

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, 段良苏, 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, 王林权 (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, 史祺琦, 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)

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^{1,2}, 伏永朋¹, 王宁涛^{1,2}, 谭建民^{1,2*}, 刘亚磊¹

(1. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 武汉 430205; 2. 中国地质大学地质调查研究院, 武汉 430074)

摘要: 丹江流域是南水北调中线工程重要水源涵养区, 深入研究丹江流域水化学特征及其影响因素, 对区域水资源保护及合理利用具有重要意义. 通过对丹江流域水样采集与分析, 综合运用描述性统计、Piper三线图、Gibbs图、离子比例系数法及氢氧同位素的方法, 分析丹江流域水化学特征及其影响因素. 结果表明, 丹江流域水体整体呈弱碱性, 主要水化学类型为HCO₃-Ca型, 中游离子质量浓度及水化学类型变化频繁. 流域水体均受大气降水补给, 地表水受蒸发作用影响明显, 水化学组分受岩石风化溶解、离子交换和人类活动共同影响. Ca²⁺和Mg²⁺源于方解石、白云石及石膏等碳酸盐和硫酸盐矿物溶解, 农业活动是水中硝酸盐的主要来源. 地表水与地下水频繁转化和支流汇入影响是丹江干流空间分布特征差异化的主要原因.

关键词: 丹江流域; 水化学特征; 同位素; 岩石风化; 离子交换

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-2107-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202304053

Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin

ZHANG Zi-yan^{1,2}, FU Yong-peng¹, WANG Ning-tao^{1,2}, TAN Jian-min^{1,2*}, LIU Ya-lei¹

(1. Wuhan Center, China Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 430205, China; 2. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The Danjiang River Basin is an important water conservation area in the middle route of the South-to-North Water Transfer Project. Studying the hydrochemical characteristics and influencing factors of the Danjiang River Basin is of great significance for the protection and rational utilization of regional water resources. In this study, water samples in the Danjiang River Basin were collected and analyzed. Descriptive statistics, Piper trilinear diagram, Gibbs diagram, ion ratio coefficient, and hydrogen and oxygen isotopes were utilized to analyze the hydrochemical characteristics and influencing factors of the Danjiang River Basin. The results showed that the water body in the study area was weakly alkaline, and the main hydrochemical type was HCO₃-Ca. The ion mass concentration and hydrochemical types changed frequently in the middle reaches. The water bodies in the basin were all recharged by atmospheric precipitation, and surface water was obviously affected by evaporation. The hydrochemical compositions were influenced by rock weathering and dissolution, ion exchange, and human activities. Ca²⁺ and Mg²⁺ originated from the dissolution of carbonate and sulfate minerals such as calcite, dolomite, and gypsum. Agricultural activities were the main source of nitrate in the water. The frequent exchange of surface water and groundwater and the influence of tributary inflow were the main reasons for the spatial distribution differentiation of the Danjiang main stream.

Key words: Danjiang River Basin; hydrochemical characteristics; isotope; rock weathering; ion exchange

水资源的日益紧缺使得水的经济价值和社会效益更加突出^[1,2], 水在经济社会发展中的作用也日益凸显^[3,4], 同时人类活动也影响着水资源质量^[5-7]. 相较于平原区水资源, 山区地表水和地下水呈现出较大时空差异^[8-10]. 开展自然和人为活动共同作用下山区地表水-地下水水化学特征及影响因素研究, 是山区水资源保护及合理利用的基础.

在流域尺度上, 国内外学者通常采用同位素结合水化学方法研究水化学特征^[11]. 具体体现在, 水化学类型法用于查明地下水水质状况, 探明地下水水化学类型时空分布规律, 认识区域的水化学特征^[12-14]; 离子比例系数分析法用于探明地下水化学成分变化原因^[15,16]. 在水文地质学中, 同位素技术主要应用于定年、确定物质来源及过程反演等^[17]. 氢氧同位素组成特征在不同来源水体中差异

显著, 因此氢氧同位素主要用于确定水的来源及成因类型^[18].

丹江流域是南水北调中线工程丹江口水库的重要水源涵养区, 因此其水质成为国家重点关注对象. 丹江口水库始建于1958年, 2013年丹江口水库大坝加高后, 于2014年开始蓄水和调水^[19]. 自水库开始蓄水调水后, 水源地周边环境在自然和人类活动影响下发生显著改变. 首先表现在水域面积明显增加, 水域空间分布改变; 其次是土地覆被变化, 耕地和建设用地变化最为显著, 导致植被类型亦发

收稿日期: 2023-04-06; 修订日期: 2023-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(42002262); 中国地质调查局项目(DD20221777, DD20160256)

作者简介: 张子燕(1999-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为流域水环境化学, E-mail: 2416517557@qq.com

* 通信作者, E-mail: 281490085@qq.com

生变化;除此之外,由消落带空间范围变化引起的农业面源污染残留问题,也给丹江流域的水质安全带来隐患^[20-24].此外,丹江流域地层分布广泛,主要为元古代武当岩群、南华系和震旦系,早古生代寒武系、奥陶系、志留系、晚古生代泥盆系和石炭系,中生代白垩系及新生代古近系、新近系和第四系也皆有分布.

针对丹江流域水化学特征研究,较多集中于丹江口库区范围^[19-22],部分以丹江流域内支流为研究对象展开讨论^[23,24].关注丹江流域全域的研究相对较少,赵培等^[25]研究也主要针对地表水化学特征进行讨论.因此,本文以丹江流域地表水、井水和泉水为研究对象,在丹江流域全域范围内,探讨地表水和地下水化学特征,并进一步分析其影响因素和来源,以期认识丹江流域水资源保护及合理开发利用提供科学参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

丹江是汉江最大的支流,发源于秦岭南麓,流经陕西、河南和湖北这3省,最终汇入丹江口水库.流域范围在 $109^{\circ}30' \sim 111^{\circ}30' \text{E}$, $32^{\circ}30' \sim 34^{\circ}30' \text{N}$,海拔在100~2 164 m之间,流域面积 1.07万 km^2 ^[23].流域内有老灌河、滔河、淇河、银花河、武关河等多条支流,河流长度约430 km.

研究区气候类型为亚热带与温带的混合型气候,多年平均气温在 $11 \sim 14^{\circ}\text{C}$ ^[26].多年平均降雨量为791 mm,降水时空分布不均,主要集中在7~9月,高山区降水量最多,其次是低山丘陵区,河谷川道地区降水最少^[24,26].主要土地利用类型为林地和草地,土地利用方式在蓄水前后变化较大.张田田

等^[27]研究表明,2000~2018年丹江流域耕地面积占比不断下降,林地面积先减少后增加,草地则呈现先增加后减少再增加的趋势,而水体面积在丹江口水库蓄水之后逐渐增加.

丹江流域地势整体西北高东南低,地貌构成分别为:低山丘陵地貌、河谷川原地貌和中山地貌^[26].丹江流域南北两侧为变质岩区,中上游主要出露大面积砂砾岩,下游地区主要出露大面积的碳酸盐岩.

1.2 样品采集和分析

本研究于2020年12月对丹江流域干流、主要一级支流及地下水开展取样工作,完成取样82件,其中包括51个地表水、21个井水和10个泉水,具体分布如图1所示.R1~R21为丹江干流上游至下游地表水样点,R22~R25、R26~R27、R28~R33、R34~R46和R47~R51分别为银花河、武关河、淇河、老灌河和滔河不同支流的样点,井水和泉水样点编号分别为J1~J21和Q1~Q10.根据河流位置,本文将丹江干流分为上游商州-南召段(R1~R6)、中游南召-寺湾段(R7~R15)和下游寺湾-马蹬段(R16~R21).

本研究中,水样分析由中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心)完成, K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 采用离子色谱仪(ICS-5000+DC,美国)分析, HCO_3^- 采用滴定法测定. $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 采用液态水同位素分析仪(Los Gatos Research IWA-35EP,美国)进行测定,采用VSMOW标准.

