埠村、东夏村附近有零星出露(图 1), 是一个受断裂构造、地层岩性控制的独立岩溶地块。岩溶地下水北部边界为泰山断裂, 断裂北盘为前寒武系侵入岩, 南盘为寒武-奥陶系碳酸盐岩夹碎屑岩(图 1)。西部边界, 寒武系碳酸盐岩夹碎屑岩覆盖于下伏前寒武系侵入岩、变质岩之上, 二者接触带构成西部弱透水性边界。东部以岱道庵断裂为界, 断裂中段以北, 西侧为奥陶系马家沟群厚层碳酸盐岩(灰岩夹白云岩), 东侧为古近系碎屑岩(泥岩夹砾岩), 岱道庵断裂构成隔水边界; 岱道庵断裂南段(羊西村-旧县村), 断裂东、西两侧地层均为寒武-奥陶系, 水力联系较密切。

大气降水入渗补给、第四系孔隙水越流补给和河流渗漏补给是区内岩溶地下水的主要补给来源, 天然状态下岩溶水在地势形成的水头压力作用下以承压状态沿断裂、裂隙、溶洞自北西向南东运动, 与地形坡向及第四系孔隙水流向基本一致, 人工开采和径流排泄是岩溶地下水的主要排泄途径。受地层岩性及岩溶发育条件影响, 岩溶水的赋存和富水性具有较大差异, 一般西部寒武系碳酸盐岩夹碎屑岩(朱砂洞组、馒头组、张夏组和崮山组)区, 富水性较差, 单井涌水量一般小于 $1\,000\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$; 东部寒武-奥陶系厚层碳酸盐岩(炒米店组、三山子组及马家沟群灰岩夹白云岩)隐伏区, 富水性较强, 是主要的取水层位, 单井涌水量一般为 $1\,000\sim 5\,000\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$, 局部地段单井涌水量大于 $5\,000\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。

2 材料与方法

为查明岩溶地下水水化学和氢氧同位素特征, 于 2021 年 1 月和 11 月平水期对研究区岩溶水进行了系统采样, 采集岩溶地下水样品 45 件(编号 S1~S45), 另采集地表水样品 4 件(编号 S46~S49), 用

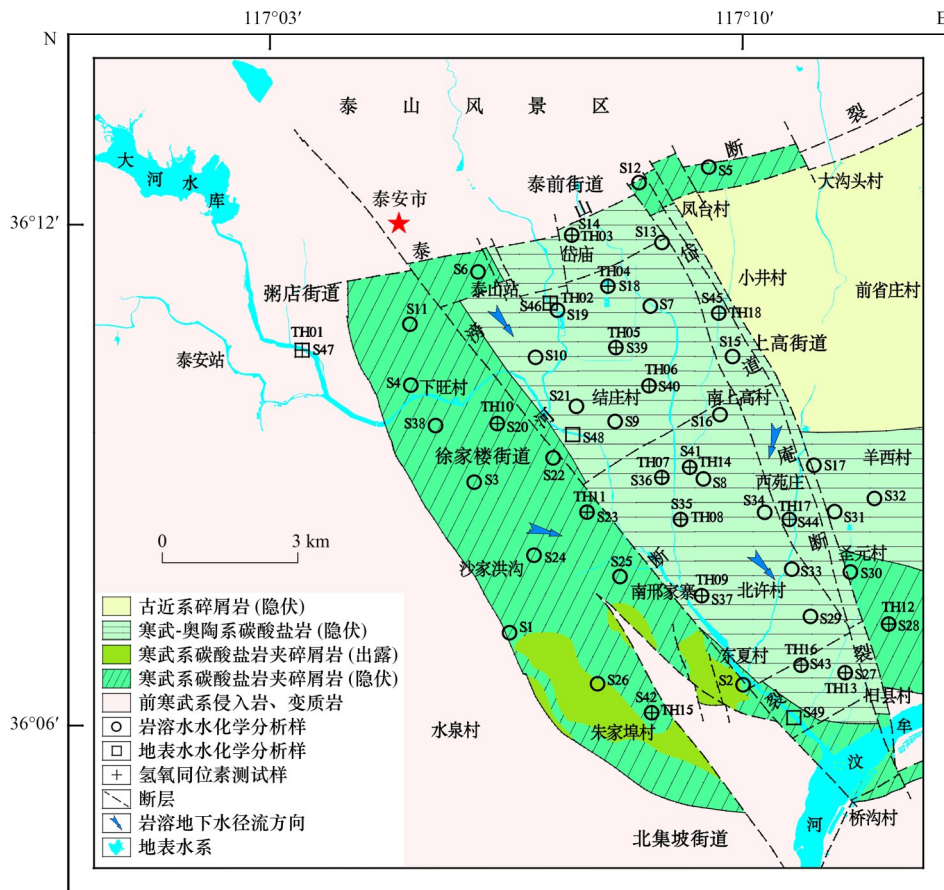


图1 研究区岩溶水分布及采样点位置示意
Fig. 1 Distribution of karst groundwater and location of sampling sites in the study area

于测试阴阳离子等常规组分.沿岩溶地下水主径流方向(自北西向南东)布置采集氢氧同位素样品18件(岩溶水16件,编号TH03~TH18;地表水2件,编号TH01~TH02),测试 δD 、 $\delta^{18}O$ 和 3H .岩溶地下水样品均取自机井,井深34.7~270.3 m.采样点位置见图1.

采样现场利用汉纳多水质测定仪 HZ98494 测试气温、水温、pH 值、电导率、氧化还原电位和溶解氧.取水前用潜水泵抽水 15 min 以上进行洗井,待排出井管 3 倍以上体积的水量且电导率等现场测试指标稳定后再进行采样.样品采用高密度聚乙烯瓶采集,采样时使用样品润洗 3 次,采集后用密封膜密封瓶口,并及时低温送检.

阴阳离子等常规组分的测试由山东省鲁南地质工程勘察院实验测试中心完成,测试仪器为赛默飞世尔 ICS-Aquion 离子色谱仪,测试精度为 $\pm 0.001 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.氢氧同位素样品测试单位为中国地质科学院水文地质环境地质研究所,D 和 ^{18}O 的测试仪器为液态水同位素分析仪(型号 L2130i),利用维也纳平均海洋水标准(VSMOW), δD 和 $\delta^{18}O$ 分析精度分别为 $\pm 0.5\text{‰}$ 和 $\pm 0.2\text{‰}$;氚(3H)的测试仪器为超低本底液体闪烁谱仪(型号 Quantulus1220),分析精度为 ± 1

TU(TU 为氚单位,表示每 10^{18} 个氢原子中含有一个氚原子).