为探明不同水体水化学特征的影响因素,采用Piper三线图分析水化学类型,根据Gibbs图和离子比例系数等方法识别研究区水化学特征;利用氢氧同位素确定水的来源及成因类型.

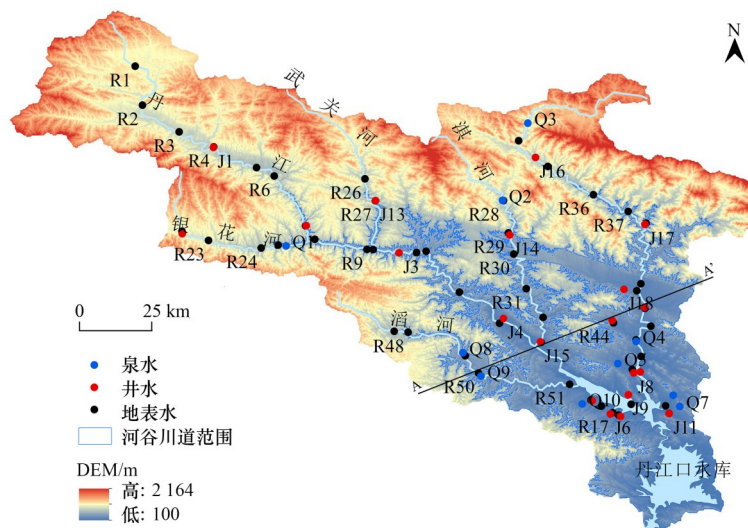


图1 丹江流域水样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Danjiang River Basin

2 结果与分析

2.1 水化学特征及水化学类型

丹江流域水化学组成特征见表1. 整体来看, 丹江流域水体 $\rho(\text{TDS})$ 均小于 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中井水 $\rho(\text{TDS})$ 平均值最大, 为 $532.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 泉水次之, 为 $351.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 地表水最小, 为 $296.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 根据TDS的变异系数发现, 井水(62.74%)与地表水(26.31%)和泉水(23.56%)的变异系数相差较大, 表明井水中溶解离子来源可能不同于地表水和泉水.

地表水、井水和泉水的pH变化范围分别为7.7~8.4、7.2~8.2和7.3~8.4, 平均值分别为8.1、7.6和7.8, 以中性至偏碱性环境为主, 地表水平均值更偏碱性. 地表水和地下水的主要阳离子为 Ca^{2+} , 主要阴离子为 HCO_3^- .

阳离子中, 除了 K^+ , 离子质量浓度平均值都表现出地下水高于地表水的规律; 阴离子中, 井水中的离子质量浓度平均值始终高于其他水体类型;

Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 的平均值变化规律同TDS平均值变化一致. 主要离子质量浓度变化幅度均呈现出地下水(井水、泉水)大于地表水的规律. 除 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- , 井水中 Cl^- 、 NO_3^- , 泉水中 K^+ 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的变异系数均在100%以上, 进一步说明地下水(井水、泉水)中的主要离子来源丰富. 地表水中TN(223.04%)及地下水 NO_3^- (井水: 171.01%, 泉水: 107.42%)的较高变异系数一定程度上也反映了人类活动对水质的影响.

$\rho(\text{SiO}_2)$ 在地表水、井水和泉水中的变化范围分别为: 2.35~9.79、5.73~26.70和8.16~75.60 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值分别为6.16、3.35和5.18 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 泉水中的 SiO_2 变异系数(113.99%)远大于地表水(28.85%)和井水(25.92%). 如图2所示, 研究区主要分布碳酸盐岩类裂隙含水层、碎屑岩类裂隙含水层、岩浆岩裂隙含水层和变质岩裂隙含水层等含水岩组, 且地下水与地表水转换频繁, 因此泉水中可能存在硅酸盐的溶解.

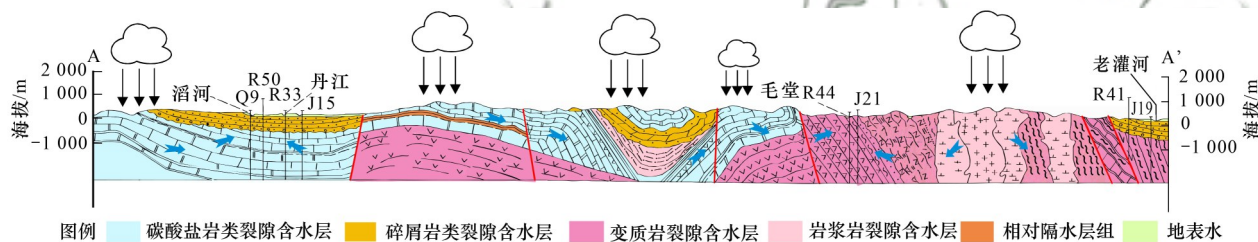


图2 水文地质剖面示意

Fig. 2 Hydrogeological profile in study area

利用Piper三线图了解丹江流域的水文地球化学机制. 如图3所示, 大部分阳离子分布在 Ca^{2+} 区, 其次是 Mg^{2+} 区, 只有一个井水样品分布在 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 区; 从阴离子看, 大部分阴离子样品集中在 HCO_3^- 区; 整体来看, 大部分样品分布在 CaHCO_3 区, 因此丹江流域主要水化学类型为 HCO_3-Ca 型, 个别井水是混合型. Piper图显示, 地下水中 Ca^{2+} 占比整体而言较地表水高, 这可能与地下水与围盐相互作用, 导致碳酸盐岩溶解有关.

为明晰丹江流域水化学的空间分布特征, 沿丹江干流展开讨论. 如图4所示, 结合水化学类型可知, 丹江上游商州-南召段(R1~R6)及下游寺湾-马蹬段(R16~R21)水化学类型单一, 均为 $\text{Ca}\cdot\text{Mg}-\text{HCO}_3$. 中游南召-寺湾段(R7~R15)离子质量浓度之和呈波形变化, 水化学类型变化频繁.

结合支流离子质量浓度变化情况发现, 丹江中游在武关河支流汇入后, R10处八大离子质量浓度之和急剧降低至 $265\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 水化学类型转变为 $\text{Ca}\cdot\text{Mg}-\text{HCO}_3$. 此后八大离子质量浓度之和沿河方向逐

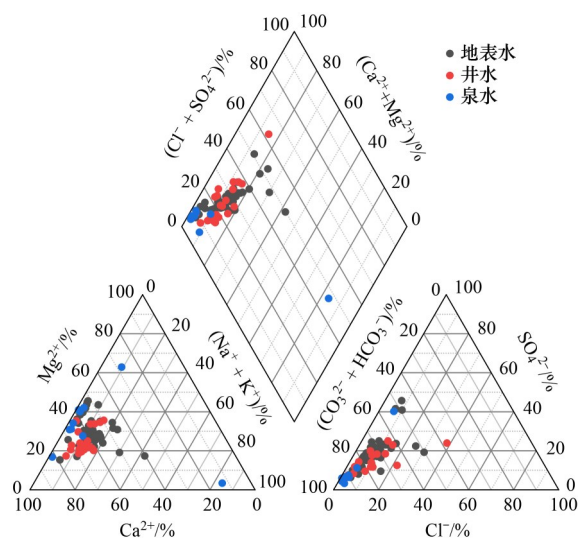


图3 丹江流域地表水、井水和泉水Piper图

Fig. 3 Piper map of surface water, well water and spring water in Danjiang River Basin

渐增加, 在R12处八大离子质量浓度之和达到丹江干流最大值, 为 $630\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 及 HCO_3^- 贡献较大.