3 结果与讨论

3.1 水化学特征

对岩溶地下水、地表水样品的常规水化学指标进行统计,如表1所示.岩溶水 pH 值 6.88~8.43,平均值为 7.46,整体属于弱碱性水;阳离子平均浓度关系为: $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^{+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^{+}$,以 Ca^{2+} 和 Na^{+} 为主,分别占阳离子总量的 67.55% 和 20.09%;阴离子平均浓度关系为: $\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^{-} > \text{NO}_3^{-}$,以 HCO_3^{-} 和 SO_4^{2-} 为主,分别占阴离子总量的 54.51% 和 24.27%.岩溶水 $\rho(\text{TDS})$ 为 355.00~1 221.55 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 769.26 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其中淡水 [$\rho(\text{TDS}) < 1\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$] 和微咸水 [$\rho(\text{TDS})$ 为 1 000~3 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$] 分别占 88.89% 和 11.11%.岩溶水 $\rho(\text{NO}_3^{-})$ 介于 0.36~61.99 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 23.10 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,与《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)中 III 类水标准 ($> 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 相比,45 件样品中有 17 件样品的 NO_3^{-} 浓度值超标,超标率为 37.78%,最大值是标准限值的 3.10 倍,说明研究区岩溶水存在一定程度的硝酸盐氮污染.从变异系数上看,岩溶地下水中 K^{+} 、 NO_3^{-} 、 Cl^{-} 、

Na⁺和SO₄²⁻的变异系数较大，分别为1.35、0.52、0.47、0.37和0.36，属于高度变异^[30]，特别是K⁺、NO₃⁻和Cl⁻，离子成分波动性较高，空间差异性较强，表明研究区岩溶地下水已受到人类活动等外界因素的影响^[31,32]；而Ca²⁺和HCO₃⁻的变异系数较小，含量较稳定，说明研究区岩溶地下水水化学组分主要受寒武-奥陶系碳酸盐岩含水层灰岩或白云岩等岩石风化溶滤影响。

相比岩溶地下水，地表水中K⁺和Na⁺的平均浓度高于岩溶水，其它离子的平均浓度均低于岩溶

水。其中ρ(TDS)为491~818 mg·L⁻¹，平均值为590 mg·L⁻¹，均为淡水；地表水ρ(NO₃⁻)为1.17~55.50 mg·L⁻¹，平均值为20.04 mg·L⁻¹。地表水中各离子浓度的变异系数普遍小于岩溶水，仅NO₃⁻的变异系数较大，表明地表水水化学组分相对较稳定。可通过各水化学组分的浓度变化情况反映不同水化学演化过程的相似性^[33]，研究区地表水、岩溶地下水中主要阴、阳离子和TDS平均浓度变化趋势基本一致（图2），表明区域地表水和地下水水化学组分来源具有同源性^[34]。

表1 研究区岩溶地下水、地表水主要水化学指标统计¹⁾

指标	岩溶地下水(n = 45)					地表水(n = 4)				
	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数
pH	8.43	6.88	7.46	0.33	0.04	8.20	7.95	8.08	0.13	0.02
TDS	1 221.55	355.00	769.26	195.60	0.25	818.00	491.00	590.00	132.68	0.22
K ⁺	14.00	0.16	1.58	2.13	1.35	13.90	6.06	9.40	2.91	0.31
Na ⁺	98.80	23.90	49.74	18.44	0.37	87.10	51.60	63.03	14.51	0.23
Ca ²⁺	243.95	52.10	167.27	40.45	0.24	137.00	85.70	101.33	20.83	0.21
Mg ²⁺	64.80	14.31	29.03	9.67	0.33	27.80	16.50	22.13	4.13	0.19
Cl ⁻	295.88	18.60	103.78	48.49	0.47	121.00	66.80	86.53	20.81	0.24
SO ₄ ²⁻	309.82	40.30	145.17	52.53	0.36	152.00	113.00	138.50	15.53	0.11
HCO ₃ ⁻	471.04	199.00	326.05	56.59	0.17	317.00	192.00	234.50	49.31	0.21
NO ₃ ⁻	61.99	0.36	23.10	12.04	0.52	55.50	1.17	20.04	20.92	1.04

1)除pH和变异系数无量纲外，其余水化学指标的最大值、最小值、平均值和标准差的单位均为mg·L⁻¹

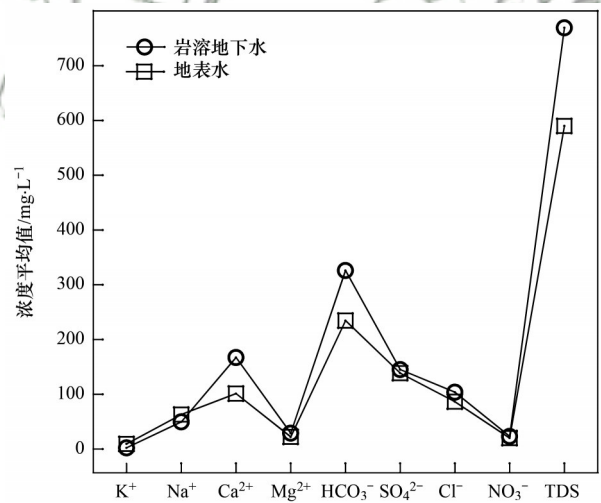


图2 研究区岩溶地下水和地表水各组分浓度平均值

Fig. 2 Average concentration values of various components in karst groundwater and surface water in the study area

Piper 三线图中，岩溶水绝大多数样品的Ca²⁺毫克当量百分数大于50%，分布在钙型区域，有3个样品的Mg²⁺毫克当量百分数大于25%，阴离子分布较分散，HCO₃⁻、SO₄²⁻和Cl⁻均占据了一定的比例，但以HCO₃⁻为主（图3）。按照舒卡列夫分类法，岩溶地下水共有10种水化学类型，以HCO₃·SO₄-Ca型和HCO₃·Cl-Ca型和HCO₃-Ca型为主，分别占岩溶水样

品数的31.1%、17.8%和15.6%，其次还有HCO₃·SO₄·Cl-Ca型和HCO₃·Cl·SO₄-Ca等类型。地下水水化学类型的多样性也反映出水化学组分受人类活动等外界因素影响较显著^[35]。相较于其他类型含水系统，岩溶发育地区地表水与地下水的相互作用更加强烈^[34]，因此地表水和地下水水化学特征基本相似，水化学类型主要为HCO₃·SO₄·Cl-Ca·Na型。

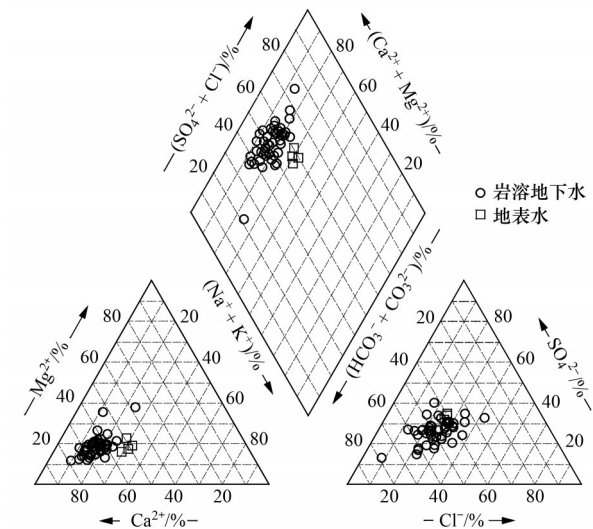


图3 研究区岩溶地下水和地表水Piper三线图

Fig. 3 Piper three line map of karst groundwater and surface water in the study area