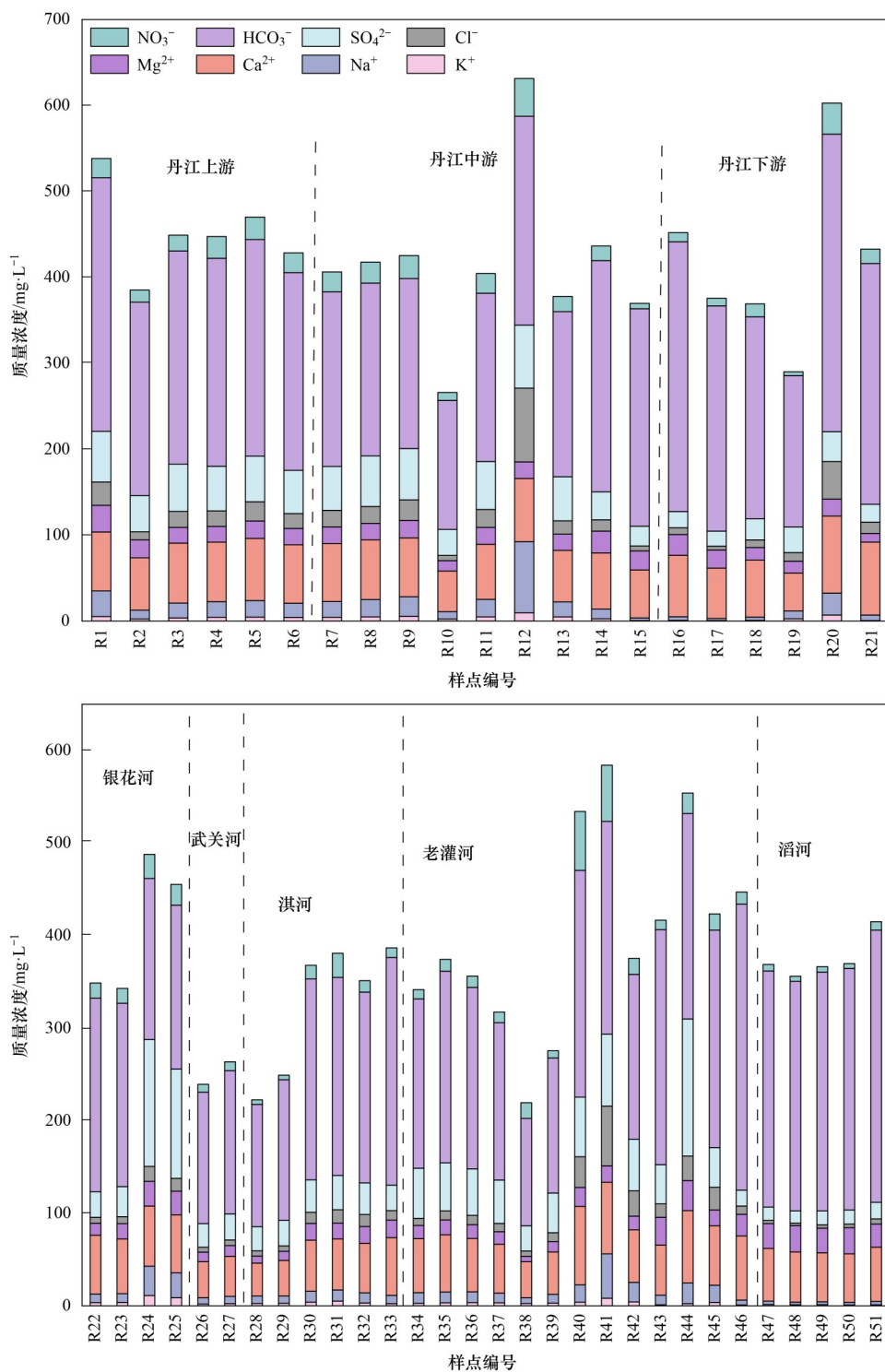


图4 丹江干流和支流地表水离子质量浓度

Fig. 4 Ion concentrations in surface water of main stream and tributaries of Danjiang River

2.2 同位素特征

表2显示了丹江流域水体同位素的统计特征. 在地表水、井水和泉水中, $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 稳定同位素的平均值呈现出泉水最高, 地表水次之, 井水最低的趋势. 而在 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 稳定同位素的变化范围方面, 则呈现出井水最大, 地表水居中, 泉水最小的规律. 具体而言, 地表水、井水和泉水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布范围分别为 $-63.1\text{‰} \sim -56.5\text{‰}$ 和 $-9.1\text{‰} \sim -8.0\text{‰}$ 、

$-67.2\text{‰} \sim -51.4\text{‰}$ 和 $-10.0\text{‰} \sim -7.8\text{‰}$ 、 $-61.0\text{‰} \sim -54.5\text{‰}$ 和 $-8.9\text{‰} \sim -8.1\text{‰}$.

氦盈余是由于水体蒸发破坏 ^2H 与 ^{18}O 之间平衡分馏产生的^[28]. 氦盈余计算基于全球大气降水线^[29], 是反映水体二次蒸发的重要参数^[30,31]. 研究区内井水和泉水氦盈余平均值大于10‰, 地表水氦盈余平均值低于10‰.

为更好揭示地表水、井水和泉水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 稳

表1 丹江流域地表水、井水和泉水水化学参数统计¹⁾

参数	地表水(n = 51)				井水(n = 21)				泉水(n = 10)			
	最大值	最小值	平均值	变异系数	最大值	最小值	平均值	变异系数	最大值	最小值	平均值	变异系数
TDS	526	166	297	26.31	1 890	268	533	62.74	508	244	351	23.56
pH	8.4	7.7	8.1	1.81	8.2	7.2	7.6	3.10	8.4	7.3	7.8	4.15
K ⁺	11.10	0.50	3.49	66.60	9.46	0.56	2.51	84.26	7.31	0.34	1.54	133.99
Na ⁺	82.80	2.68	14.53	90.11	93.30	2.97	23.41	77.83	125.00	1.16	16.50	220.02
Ca ²⁺	89.40	35.60	60.84	19.46	272.00	59.60	109.21	42.78	125.00	17.40	71.26	45.30
Mg ²⁺	32.40	5.71	18.97	32.03	119.00	11.30	27.60	79.21	36.30	2.81	23.99	38.32
Cl ⁻	85.90	2.75	15.63	95.00	270.00	4.42	36.63	149.59	15.30	1.27	6.19	66.84
SO ₄ ²⁻	148.0	13.1	44.1	63.12	229.0	17.7	60.1	80.88	126.0	5.5	29.2	113.25
HCO ₃ ⁻	346	116	220	22.30	478	224	344	22.21	449	195	326	27.16
NO ₃ ⁻	63.60	4.62	17.56	69.40	655.00	8.26	78.28	171.01	57.30	0.19	15.36	107.42
F ⁻	0.45	0.15	0.27	26.58	0.37	0.13	0.25	30.05	11.50	0.10	1.39	242.71
Sr	321	108	204	28.59	665	148	341	38.58	487	80	177	63.57
SiO ₂	9.79	2.35	6.16	28.85	26.70	5.73	17.80	25.92	75.60	8.16	17.26	113.99
TN	133.00	0.19	8.93	226.04	9.11	0.07	3.35	68.82	13.70	1.36	5.18	64.59

1)TDS为总溶解性固体,单位为mg·L⁻¹;Sr的单位为μg·L⁻¹;pH无量纲,变异系数以%形式表示,其他指标单位为mg·L⁻¹

表2 丹江流域山区地表水、井水和泉水氢氧稳定同位素和氘盈余统计特征/‰

项目	地表水			井水			泉水		
	δ ² H	δ ¹⁸ O	d-excess	δ ² H	δ ¹⁸ O	d-excess	δ ² H	δ ¹⁸ O	d-excess
最大值	-56.6	-8.0	11.2	-51.4	-7.8	13.1	-54.5	-8.1	13.1
最小值	-63.1	-9.1	7.6	-67.2	-10.0	8.5	-61.0	-8.9	10.4
平均值	-60.0	-8.7	9.3	-60.8	-9.0	11.2	-57.5	-8.6	11.3
标准差	2.2	0.3	1.1	5.5	0.8	1.4	2.0	0.2	4.1

定同位素之间的联系,除统计特征外,还对水样点的分布特征进行了分析.如图5所示,本文中当地大气降水线(LMWL)参考周毅等^[32]在长江流域的大气降水线:δ²H = 7.41 δ¹⁸O + 6.04.大部分地下水样品位于全球大气降水线(GMWL)^[29]上方,地表水样品位于当地大气降水线下方.运用最小二乘法拟合得到丹江流域山区地表水蒸发线为:δ²H = 6.110 1 δ¹⁸O - 7.045 2 (R² = 0.825 4);地下水蒸发线为:δ²H =

6.970 2 δ¹⁸O + 2.251 1 (R² = 0.963 0).