3.2 地下水补给来源与补给年代

研究区岩溶地下水和地表水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 变化范围较小, 分布较集中. 其中岩溶水中 $\delta^{18}O$ 分布范围为 $-8.7‰ \sim -7.3‰$, 平均值为 $-8.08‰$, δD 分布范围为 $-64‰ \sim -54‰$, 平均值为 $-58.6‰$; 地表水 $\delta^{18}O$ 分布范围为 $-7.6‰ \sim -6.8‰$, 平均值为 $-7.2‰$, δD 分布范围为 $-53‰ \sim -50‰$, 平均值为 $-51.5‰$ (表 2). 研究区地表水和岩溶地下水样点大多分布于全国大气降水线 (CMWL: $\delta D = 7.9 \delta^{18}O + 8.2$)^[36] 和当地大气降水线 (LMWL: $\delta D = 7.5 \delta^{18}O + 5.4$)^[37] 附近, 向右侧稍有偏移, 且呈线性分布 (图 4), 表明大气降水是本区岩溶地下水和地表水的主要补给来源. 岩溶地下水蒸发线为: $\delta D = 6.33 \delta^{18}O - 7.4$, $R^2 = 0.86$, 其斜率 (6.33) 略小于全国大气降水线斜率 7.9 和当地大气降水线斜率 7.5, 表明岩溶地下水受到一定程度蒸发作用的影响, 使同位素含量发生了变化. 相较于

岩溶地下水, 地表水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 相对偏正, 表明地表水的蒸发分馏效应更为显著, 蒸发作用使地表水体的重同位素更加富集. 氦盈余参数 $d (d = \delta D - 8\delta^{18}O)$ 可以指示补给到地下水的水体受蒸发作用的大小, d 值越小, 蒸发作用越强烈^[38]. 研究区岩溶水氢氧同位素 d 值均为正值, 介于 $4.0‰ \sim 8.4‰$ 之间, 平均值为 $6.1‰$, 小于当地大气降水平均值 ($9.76‰$), 这进一步说明岩溶地下水在径流过程中受到蒸发作用的影响. 此外, Cl^- 浓度和 $\delta^{18}O$ 常被一起作为稳定的示踪剂以揭示不同水体的最初来源和混合作用^[39,40], Cl^- 浓度一般会随着蒸发作用的增强而富集^[17]. 研究区岩溶地下水 $\delta^{18}O$ 和 Cl^- 浓度的关系显示 (图 5), 随着 Cl^- 质量浓度的显著升高, $\delta^{18}O$ 值虽有增大趋势, 然而其变化范围较小, 反映出岩溶地下水虽然经历了一定的蒸发作用, 但影响性相对较小.

表 2 研究区岩溶地下水、地表水氢氧同位素分析结果

Table 2 Results of hydrogen and oxygen isotope analysis of karst groundwater and surface water in the study area

样品编号	采样点位置	井深 / m	$\delta D_{VSMOW} / ‰$	$\delta^{18}O_{VSMOW} / ‰$	$^3H / TU$	$d / ‰$	$\rho(Cl^-) / mg \cdot L^{-1}$
TH01(地表水)	粥店街道上旺小区南洋河		-50	-6.8	5.5 ± 0.9	4.4	74.40
TH02(地表水)	财源街道奈河小区西侧		-53	-7.6	5.8 ± 0.9	7.8	66.80
TH03	岱庙街道岱庙广场	211.6	-62	-8.5	3.0 ± 0.7	6.0	53.56
TH04	岱庙街道东湖公园	186.5	-56	-7.5	4.3 ± 0.7	4.0	93.01
TH05	上高街道施家结庄村	126.4	-58	-8.0	5.2 ± 0.8	6.0	104.30
TH06	上高街道宁家结庄村	157.8	-57	-8.0	5.4 ± 0.8	7.0	150.80
TH07	徐家楼街道宅子村东	172.6	-60	-8.3	3.4 ± 0.8	6.4	113.67
TH08	徐家楼街道万家庄村东	160.4	-58	-8.3	5.3 ± 0.8	8.4	83.71
TH09	北集坡街道赵庄村	62.6	-59	-8.3	5.1 ± 0.8	7.4	123.71
TH10	徐家楼街道如意家园小区	131.0	-54	-7.3	5.1 ± 0.8	4.4	131.03
TH11	徐家楼街道夏家庄村	154.6	-57	-7.9	4.0 ± 0.7	6.2	166.96
TH12	邱家店镇后旧县村北	211.6	-64	-8.7	4.7 ± 0.8	5.6	86.83
TH13	邱家店镇后旧县村西	51.8	-60	-8.2	3.7 ± 0.8	5.6	123.28
TH14	徐家楼街道宅子村东	267.2	-56	-7.7	5.1 ± 0.9	5.6	128.63
TH15	北集坡街道朱家埠村	220.7	-58	-8.2	4.1 ± 0.5	7.6	92.15
TH16	北集坡街道东夏村东	251.3	-57	-7.8	4.8 ± 0.6	5.4	224.24
TH17	省庄镇东苑庄村南	270.3	-61	-8.4	4.9 ± 0.9	6.2	106.83
TH18	上高街道龙河花苑小区西	270.0	-60	-8.2	4.0 ± 0.6	5.6	77.43

另外, 岩溶水点 TH17 (δD 为 $-61‰$, $\delta^{18}O$ 为 $-8.4‰$) 和 TH18 (δD 为 $-60‰$, $\delta^{18}O$ 为 $-8.2‰$) 均处于岱道庵断裂带内 (图 1), 氢氧稳定同位素特征相似, 且水化学类型均为 $HCO_3 \cdot SO_4 \cdot Ca$ 型, TDS 浓度相近, 说明两者可能因为断裂的连通而存在一定的水力联系. 岩溶水点 TH09 (井深 62.6 m, δD 和 $\delta^{18}O$ 分别为 $-59‰$ 和 $-8.3‰$) 位于 TH08 (井深 160.4 m, δD 和 $\delta^{18}O$ 分别为 $-58‰$ 和 $-8.3‰$) 径流方向的南侧, 同位素特征基本一致, 说明不同深度的岩溶含水层之间存在密切的水力联系.

氚 (3H) 是氢的天然放射性同位素, 可以利

用 3H 含量定性判断地下水的补给年代、循环径流条件、混合机制和更新能力等^[41]. 研究区岩溶地下水中均检测出 3H , 且 3H 含量介于 $3.0 \sim 5.4$ TU 之间 (表 2), 平均值为 4.5 TU. 其中有 38% 的样品的 3H 含量 > 5.0 TU ($5.1 \sim 5.4$ TU), 属于现代水, 剩余 62% 的岩溶水点属于 1952 年前补给与最近补给的混合水^[10,41]. 这说明研究区寒武-奥陶系碳酸盐岩岩溶裂隙发育不均匀, 在岩溶发育强烈区, 因地下水资源的开采, 使地下水通过裂隙带与现代水相联系. 如图 1 中 TH05、TH06、TH08、TH09、TH10 和 TH14 等样点 3H 含量 > 5.0 TU, 这

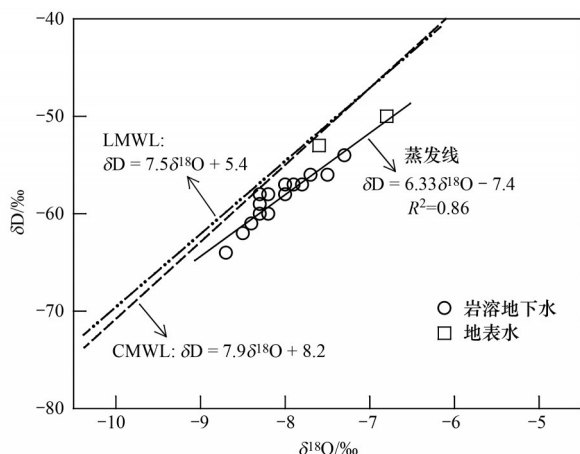


图4 研究区岩溶地下水、地表水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值关系
Fig. 4 Relationships between δD and $\delta^{18}O$ values of karst groundwater and surface water in the study area

些地下水样点均采自社区、村镇目前正在使用的集中供水井(位置见表1),且均位于岩溶较发育区,水资源较丰富,地下水的长期开采加速了其循环交替过程.总体上,研究区作为泰安市供水源地之一,地下水的长期开采与岩溶裂隙的发育使岩溶地下水与现代水(指1952年核爆以后)水力联系密切,地下水径流条件较好,循环交替较快,更新能力强,这也意味着本区岩溶水更脆弱、更容易遭受污染,在开发利用时应加强水资源保护.