3 讨论

3.1 主控因素

一般而言,矿物风化、蒸发结晶和大气降水是影响地下水化学的主要因素,这是因为不同矿物具有不同的溶解速率、交换和大气来源,而Gibbs图可以表征以上水化学影响因素^[33].图6显示,丹江流域水体水化学组分主要受岩石风化作用影响.然而Gibbs图中相较于Na⁺ / (Na⁺ + Ca²⁺), Cl⁻ / (Cl⁻ + HCO₃⁻) 相对较小,这主要与水中的Ca²⁺和Mg²⁺与岩石中的Na⁺发生了交换作用有关^[34],这对于研究区水体中污染物的迁移及追溯Na⁺来源具有一定的指示作用.

3.1.1 矿物溶解与沉淀

绘制研究区离子成分比例系数图,如图7(a)所示,大部分水样点分布于1:1线附近,部分井水样点分布于1:1线上方.根据Abdelkader等^[34]研究表明,若N(Ca²⁺ + Mg²⁺) / N(HCO₃⁻ + SO₄²⁻)接近于1,则Ca²⁺和Mg²⁺应是来自于方解石、白云石及石膏等碳酸盐和硫酸盐矿物溶解;若比值大于1,还应有硅酸盐溶解.因此,丹江流域山区地表水、井水和泉水

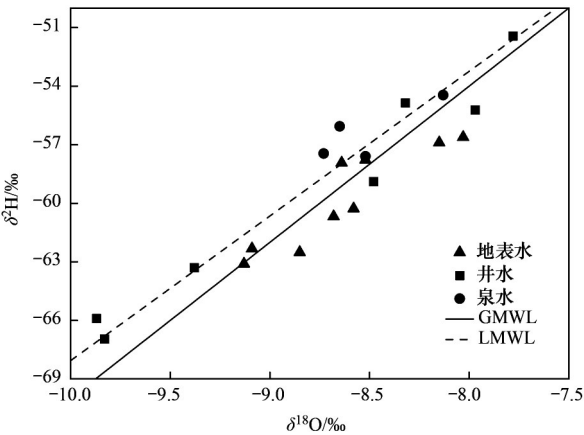


图5 丹江流域地表水、井水和泉水δ²H-δ¹⁸O同位素关系
Fig. 5 The δ²H-δ¹⁸O isotopic relationship of surface water, well water, and spring water in Danjiang River Basin

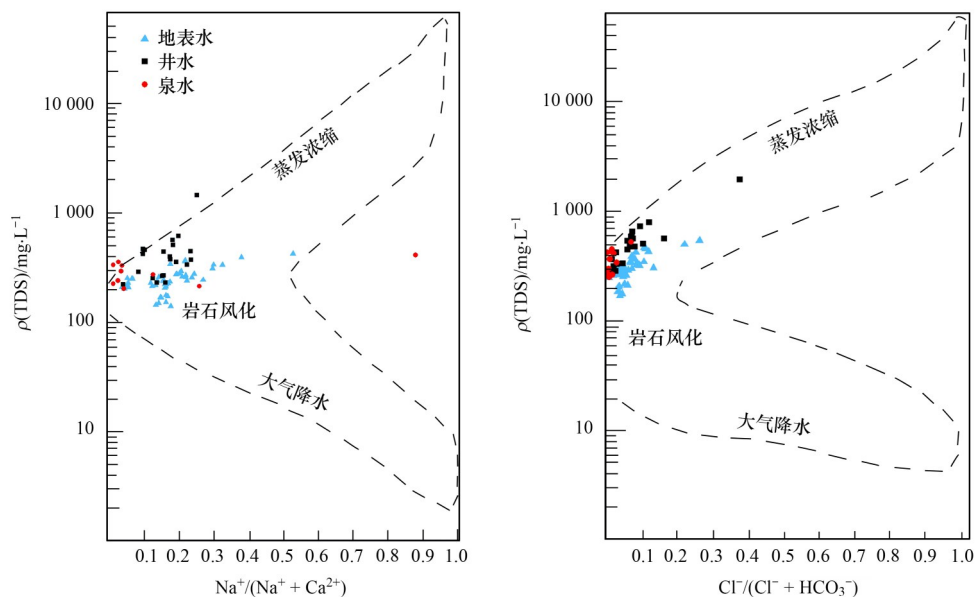


图6 丹江流域地表水和井水和泉水 Gibbs 图

Fig. 6 Gibbs diagram of surface water, well water, and spring water in Danjiang River Basin

水化学特征的主要影响因素为碳酸盐和硫酸盐的风化溶解, 其中井水的水化学特征还受硅酸盐溶解影响, 如 J7、J8、J11、J17 和 J18 均位于冲积层上, 井水成分可能在流经硅酸盐岩地层时发生改变, J20 位于以变石英角斑岩为主的硅酸盐岩地层上, 推测

井水成分受该地层影响.

如图 7(b) 所示, 地表水和泉水样点基本位于 2:1 线上方及 1:1 与 2:1 线中间, 井水样点基本位于 2:1 线上方. 根据 Mayo 等^[35] 研究表明, 当 $N(\text{Ca}^{2+})/N(\text{Mg}^{2+})$ 值接近 1, 表明溶解的碳酸盐矿物主要为白

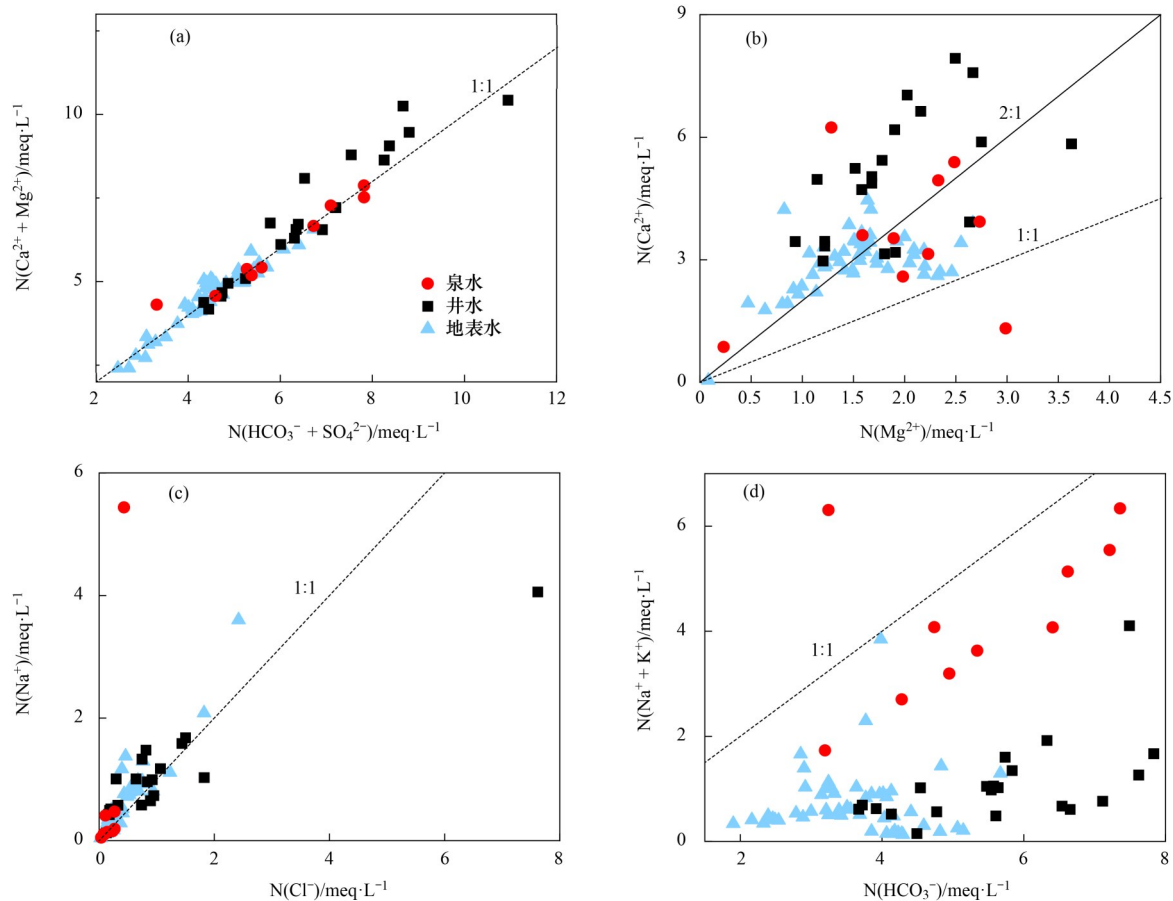


图7 丹江流域地表水、井水和泉水不同离子之间的关系

Fig. 7 Relationship between different ions in surface water, well water, and spring water in Danjiang River Basin

云石, 方解石的溶解会增大该比值; 若比值大于2, 则还存在硅酸盐的溶解^[25]. 因此丹江流域水体溶解的碳酸盐矿物为方解石、白云石, 井水中硅酸盐风化占主导地位, 个别井水水样点位于1:1线下方, 表明其主要受到方解石等贫镁矿物影响. 如图7(c)所示, 大部分水样点位于1:1线下方, 根据Jalali^[36]研究表明, 当 Na^+/Cl^- 关系偏离1:1线, 说明 Na^+ 来源于其他过程.

根据Tesoriero等^[37]研究发现, 硅酸盐的风化、钾长石和钠长石的溶解是 HCO_3^- 的主要来源. 从图7(d)中可知, 水样点基本位于1:1线下方, 结合前面的讨论, 丹江流域地表水和地下水中的 HCO_3^- 主要来源于硅酸盐的风化.

3.1.2 离子交换

如图8(a)所示, 所有样品沿着斜率为-1.59的直线分布, 并且具有中等强度的相关性 $R^2 = 0.6874$, 表明离子交换是丹江流域水质的影响因素之一, 其

中 Na^+ 被释放, Ca^{2+} 被截留. 此外图8(b)中显示, 相较于 Na^+/Cl^- 关系, 在 $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ 关系中, Ca^{2+} 占主导地位的趋势更加明显, 表明离子交换过程中, 陆源性 SO_4^{2-} 与 Ca^{2+} 结合沉淀, 导致石膏欠饱和. 根据图8(c)中 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ 关系所示, 丹江流域 Na^+ 另一来源为碳酸盐矿物的溶解. 图8(d)显示, 所有样品都位于1:1线以下, 进一步表明 Na^+/K^+ 对研究区水化学的主要贡献.

氯碱指数(CAI1和CAI2)反映阳离子交替吸附的方向和强弱; 两者均为正, 表明水中的 Na^+ 和 K^+ 与土壤中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 交换; 两者均为负, 表明水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 与土壤中的 Na^+ 和 K^+ 发生交换作用; 指数绝对值大小代表交替强弱. 图9显示84%样点的氯碱指数值为负值, 且CAI1绝对值高, CAI2接近0, 表明水中 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 与围岩中的 Na^+/K^+ 发生交换.

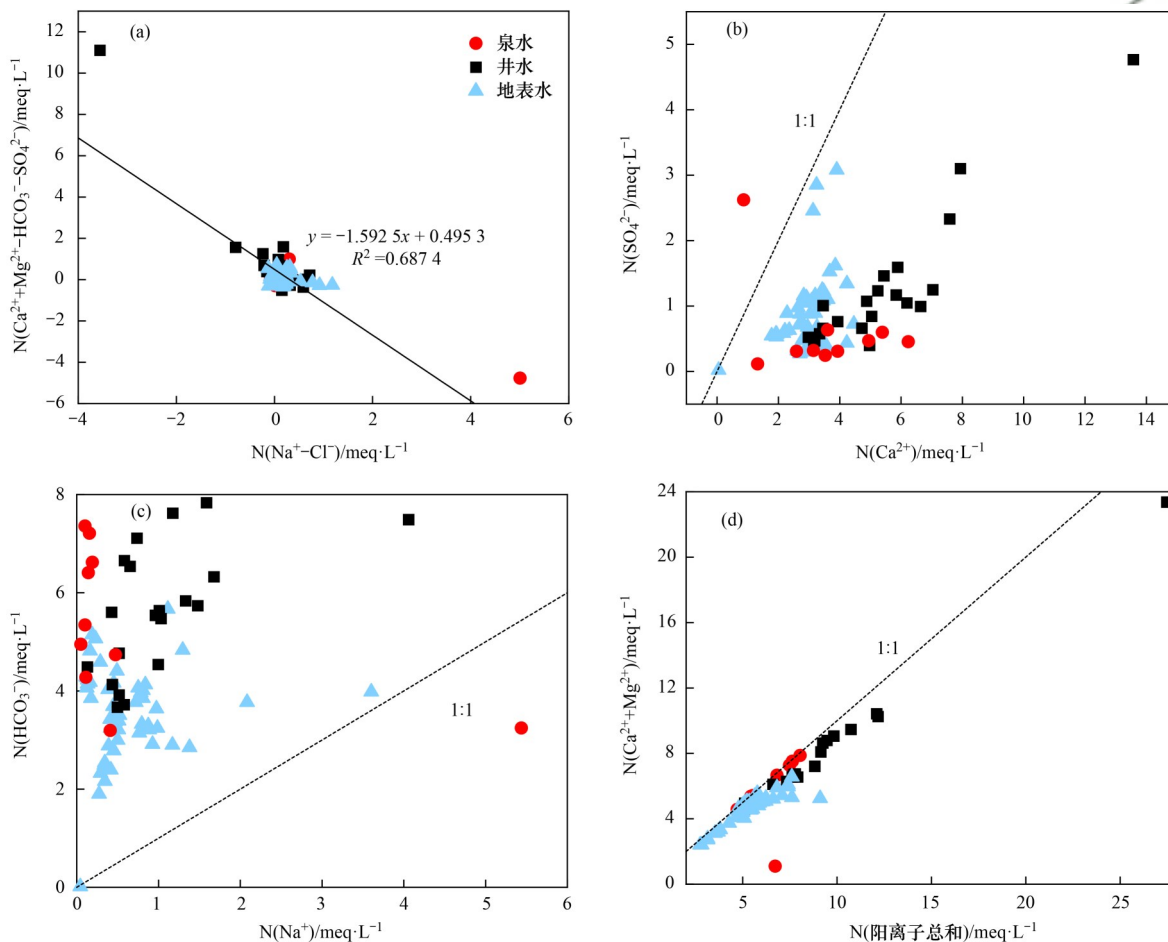


图8 丹江流域地表水、井水及泉水离子比例关系

Fig. 8 Ion proportion of surface water, well water, and spring water in Danjiang River Basin

3.1.3 人类活动影响

硝酸盐是地下水中最普遍的污染物之一^[38~40], 长期饮用含高浓度硝酸盐的水, 会增加人类罹患胃癌的可能性^[41]. $\rho(\text{NO}_3^-)$ 在天然水体中一般低于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 但其具有高溶解性和易于迁移的特点, 随

着人类活动影响会导致水体中 NO_3^- 质量浓度增加^[42], 因此水中 NO_3^- 一般可表征人类活动对水化学的影响^[20]. 农业上肥料及农药不当使用, 生活污水和工业废水的任意排放等均是地下水硝酸盐污染的重要原因^[43~45]. 根据前面的讨论可知, 硝酸盐含量分布