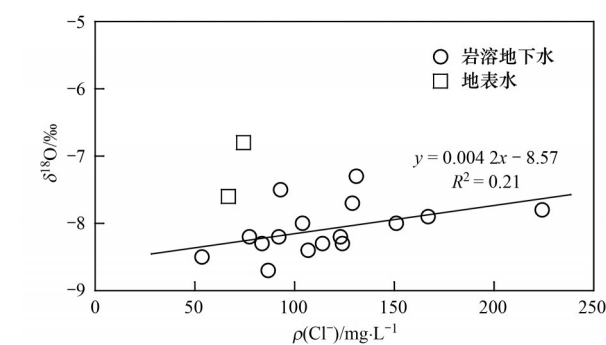
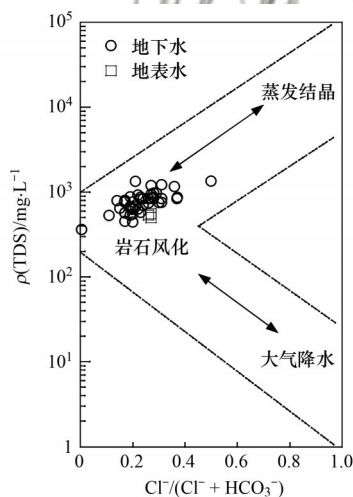


图5 岩溶地下水 $\delta^{18}O$ 和 $\rho(Cl^-)$ 关系
Fig. 5 Relationships between $\delta^{18}O$ and $\rho(Cl^-)$ values of karst groundwater

3.3 水-岩作用及演化过程

3.3.1 岩石风化作用

Gibbs图解是Gibbs于1970年提出的,根据世界河流、湖泊和海洋水TDS与 $Cl^-/(Cl^-+HCO_3^-)$ 及与 $Na^+/(Na^++Ca^{2+})$ 的关系,判断天然水化学成分的主要来源(岩石风化、蒸发结晶和大气降水作用),可以反映地下水水化学的主要形成机制^[42].研究区地表水和岩溶地下水的TDS浓度中等, $Cl^-/(Cl^-+HCO_3^-)$ 和 $Na^+/(Na^++Ca^{2+})$ 值均小于0.5,样点基本落于Gibbs图中间靠左的区域,集中分布在岩石风化端元(图6),表明地表水和岩溶地下水水化学组分的主要控制因素是岩石风化作用,大气降水和蒸发结晶作用的影响较弱.

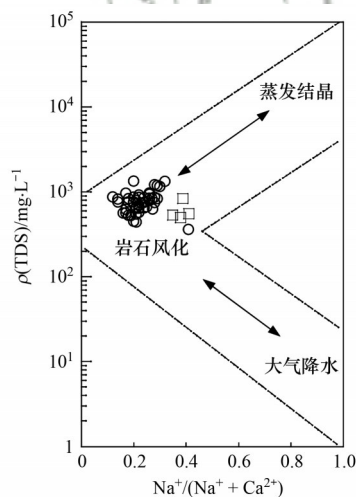


图6 研究区岩溶地下水和地表水 Gibbs图

Fig. 6 Gibbs of karst groundwater and surface water in the study area

3.3.2 离子比值分析

天然条件下,地下水与含水层岩石之间的水-岩作用产生了各种离子,其比值关系可以有效揭示地下水中主要离子来源及演化过程.

(1) Mg^{2+}/Na^+ 与 Ca^{2+}/Na^+ 关系

Mg^{2+}/Na^+ 与 Ca^{2+}/Na^+ 的关系可以用来研究不同岩石风化溶解对地下水离子组分的影响. Gaillardet

等^[43]研究得出碳酸盐岩风化控制单元 Mg^{2+}/Na^+ 和 Ca^{2+}/Na^+ 值接近10和50,硅酸盐岩风化控制单元 Mg^{2+}/Na^+ 和 Ca^{2+}/Na^+ 值接近 0.24 ± 0.12 和 0.35 ± 0.15 ^[44].图7(a)中,岩溶地下水样点 Mg^{2+}/Na^+ 值为 $0.57 \sim 3.30$, Ca^{2+}/Na^+ 值为 $1.63 \sim 8.33$,集中分布在硅酸盐岩与碳酸盐岩控制区域之间,部分样点更靠近碳酸盐岩一端,说明研究区岩溶地下水化学组分

受碳酸盐岩风化溶解控制,同时受硅酸盐岩风化溶解影响,而蒸发岩盐溶解作用微弱,这与本区岩溶含水层岩性为碳酸盐岩夹碎屑岩有关,裂隙岩溶较发育,为碳酸盐岩溶解提供了有利条件.

(2) $N(K^+ + Na^+)$ 与 $N(Cl^-)$ 关系

$K^+ + Na^+$ 与 Cl^- 的毫克当量比值关系可以判断地下水中 K^+ 和 Na^+ 的主要来源,当 K^+ 和 Na^+ 来自岩盐溶解时 $N(K^+ + Na^+) / N(Cl^-) = 1$ [45]. 图 7(b) 中,岩溶地下水

点主要分布于 $N(K^+ + Na^+) / N(Cl^-) = 1$ 线上下两侧,其中分布于 $N(K^+ + Na^+) / N(Cl^-) = 1$ 上方的水点可能与含钠钾的硅铝酸盐矿物(如长石)溶解或阳离子交换作用有关;大部分样点分布于 $N(K^+ + Na^+) / N(Cl^-) = 1$ 的下方,即 Cl^- 相对于 $K^+ + Na^+$ 过量,表明 Cl^- 受其他矿物溶解或人类活动影响而增多,如位于南邢家寨村西的 S25 点,农业种植活动和河流附近生活污染物的排放均可使 Cl^- 相对盈余.