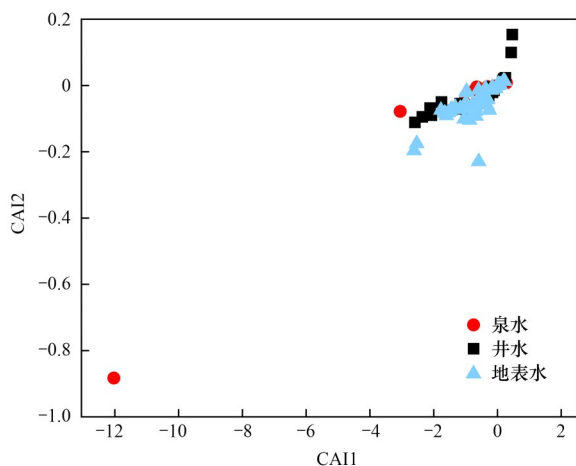


图9 丹江流域地表水、井水和泉水的氯碱指数

Fig. 9 Chlor-alkali index map of surface water, well water, and spring water in Danjiang River Basin

变化规律为：井水>地表水>泉水。以往研究也表明，丹江流域内土地利用类型大部分经由耕地转化为其他类型^[19-23,27]，因此丹江流域内水体中硝酸盐可能来源于耕地种植过程中使用的农业氮肥。

3.2 不同水体补给来源及蒸发强度

$\delta^{18}\text{O}$ 与 Cl^- 的关系可以指示地下水的水文运移作用^[46,47]。水体 $\delta^{18}\text{O}$ 与 Cl^- 关系存在以下趋势：① Cl^- 质量浓度急剧增加， $\delta^{18}\text{O}$ 值变化不大，是溶滤与蒸发混合作用的结果^[48]；②随着 Cl^- 质量浓度的适度变化， $\delta^{18}\text{O}$ 值急剧增加，这反映了蒸发作用对水体的影响，因为蒸发作用可以在适度改变 Cl^- 的情况下改变水体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值^[49]；③ $\delta^{18}\text{O}$ 值不伴随 Cl^- 质量浓度变化而变化。

Cl^- 与 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系如图10所示，研究区地表水主要呈现出 Cl^- 质量浓度适度变化， $\delta^{18}\text{O}$ 富集的特征，因此地表水受蒸发作用较大。根据 $\delta^{18}\text{O}$ 的富集情况，井水的 Cl^- 与 $\delta^{18}\text{O}$ 关系可分为2组，第一组 $\delta^{18}\text{O}$ 富集，

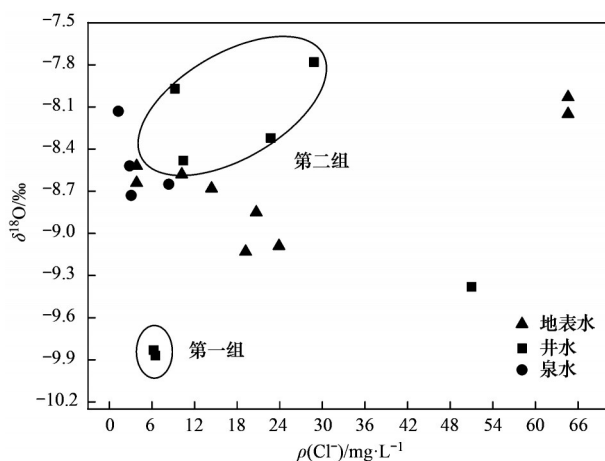
图10 丹江流域地表水、井水和泉水 $\delta^{18}\text{O}$ 与 Cl^- 关系

Fig. 10 Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and Cl^- of surface water, well water, and spring water in Danjiang River Basin

Cl^- 质量浓度接近，该井水样点均位于南秦岭地层分区上，含水层类型均为碎屑岩类裂隙孔隙水；第二组整体上 Cl^- 质量浓度随 $\delta^{18}\text{O}$ 值增加而增大，4个井水样点分属4种含水层类型，表明该变化可能是溶滤作用引起的；J4样点处 Cl^- 质量浓度显著高于其他井水，推测周边人类活动可能是该水样点 Cl^- 质量浓度偏高的原因。研究区泉水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化不伴随 Cl^- 质量浓度变化，表明泉水可能是由于侧向补给水与深层地下水混合所致。

地表水、井水和泉水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素关系显示，这3种水体同位素组成接近大气降水线且同位素变化范围相似，表明均接受大气降水补给且水力联系密切。降水过程中强烈的蒸发会导致降水水汽盈余变小^[50]。如图11所示，丹江流域地表水的蒸发作用较为强烈，与 Cl^- 与 $\delta^{18}\text{O}$ 关系得出的结果一致。

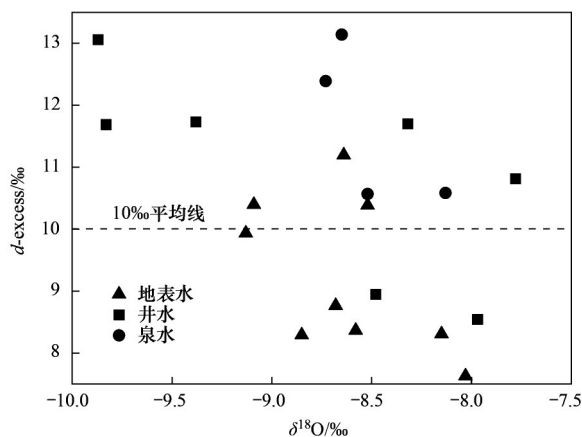
图11 丹江流域地表水、井水和泉水 $d\text{-excess}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 关系

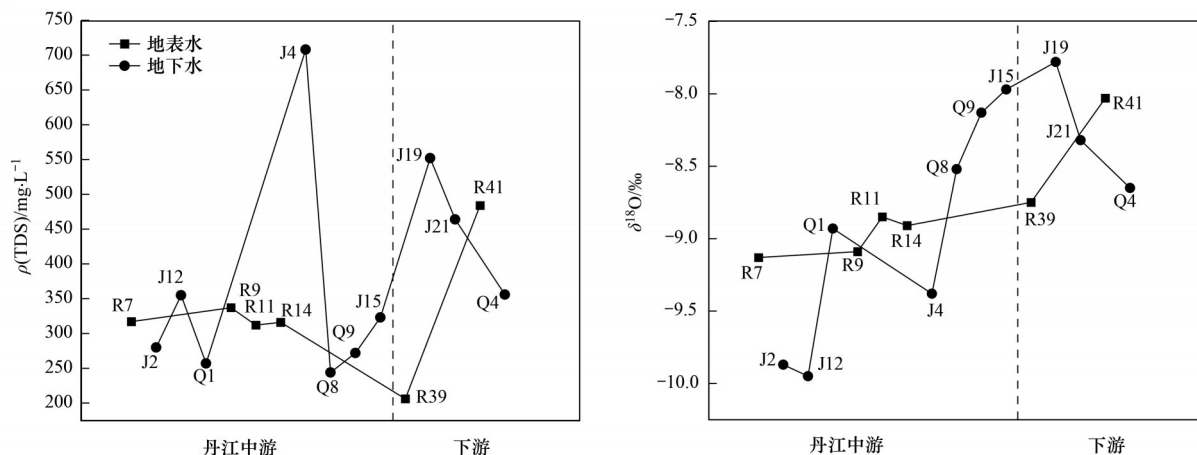
Fig. 11 Relationship between $d\text{-excess}$ and $\delta^{18}\text{O}$ surface water, well water, and spring water in Danjiang River Basin

3.3 地表水与地下水转化关系

通过分析研究区水体水化学及同位素特征，发现丹江中游和下游水化学特征空间差异显著。以 TDS 和 $\delta^{18}\text{O}$ 为示踪剂，分析丹江中下游地表水和地下水转化关系。

如图12所示，丹江中游地下水中 TDS 与 $\delta^{18}\text{O}$ 呈波动型变化，推测丹江中游地下水补给来源及循环过程存在差异。J12水样点处 TDS 值升高但 $\delta^{18}\text{O}$ 迅速贫化，推断其可能接受侧向径流补给；Q1水样点处 TDS 降低， $\delta^{18}\text{O}$ 富集且值高于地表水，推断为接受地表水和大气降水补给；J4水样点处 TDS 显著升高而 $\delta^{18}\text{O}$ 迅速贫化，推断其可能接受侧向径流补给，且受到人类活动干扰较大。Q8、Q9及 J15水样点处 TDS 及 $\delta^{18}\text{O}$ 呈增加趋势，且表现出地下水值高于地表水，两者之间存在一定的转化，但补给关系还需借助水力梯度进一步明确。

丹江下游主要由老灌河支流汇入，以老灌河为

图 12 研究区地下水与地表水 $\delta^{18}\text{O}$ 与 TDS 沿程变化Fig. 12 Changes in $\delta^{18}\text{O}$ and TDS of groundwater and surface water in study area

例研究丹江下游地表水与地下水转化关系. 该区域整体上 TDS 及 $\delta^{18}\text{O}$ 呈下降趋势, 水样点 J21 处 TDS 及 $\delta^{18}\text{O}$ 值与地表水接近, 推测该处地表水补给地下水; 水样点 Q4 处 $\delta^{18}\text{O}$ 值降低, 推测可能接受 $\delta^{18}\text{O}$ 更为贫化的侧向径流补给.