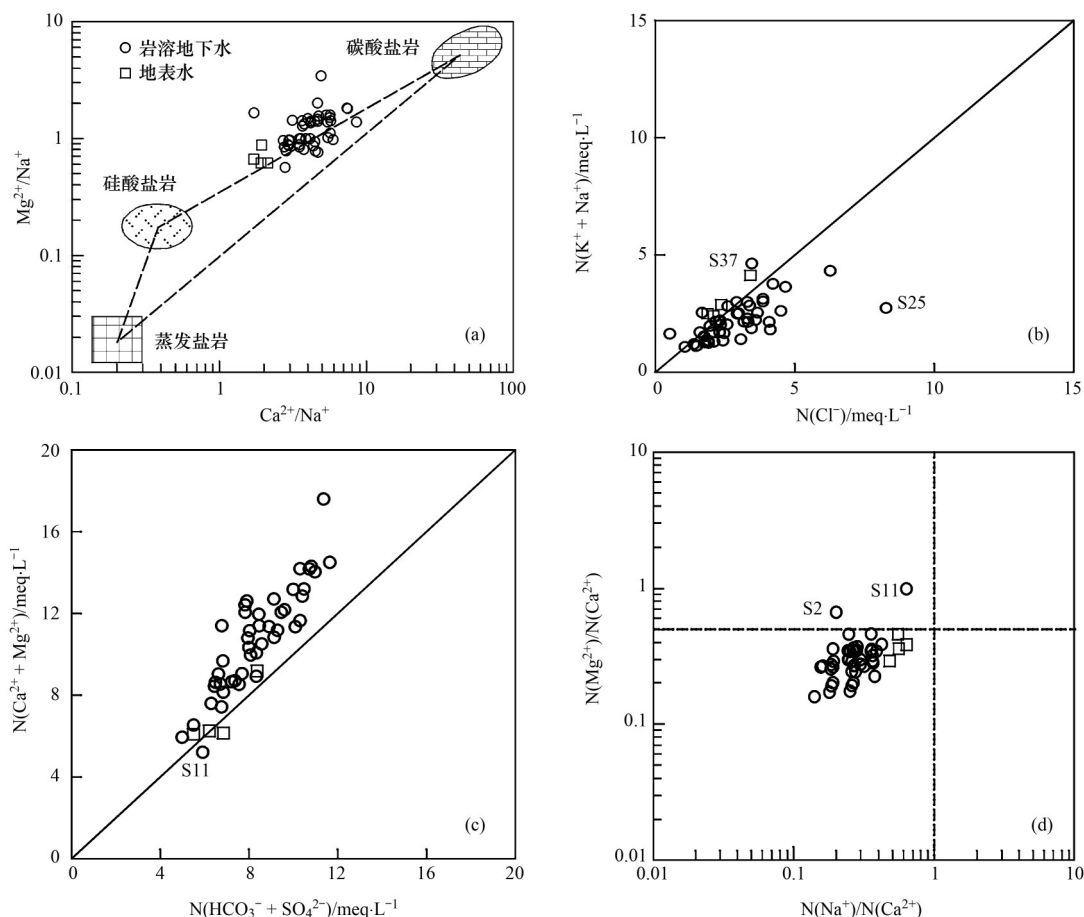


图 7 岩溶地下水中主要离子比例关系

Fig. 7 Proportion relationship of major ions in karst groundwater

(3) $N(Ca^{2+} + Mg^{2+})$ 与 $N(HCO_3^- + SO_4^{2-})$ 关系

$Ca^{2+} + Mg^{2+}$ 与 $HCO_3^- + SO_4^{2-}$ 的毫克当量比值关系可以反映地下水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的来源,当 $N(Ca^{2+} + Mg^{2+}) / N(HCO_3^- + SO_4^{2-})$ 大于 1 时,表明 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐岩的溶解,当 $N(Ca^{2+} + Mg^{2+}) / N(HCO_3^- + SO_4^{2-})$ 小于 1 时,则 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于硅酸盐岩和蒸发岩的溶解[46]. 图 7(c) 中,几乎所有的岩溶地下水样点落于 $N(Ca^{2+} + Mg^{2+}) / N(HCO_3^- + SO_4^{2-}) = 1$ 的上方,仅有 S11 点落于下方, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 相对盈余,说明本区 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐岩的风化溶解.

(4) $N(Mg^{2+}) / N(Ca^{2+})$ 与 $N(Na^+) / N(Ca^{2+})$ 关系

Mg^{2+} / Ca^{2+} 和 Na^+ / Ca^{2+} 的毫克当量比值关系可以反映碳酸盐岩矿物方解石和白云石的风化溶解对地

下水中主要物质组成的贡献.以方解石溶解作用为主的地下水一般具有相对较低的 $N(Mg^{2+}) / N(Ca^{2+})$ 值和 $N(Na^+) / N(Ca^{2+})$ 值,而以白云岩风化溶解作用为主的地下水一般具有较低的 $N(Na^+) / N(Ca^{2+})$ 值和较高的 $N(Mg^{2+}) / N(Ca^{2+})$ 值[17,19];另外, Pu 等[47]认为碳酸盐岩中方解石和白云石成分控制着 $N(Na^+) / N(Ca^{2+})$ 值的变化,仅有白云岩溶解时 $N(Mg^{2+}) / N(Ca^{2+}) = 1$,仅有方解石溶解时 $N(Mg^{2+}) / N(Ca^{2+}) = 0$,当方解石和白云石同时参与溶解时 $N(Mg^{2+}) / N(Ca^{2+}) = 0.5$. 图 7(d) 中,岩溶地下水除 S11 和 S2 点外,均分布在 $N(Mg^{2+}) / N(Ca^{2+}) = 0.5$ 下方, $N(Na^+) / N(Ca^{2+})$ 值小于 0.7,表明研究区水-岩作用以方解石等贫镁矿物的溶解作用为主.在 $N(Mg^{2+}) /$

$N(\text{Ca}^{2+}) = 0.5$ 线上或上方样品(如 S11 和 S2)的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 来源受到白云石或方解石和白云石混合物溶解的影响^[47]。

(5) $N(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ 与 $N(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$ 关系

如前所述, 研究区岩溶地下水存在 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 相对亏损, $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 相对盈余的现象, 这可能是由于地下水中的 K^+ 、 Na^+ 与围岩中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 发生阳离子交替吸附作用引起的。可以通过 $N(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ 与 $N(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$ 比值验证阳离子交换作用是否明显, 若 $N(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-) / N(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$ 值接近 -1, 则地下水环境中存在明显的阳离子交换作用^[48,49]。图 8 中, 大部分岩溶水点沿斜率为 -1.12 的直线周围分布, 只有少数样点偏离该直线 ($y = -1.12x + 1.64$, $R^2 = 0.52$), 但总体偏离程度较小, 说明研究区岩溶地下水中存在较明显的逆向阳离子交换。

3.3.3 人类活动影响

随着城市现代化工农业的快速发展和地下水的过度开采, 导致地下水环境质量不断恶化, 使得水化学组分也随之发生变化。 NO_3^- 是自然界水体受到人为因素影响的重要指示因子, 自然界水体中天然来源的 NO_3^- 质量浓度限值为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 超过这一限值则认为受到人类氮源输入影响^[50,51]。研究区岩溶地下水中 NO_3^- 质量浓度平均为 $23.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 45 件样品中有 40 件超过 NO_3^- 浓度的天然限值, 超限比例高达 89%, 说明研究区岩溶地下水化学组成已经受到人

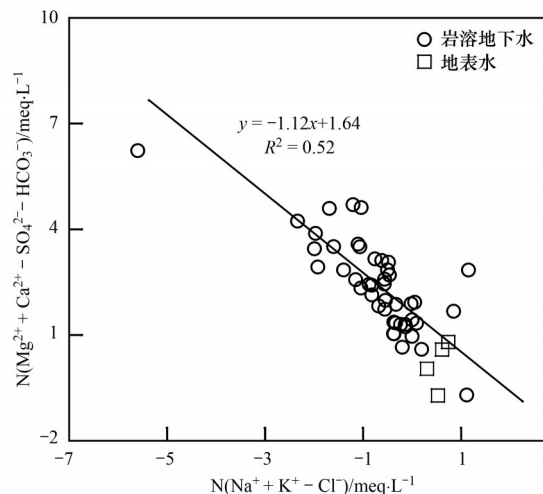


图 8 $N(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ 与 $N(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$ 关系
Fig. 8 Relationship between $N(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ and $N(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$

类活动的影响。 Cl^- 是地下水中极为保守的离子, 在淡水环境下一般不参与化学反应或离子交换, 可示踪水体中化学组分的来源, 一般较高的 Cl^- 浓度与人类活动有关。在 NO_3^- 与 Cl^- 关系中[图 9(a)], NO_3^- 浓度超过天然限值的岩溶水点中, Cl^- 浓度与 NO_3^- 浓度表现出较好的相关性, 即随着 NO_3^- 浓度的升高, Cl^- 浓度也出现增大趋势, 表明人为因素对地下水中 NO_3^- 存在影响, 主要表现为化肥施用等农业生产活动或城市生活污水的排放。在 SO_4^{2-} 与 Cl^- 关系中[图 9(b)], 岩溶水样点的 Cl^- 浓度与 SO_4^{2-} 浓度表现出显著的正相关性, 说明岩溶地下水中 SO_4^{2-} 也受到人类活动(如工业废水和生活污水等)的影响。

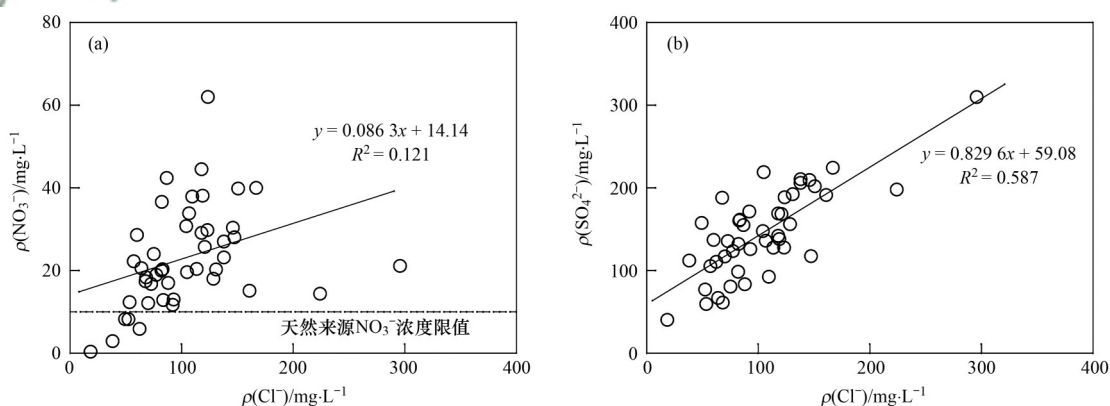


图 9 岩溶地下水中 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 之间的关系

Fig. 9 Relationship between NO_3^- , SO_4^{2-} , and Cl^- in karst groundwater

4 结论

(1) 泰安城区岩溶地下水 pH 值为 6.88 ~ 8.43, 平均值为 7.46, 整体属于弱碱性水; $\rho(\text{TDS})$ 为 $355.00 \sim 1221.55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $769.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 以淡水为主; $\rho(\text{NO}_3^-)$ 介于 $0.36 \sim 61.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,

平均值为 $23.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 超标率为 37.78%; 阳离子以 Ca^{2+} 和 Na^+ 为主, 分别占阳离子总量的 67.55% 和 20.09%, 阴离子以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主, 分别占阴离子总量的 54.51% 和 24.27%; 受外界因素的影响, K^+ 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 Na^+ 和 SO_4^{2-} 的变异系数较大, 空间差异性较强, Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的含量较稳定。除 NO_3^- 外,

地表水水化学组分相对稳定, 主要阴、阳离子和 TDS 平均浓度变化趋势与岩溶地下水基本一致, 水化学组分来源具有同源性。

(2) 岩溶地下水水化学类型复杂多变, 共有 10 种水化学类型, 以 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$ 型、 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型为主, 分别占岩溶水样品数的 31.1%、17.8% 和 15.6%。地表水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Ca}\cdot\text{Na}$ 型。

(3) 岩溶地下水和地表水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围较小, 分布较集中, 样点大多分布于全国大气降水线和当地大气降水线附近, 向右侧稍有偏移, 且呈线性分布, 显示大气降水是其主要补给来源, 岩溶地下水在径流过程中经历了一定的蒸发作用, 但影响性相对较小。岩溶地下水 ^3H 含量介于 3.0 ~ 5.4 TU 之间, 地下水的长期开采与岩溶裂隙的发育使岩溶水与现代水(指 1952 年核爆以后)水力联系密切, 循环交替较快, 更新能力强, 更容易遭受污染, 在开发利用时应加强水资源保护。

(4) 利用 Gibbs 图解和主要离子比值关系等综合研究表明, 泰安城区岩溶地下水水化学演化特征受岩石风化作用、阳离子交替吸附作用和人类活动的共同影响。水化学组分主要控制因素是碳酸盐矿物及少量硅铝酸盐矿物的风化溶解, 其演化主要受方解石等贫镁矿物的溶解作用影响, 白云岩风化溶解作用影响较小; $\text{K}^+\text{+Na}^+$ 相对亏损, $\text{Ca}^{2+}\text{+Mg}^{2+}$ 相对盈余, $\text{N}(\text{Mg}^{2+}\text{+Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}\text{-HCO}_3^-)$ 与 $\text{N}(\text{Na}^+\text{+K}^+\text{-Cl}^-)$ 关系中, 大部分岩溶水点沿斜率为 -1.12 的直线周围分布, 存在较明显的逆向阳离子交换; Cl^- 与 NO_3^- 和 Cl^- 与 SO_4^{2-} 具有较好的相关性, 表明水化学成分受到一定程度的人为因素影响。

参考文献:

- [1] 张保祥, 张超. 水文地球化学方法在地下水研究中的应用综述[J]. 人民黄河, 2019, **41**(10): 135-142.
Zhang B X, Zhang C. Progress on hydrogeochemical method applied in groundwater study[J]. Yellow River, 2019, **41**(10): 135-142.
- [2] 林祚顶. 同位素技术在水文水资源领域的应用[J]. 水利水电技术, 2003, **34**(7): 6-8.
Lin Z D. Application of isotope techniques in hydrology and water resources field[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, **34**(7): 6-8.
- [3] 马宝强, 王潇, 汤超, 等. 同位素技术在地下水研究中的主要应用[J]. 环境工程技术学报, 2021, **11**(5): 919-926.
Ma B Q, Wang X, Tang C, *et al.* Main applications of isotope technology in groundwater study[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, **11**(5): 919-926.
- [4] Ako A A, Shimada J, Hosono T, *et al.* Flow dynamics and age of groundwater within a humid equatorial active volcano (Mount Cameroon) deduced by δD , $\delta^{18}\text{O}$, ^3H and chlorofluorocarbons (CFCs)[J]. Journal of Hydrology, 2013, **502**: 156-176.
- [5] Su C L, Wang Y X, Xie X J, *et al.* An isotope hydrochemical approach to understand fluoride release into groundwaters of the Datong basin, northern China [J]. Environmental Science: Processes & Impacts, 2015, **17**(4): 791-801.
- [6] 马燕华, 苏春利, 刘伟江, 等. 水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用[J]. 环境科学, 2016, **37**(12): 4690-4699.
Ma Y H, Su C L, Liu W J, *et al.* Identification of sulfate sources in the groundwater system of Zaozhuang: evidences from isotopic and hydrochemical characteristics [J]. Environmental Science, 2016, **37**(12): 4690-4699.
- [7] Mohanty A K, Rao V V S G. Hydrogeochemical, seawater intrusion and oxygen isotope studies on a coastal region in the Puri District of Odisha, India[J]. CATENA, 2019, **172**: 558-571.
- [8] Li Z, Coles A E, Xiao J. Groundwater and streamflow sources in China's Loess Plateau on catchment scale [J]. CATENA, 2019, **181**, doi: 10.1016/j.catena.2019.104075.
- [9] 王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 等. 白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 1920-1929.
Wang Y S, Yin D C, Qi X F, *et al.* Hydrogen and oxygen isotopic characteristics of different water and indicative significance in Baiyangdian Lake [J]. Environmental Science, 2022, **43**(4): 1920-1929.
- [10] 李霞, 陈文芳, 万利勤, 等. 河南嵩县北部基岩山区地下水水化学特征和环境同位素特征分析[J]. 地球学报, 2017, **38**(3): 403-412.
Li X, Chen W F, Wan L Q, *et al.* An analysis of hydrochemical characteristics and environmental isotopic characteristics of the groundwater in the bedrock mountain area in northern Songxian county, Henan Province [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, **38**(3): 403-412.
- [11] 苏东, 龚绪龙, 杨磊, 等. 常州市地下水水化学特征与成因分析[J]. 地质论评, 2023, **69**(3): 1039-1049.
Su D, Gong X L, Yang L, *et al.* Hydrogeochemical characteristics and controlling factors of groundwater in Changzhou City [J]. Geological Review, 2023, **69**(3): 1039-1049.
- [12] Bretzler A, Osenbrück K, Gloaguen R, *et al.* Groundwater origin and flow dynamics in active rift systems-A multi-isotope approach in the Main Ethiopian Rift[J]. Journal of Hydrology, 2011, **402**(3-4): 274-289.
- [13] Monjerezi M, Vogt R D, Aagaard P, *et al.* Using $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ isotopes along with major chemical composition to assess groundwater salinization in lower Shire valley, Malawi[J]. Applied Geochemistry, 2011, **26**(12): 2201-2214.
- [14] 郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 等. 南小沟流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义[J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 682-690.
Guo Y W, Tian F Q, Hu H C, *et al.* Characteristics and significance of stable isotopes and hydrochemistry in surface water and groundwater in Nanxiaogou basin [J]. Environmental Science, 2020, **41**(2): 682-690.
- [15] 刘鑫, 向伟, 司炳成. 汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1739-1749.
Liu X, Xiang W, Si B C. Hydrochemical and isotopic characteristics in the shallow groundwater of the Fenhe river basin and indicative significance [J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1739-1749.
- [16] Moussa A B, Zouari K, Marc V. Hydrochemical and isotope evidence of groundwater salinization processes on the coastal plain of Hammamet-Nabeul, north-eastern Tunisia [J]. Physics and

- Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2011, **36**(5-6): 167-178.
- [17] 杨楠, 苏春利, 曾邯斌, 等. 基于水化学和氢氧同位素的兴隆县地下水演化过程研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, **47**(6): 154-162.
- Yang N, Su C L, Zeng H B, *et al.* Evolutional processes of groundwater in Xinglong County based on hydrochemistry and hydrogen and oxygen isotopes [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, **47**(6): 154-162.
- [18] 袁建飞, 徐芬, 刘慧中, 等. 基于水化学和同位素的典型岩溶水系统溶质演化过程——以西昌市仙人洞为例[J]. 科学技术与工程, 2019, **19**(17): 76-83.
- Yuan J F, Xu F, Liu H Z, *et al.* Application of hydrochemical and isotopic analysis to research a typical Karst groundwater system: a case study at Xianrendong, Xichang city [J]. Science Technology and Engineering, 2019, **19**(17): 76-83.
- [19] 张雅, 苏春利, 马燕华, 等. 水化学和环境同位素对济南东源饮用水源地地下水演化过程的指示[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2667-2674.
- Zhang Y, Su C L, Ma Y H, *et al.* Indicators of groundwater evolution processes based on hydrochemistry and environmental isotopes: A case study of the Dongyuan drinking water source area in Ji'nan City [J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2667-2674.
- [20] 彭凯, 刘文, 魏善明, 等. 基于水化学、同位素特征的济南岩溶地下水补给来源研究[J]. 中国岩溶, 2020, **39**(5): 650-657.
- Peng K, Liu W, Wei S M, *et al.* Study on the recharge source of Karst groundwater in Jinan city based on hydrogeochemical and isotopic characteristics [J]. Carsologica Sinica, 2020, **39**(5): 650-657.
- [21] 高宗军, 孙文广, 唐蒙生, 等. 泰安-旧县水源区岩溶水开采与地质环境的关系[J]. 山东地质, 2001, **17**(3-4): 86-91.
- Gao Z J, Sun W G, Tang M S, *et al.* Relation between Karstic water exploitation and geological environment in Tai'an-Jiuxian water source area [J]. Geology of Shandong, 2001, **17**(3-4): 86-91.
- [22] 焦玉国, 陈伟清, 程凤. 山东泰安市岩溶塌陷易发性评估与防治对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, **25**(1): 38-43.
- Jiao Y G, Chen W Q, Cheng F. Risk assessment and governance countermeasures for karst collapse in Shandong Tai'an city [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, **25**(1): 38-43.
- [23] 吴亚楠. 泰安市城区-旧县水源区岩溶塌陷演化过程分析[J]. 中国岩溶, 2017, **36**(1): 94-100.
- Wu Y N. Analysis of Karst collapse development in Tai'an-Jiuxian water source area [J]. Carsologica Sinica, 2017, **36**(1): 94-100.
- [24] 王晓玮, 赵志伟, 陈伟清, 等. 泰安市覆盖型岩溶分布地区岩溶塌陷地下水位预警研究[J]. 中国岩溶, 2017, **36**(6): 795-800.
- Wang X W, Zhao Z W, Chen W Q, *et al.* Research on groundwater level warning for Karst collapse of covered Karst areas in Tai'an City [J]. Carsologica Sinica, 2017, **36**(6): 795-800.
- [25] 汝亮, 张业智, 朱裕振, 等. 泰安市岩溶塌陷特征及探测方法研究[J]. 山东国土资源, 2020, **36**(10): 65-72.
- Ru L, Zhang Y Z, Zhu Y Z, *et al.* Study on the characteristics and detection methods of karst collapse in Tai'an City [J]. Shandong Land and Resources, 2020, **36**(10): 65-72.
- [26] 孟令华. 泰安市城区地下水“三氮”污染特征与健康风险评价[J]. 城市地质, 2023, **18**(2): 153-159.
- Meng L H. Characteristics and health risk assessment of “three nitrogen” groundwater pollution in Tai'an City [J]. Urban Geology, 2023, **18**(2): 153-159.
- [27] 蒋知栋, 任宗兴, 纪风强, 等. 泰安市区主要饮用水源的水质检测与评价[J]. 贵州农业科学, 2012, **40**(12): 214-218, 223.
- Jiang Z D, Ren Z X, Ji F Q, *et al.* Quality detection and evaluation of the main source of drinking water in Tai'an City [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2012, **40**(12): 214-218, 223.
- [28] 孟令华, 孔德金, 王磊, 等. 泰安市城区地下水重金属含量及健康风险评价[J]. 干旱区资源与环境, 2022, **36**(12): 113-118.
- Meng L H, Kong D J, Wang L, *et al.* The heavy metal content and health risk assessment of groundwater in urban area of Tai'an [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, **36**(12): 113-118.
- [29] 孟令华, 杜小亮, 刘乾, 等. 泰安市城区土壤重金属污染特征及风险评价[J]. 中国无机分析化学, 2022, **12**(5): 41-49.
- Meng L H, Du X L, Liu Q, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in soil in urban area of Tai'an [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2022, **12**(5): 41-49.
- [30] 袁宏颖, 杨树青, 丁雪华, 等. 乌拉特灌域地下水水化学离子特征评价及来源分析[J]. 节水灌溉, 2020(2): 67-72, 79.
- Yuan H Y, Yang S Q, Ding X H, *et al.* Evaluation and source analysis of chemical ion characteristics of groundwater in Wulate irrigation area [J]. Water Saving Irrigation, 2020(2): 67-72, 79.
- [31] 薛东青, 谢明忠, 李少虎, 等. 河北省任丘市浅层地下水化学特征及形成机制[J]. 地质论评, 2022, **68**(1): 245-252.
- Xue D Q, Xie M Z, Li S H, *et al.* Chemical characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in Renqiu City, Hebei Province [J]. Geological Review, 2022, **68**(1): 245-252.
- [32] 郑涛, 焦团理, 胡波, 等. 涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 766-775.
- Zheng T, Jiao T L, Hu B, *et al.* Hydrochemical characteristics and origin of groundwater in the central Guohe river basin [J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 766-775.
- [33] 唐金平, 张强, 胡漾, 等. 巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4543-4552.
- Tang J P, Zhang Q, Hu Y, *et al.* Hydrochemical characteristics of Karst groundwater in the mountains of northern Bazhong City, China [J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4543-4552.
- [34] 苏春利, 张雅, 马燕华, 等. 贵阳市岩溶地下水水化学演化机制: 水化学和锶同位素证据[J]. 地球科学, 2019, **44**(9): 2829-2838.
- Su C L, Zhang Y, Ma Y H, *et al.* Hydrochemical evolution processes of karst groundwater in Guiyang City: evidences from hydrochemistry and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios [J]. Earth Science, 2019, **44**(9): 2829-2838.
- [35] 冯建国, 赫明浩, 李贵恒, 等. 泰莱盆地孔隙水水化学特征及其控制因素分析[J]. 环境化学, 2019, **38**(11): 2594-2600.
- Feng J G, He M H, Li G H, *et al.* Analysis of hydrochemical characteristics and controlling factors of porewater in the Tailai basin [J]. Environmental Chemistry, 2019, **38**(11): 2594-2600.
- [36] 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. 科学通报, 1983, (13): 801-806.
- [37] 张保健, 徐军祥, 马振民, 等. 运用H、O同位素资料分析地下热水的补给来源——以鲁西北阳谷-齐河凸起为例[J]. 地质通报, 2010, **29**(4): 603-609.
- Zhang B J, Xu J X, Ma Z M, *et al.* Analysis on groundwater supply sources using hydrogen and oxygen isotope data: a case study of Yanggu-Qihe salient, northwestern Shandong, China [J].