4 结论

(1) 丹江流域水体均受大气降水补给, 地表水受蒸发作用影响明显. 研究区大部分地表水和地下水呈弱碱性, HCO_3^- 和 Ca^{2+} 是不同水体的主要阴阳离子, 水化学组分受矿物溶解、离子交换和人类活动共同制约.

(2) 研究区地下水水化学组成主要受岩石风化影响, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 来自于方解石、白云石和石膏等碳酸盐和硫酸盐矿物的溶解; 农业活动是水中硝酸盐的主要来源.

(3) 研究区干流水化学特征空间差异显著, 表现为水化学类型复杂、离子质量浓度变化剧烈, 主要与地下水与地表水的频繁转化以及支流汇入有关.

参考文献:

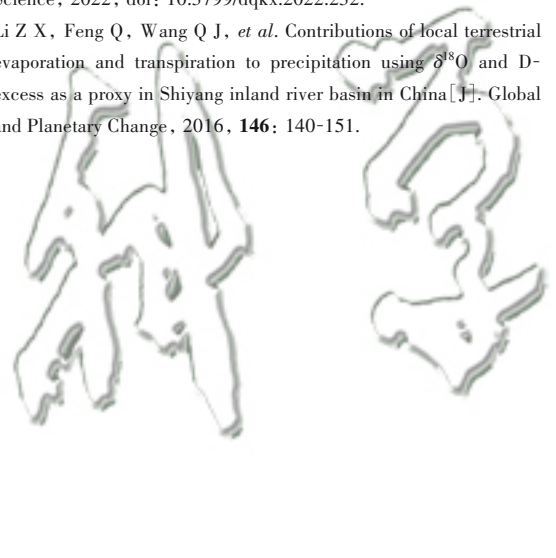
- [1] 岳思羽. 水资源短缺地区河道生态基流的价值与时空变化研究——以渭河为例[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- [2] 黄硕俏. 黄河流域水资源经济价值空间分布特征及其影响因素分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- [3] 傅懿兵. 浅谈水资源科学管理对促进经济可持续发展的重要性[J]. 给水排水, 2022, **58**(8): 212-213.
- [4] 黄怡, 效存德, 苏勃, 等. 冰冻圈水资源对中国社会经济发展的重要性: 基于多级流域尺度分析[J]. 科学通报, 2020, **65**(24): 2636-2650.
Huang Y, Xiao C D, Su B, *et al.* Importance of cryosphere water resources to China's socio-economy: based on multi-level basins analysis[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, **65**(24): 2636-2650.
- [5] 黄昌硕, 耿雷华, 颜冰, 等. 水资源承载力动态预测与调控——以黄河流域为例[J]. 水科学进展, 2021, **32**(1): 59-67.
Huang C S, Geng L H, Yan B, *et al.* Dynamic prediction and

regulation of water resource carrying capacity: a case study on the Yellow River Basin[J]. Advances in Water Science, 2021, **32**(1): 59-67.