- Geological Bulletin of China, 2010, **29**(4): 603-609.
- [38] 马健, 黄勇, 冀东, 等. 胶州湾北岸不同水体水化学及氢氧同位素特征研究[J]. 科学技术与工程, 2022, **22**(32): 14116-14123.
- Ma J, Huang Y, Ji D, *et al.* Hydrochemistry and hydrogen and oxygen isotope characteristics of different water bodies in the north coast of Jiaozhou Bay [J]. Science Technology and Engineering, 2022, **22**(32): 14116-14123.
- [39] Gattacceca J C, Vallet-Coulomb C, Mayer A, *et al.* Isotopic and geochemical characterization of salinization in the shallow aquifers of a reclaimed subsiding zone: the southern Venice Lagoon coastland[J]. Journal of Hydrology, 2009, **378**(1-2): 46-61.
- [40] 刘伟江, 袁祥美, 张雅, 等. 贵阳市岩溶地下水水化学特征及演化过程分析[J]. 地质科技情报, 2018, **37**(6): 245-251.
- Liu W J, Yuan X M, Zhang Y, *et al.* Hydrochemical characteristics and evolution of karst groundwater in Guiyang City [J]. Geological Science and Technology Information, 2018, **37**(6): 245-251.
- [41] 李双慧, 黄选明, 朱宏军, 等. 基于水化学和环境同位素的准格尔煤田地下水循环特征[J]. 南水北调与水利科技, 2021, **19**(3): 561-571, 589.
- Li S H, Huang X M, Zhu H J, *et al.* Characterization of groundwater circulation in the Jungar coalfield based on water chemistry and environmental isotopes [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, **19**(3): 561-571, 589.
- [42] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. Science, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [43] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, *et al.* Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers[J]. Chemical Geology, 1999, **159**(1-4): 3-30.
- [44] Xiao J, Jin Z D, Zhang F, *et al.* Major ion geochemistry of shallow groundwater in the Qinghai Lake catchment, NE Qinghai-Tibet Plateau [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, **67**(5): 1331-1344.
- [45] Lin M L, Peng W H, Gui H R. Hydrochemical characteristics and quality assessment of deep groundwater from the coal-bearing aquifer of the Linhuan coal-mining district, Northern Anhui Province, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, **188**(4), doi: 10.1007/s10661-016-5199-1.
- [46] 冯建国, 季德帅, 高宗军, 等. 山东淄博大武水源地地下水水化学特征及水质评价[J]. 长江科学院院报, 2020, **37**(9): 18-23.
- Feng J G, Ji D S, Gao Z J, *et al.* Hydrochemical characteristics and water quality evaluation of groundwater in Zibo Dawu water source, Shandong Province [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, **37**(9): 18-23.
- [47] Pu J B, Yuan D X, Xiao Q, *et al.* Hydrogeochemical characteristics in karst subterranean streams: a case history from Chongqing, China [J]. Carbonates and Evaporites, 2015, **30**(3): 307-319.
- [48] Fisher R S, Mullican III W F. Hydrochemical evolution of sodium-sulfate and sodium-chloride groundwater beneath the northern Chihuahuan Desert, Trans-Pecos, Texas, USA [J]. Hydrogeology Journal, 1997, **5**(2): 4-16.
- [49] 林聪业, 孙占学, 高柏, 等. 拉萨地区地下水水化学特征及形成机制研究[J]. 地学前缘, 2021, **28**(5): 49-58.
- Lin C Y, Sun Z X, Gao B, *et al.* Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Lhasa area, China [J]. Earth Science Frontiers, 2021, **28**(5): 49-58.
- [50] Yin S Y, Xiao Y, Han P L, *et al.* Investigation of groundwater contamination and health implications in a typical semiarid basin of north China [J]. Water, 2020, **12**(4), doi: 10.3390/w12041137.
- [51] 肖勇, 莫培, 尹世洋, 等. 北京南郊平原地下水化学特征及成因分析[J]. 环境工程, 2021, **39**(8): 99-107.
- Xiao Y, Mo P, Yin S Y, *et al.* Hydrochemical characteristics and genesis of groundwater in southern suburb of Beijing plain [J]. Environmental Engineering, 2021, **39**(8): 99-107.

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, Shangdong, 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-yu, 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 Seeding Systems	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)