- [6] 陈吟, 赵莹, 杜鹏飞, 等. 近 60 年无定河流域降雨及人类活动对水沙变化的影响[A]. 见: 2022 中国水利学术大会论文集 (第一分册)[C]. 北京: 中国水利学会, 2022.
- [7] 刘强, 尉飞鸿, 常康飞, 等. 黄河中游龙潼区间水沙变化特征及其对降水和人类活动的响应[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, **31**(3): 555-568.
Liu Q, Yu F H, Chang K F, *et al.* Variation character of water and sediment and its response to rainfall and human activities in Longtong Region of the Middle Yellow River[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, **31**(3): 555-568.
- [8] Sun C J, Wang S Y, Chen W. Hydrochemical characteristics and the relationship between surface and groundwater in a typical 'mountain-oasis' ecosystem in central Asia[J]. Sustainability, 2022, **14**(12), doi: 10.3390/su14127453
- [9] 王继华, 于福荣, 田鹏州, 等. 南太行山前冲积平原潜水水化学特征及控制因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2023, **37**(5): 130-138.
Wang J H, Yu F R, Tian P Z, *et al.* Analysis on hydrochemical characteristics of groundwater in alluvial plain of southern Taihang Mountains[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, **37**(5): 130-138.
- [10] 马惠莹. 石羊河流域山区-绿洲-荒漠不同水体水化学时空变化及控制因素[D]. 兰州: 西北师范大学, 2022.
- [11] 雷米, 周金龙, 张杰, 等. 新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 1873-1884.
Lei M, Zhou J L, Zhang J, *et al.* Hydrochemical characteristics and transformation relationship of surface water and groundwater in the plain area of Bortala River Basin, Xinjiang[J]. Environmental Science, 2022, **43**(4): 1873-1884.
- [12] Lu S S, Zhou N Q, Jiang S M, *et al.* Combining hydrochemistry and environmental isotopes to study hydrogeochemical evolution of karst groundwater in the Jinci spring area, North China[J]. Carbonates and Evaporites, 2023, **38**(2), doi: 10.1007/s13146-023-00859-9.
- [13] 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.
- [14] 张广禄, 刘海燕, 郭华明, 等. 华北平原典型山前冲洪积扇高硝态氮地下水分布特征及健康风险评价[J]. 地学前沿, 2023, **30**(4): 485-503.
- Zhang G L, Liu H Y, Guo H M, *et al.* Occurrences and health risks of high-nitrate groundwater in typical piedmont areas of the North China Plain [J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, **30**(4): 485-503.
- [15] Sheng D R, Meng X H, Wen X H, *et al.* Hydrochemical characteristics, quality and health risk assessment of nitrate enriched coastal groundwater in northern China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, **403**, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136872.
- [16] Hu M Y, Zhou P J, Chen C Q. Hydro-geochemical evolution of groundwater in the central Yangtze River Basin, China [J]. *Carbonates and Evaporites*, 2023, **38**(2), doi: 10.1007/s13146-023-00852-2.
- [17] 谢先军, 甘义群, 刘运德, 等. 环境同位素原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [18] Du G L, Zhai B, Su S J, *et al.* Hydrogeochemical characteristics and the genesis of the No. Lu 32 well in the Jiaodong Peninsula, China [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, **11**, doi: 10.3389/feart.2023.1131539.
- [19] 李冰, 王亚, 郑钊, 等. 丹江口水库调水前后表层沉积物营养盐和重金属时空变化[J]. 环境科学, 2018, **39**(8): 3591-3600.
- Li B, Wang Y, Zheng Z, *et al.* Temporal and spatial changes in sediment nutrients and heavy metals of the Danjiangkou Reservoir before and after water division of the Mid-route Project [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(8): 3591-3600.
- [20] 杨潇, 方子樊, 何文武. 丹江口库周典型支流污染离子的迁移模式及机理研究[J]. 资源环境与工程, 2022, **36**(2): 204-209, 243.
- Yang X, Fang Z F, He W W. Study on migrational model and mechanism of pollution Ions in typical tributaries around Danjiangkou Reservoir [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2022, **36**(2): 204-209, 243.
- [21] 徐慧. 丹江口水库调蓄水效应遥感监测分析——以土地覆被变化为例[D]. 武汉: 湖北大学, 2017.
- [22] 王磊, 章昱, 徐帅, 等. 丹江口水库总磷浓度遥感反演及其时空特征研究[J]. 华南地质与矿产, 2019, **35**(4): 449-456.
- Wang L, Zhang Y, Xu S, *et al.* Remote sensing retrieval of total phosphorus concentration in Danjiangkou Reservoir and its spatial and temporal characteristics [J]. *South China Geology*, 2019, **35**(4): 449-456.
- [23] 王一然, 丁文峰, 张冠华. 基于 SWAT 模型的丹江流域土地利用变化对径流影响研究[J]. 水土保持研究, 2022, **29**(4): 62-67, 74.
- Wang Y R, Ding W F, Zhang G H. Study on the impact of land use change on runoff in Danjiang watershed based on SWAT model [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, **29**(4): 62-67, 74.
- [24] 李明月. 秦岭丹江流域水源涵养与土壤保持功能评价[D]. 西安: 西北大学, 2021.
- [25] 赵培, 杨维鸽, 李晓刚. 丹江河流枯水期水化学特征及离子来源分析[J]. 甘肃科学学报, 2023, **35**(2): 26-30.
- Zhao P, Yang W G, Li X G. Analysis on hydrochemical characteristics and iron sources in dry season of Dan River [J]. *Journal of Gansu Sciences*, 2023, **35**(2): 26-30.
- [26] 李秀清. 基于 VIC 模型的丹江流域水文模拟及水资源管理对策[D]. 西安: 西北大学, 2021.
- [27] 张田田, 陈有超, 李潜, 等. 土地利用变化对丹江流域径流和泥沙时空格局的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2022, **31**(8): 1797-1811.
- Zhang T T, Chen Y C, Li Q, *et al.* Effects of land-use change on the spatio-temporal patterns of runoff and sediment in the Danjiang River Basin [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, **31**(8): 1797-1811.
- [28] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus*, 1964, **16**(4): 436-468.
- [29] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [30] Aemisegger F, Pfahl S, Sodemann H, *et al.* Deuterium excess as a proxy for continental moisture recycling and plant transpiration [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(8): 4029-4054.
- [31] Natali S, Doveri M, Giannecchini R, *et al.* Is the deuterium excess in precipitation a reliable tracer of moisture sources and water resources fate in the western Mediterranean? new insights from Apuan Alps (Italy) [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, **614**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128497.
- [32] 周毅, 吴华武, 贺斌, 等. 长江水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 时空变化特征及其影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2017, **26**(5): 678-686.
- Zhou Y, Wu H W, He B, *et al.* Study on spatial and temporal variations of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in Yangtze river water and its factors [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, **26**(5): 678-686.
- [33] Feth J H. Mechanisms controlling world water chemistry: evaporation-crystallization process [J]. *Science*, 1971, **172**(3985): 870-871.
- [34] Abdelkader R, Larbi D, Rihab H, *et al.* Geochemical characterization of groundwater from shallow aquifer surrounding Fetzara Lake N. E. Algeria [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2012, **5**(1): 1-13.
- [35] Mayo A L, Loucks M D. Solute and isotopic geochemistry and ground water flow in the central Wasatch Range, Utah [J]. *Journal of Hydrology*, 1995, **172**(1-4): 31-59.
- [36] Jalali M. Chemical characteristics of groundwater in parts of mountainous region, Alvand, Hamadan, Iran [J]. *Environmental Geology*, 2006, **51**(3): 433-446.
- [37] Tesoriero A J, Spruill T B, Eimers J L. Erratum to "geochemistry of shallow ground water in coastal plain environments in the southeastern United States: implications for aquifer susceptibility" [Applied Geochemistry 19 (2004) 1471 - 1482] [J]. *Applied Geochemistry*, 2005, **20**(3), doi: 10.1016/j.apgeochem.2004.10.002.
- [38] Assa B G, Bhowmick A, Cholo B E. Modeling nitrogen balance for pre-assessment of surface and groundwater nitrate (NO_3^- -N) contamination from N-fertilizer application loss: a case of the Bilate Downstream Watershed Cropland [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2023, **234**(2), doi: 10.1007/s11270-023-06114-0.
- [39] Wakida F T, Lerner D N. Non-agricultural sources of groundwater nitrate: a review and case study [J]. *Water Research*, 2005, **39**(1): 3-16.
- [40] Yang P H, Wang Y Y, Wu X Y, *et al.* Nitrate sources and biogeochemical processes in karst underground rivers impacted by different anthropogenic input characteristics [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **265**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114835.
- [41] Fan A M, Steinberg V E. Health implications of nitrate and nitrite in drinking water: an update on methemoglobinemia occurrence

- and reproductive and developmental toxicity [J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 1996, **23**(1): 35-43.
- [42] Whitehead P, Bussi G, Hossain M A, *et al.* Restoring water quality in the polluted Turag-Tongi-Balu River system, Dhaka: modelling nutrient and total coliform intervention strategies[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **631-632**: 223-232.
- [43] 任坤, 潘晓东, 梁嘉鹏, 等. 碳氮氧同位素解析典型岩溶流域地下水中硝酸盐来源与归趋[J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2268-2275.
- Ren K, Pan X D, Liang J P, *et al.* Sources and fate of nitrate in groundwater in a typical karst basin: insights from carbon, nitrogen, and oxygen isotopes[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2268-2275.
- [44] 李霄, 王晓光, 柴璐, 等. 沉积盆地地下水无机氮来源示踪及其演化模式[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(4): 1856-1867.
- Li X, Wang X G, Chai L, *et al.* Sources tracing and evolution model of inorganic nitrogen of groundwater in sedimentary basin[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(4): 1856-1867.
- [45] 殷超, 杨海全, 陈敬安, 等. 基于水化学和氮氧同位素的贵州草海丰水期水体硝酸盐来源辨析[J]. *湖泊科学*, 2020, **32**(4): 989-998.
- Yin C, Yang H Q, Chen J A, *et al.* Tracing nitrate sources with dual isotopes and hydrochemical characteristics during wet season in Lake Caohai, Guizhou Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(4): 989-998.
- [46] Xie X J, Wang Y X, Su C L, *et al.* Influence of irrigation practices on arsenic mobilization: evidence from isotope composition and Cl/Br ratios in groundwater from Datong Basin, northern China[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, **424-425**: 37-47.
- [47] 曾邯斌, 苏春利, 谢先军, 等. 河套灌区西部浅层地下水咸化机制[J]. *地球科学*, 2021, **46**(6): 2267-2277.
- Zeng H B, Su C L, Xie X J, *et al.* Mechanism of salinization of shallow groundwater in western Hetao irrigation area [J]. *Earth Science*, 2021, **46**(6): 2267-2277.
- [48] 徐蓉桢, 魏世博, 李成业, 等. 基于水化学与环境同位素的额济纳平原区域地下水循环规律解析[J]. *地学前缘*, 2023, **30**(4): 440-450.
- Xu R Z, Wei S B, Li C Y, *et al.* Groundwater circulation in the Ejina Plain: insights from hydrochemical and environmental isotope studies [J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, **30**(4): 440-450.
- [49] 李静, 朱佳俊, 梁杏, 等. 海州湾弱透水层孔隙水的化学特征与盐分演变[J]. *地球科学*, 2022, doi: 10.3799/dqkx.2022.232.
- Li J, Zhu J J, Liang X, *et al.* Chemical signatures and salinity evolution of aquitard porewater in the Haizhou Bay [J]. *Earth Science*, 2022, doi: 10.3799/dqkx.2022.232.
- [50] Li Z X, Feng Q, Wang Q J, *et al.* Contributions of local terrestrial evaporation and transpiration to precipitation using $\delta^{18}\text{O}$ and D-excess as a proxy in Shiyang inland river basin in China[J]. *Global and Planetary Change*, 2016, **146**: 140-151.



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)