

doi: 10.12097/gbc.2024.11.058

陕西泾阳南部地下水水文地球化学成因机制及次生环境挑战

徐盼盼^{1,2,3,4,5}, 钱会^{1,2,3,4*}, 张奇莹⁶, 臧永琪^{1,2,3}, 刘源^{1,2,3}, 董佳毅^{1,2,3}

XU Panpan^{1,2,3,4,5}, QIAN Hui^{1,2,3,4*}, ZHANG Qiying⁶, ZANG Yongqi^{1,2,3}, LIU Yuan^{1,2,3}, DONG Jiayi^{1,2,3}

1. 长安大学水利与环境学院, 陕西 西安 710054;

2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054;

3. 水利部旱区生态水文与水安全重点实验室, 陕西 西安 710054;

4. 长安大学陕西省黄河科学研究院, 陕西 西安 710054;

5. 生态地质与灾害防控自然资源部重点实验室, 陕西 西安 710054;

6. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054

1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of the Ministry of Education, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

3. Key Laboratory of Eco-hydrology and Water Security in Arid and Semi-arid Regions of Ministry of Water Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

4. Academy of Yellow River Sciences of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

5. Key Laboratory of Ecological Geology and Disaster Prevention of Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

6. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China

摘要:【研究目的】陕西泾阳南部是典型的黄土分布区、人口居住聚集区、农业活动密集区、地质灾害频发区,研究该区地下水的水文地球化学成因机制及次生环境挑战,对黄土高原地下水资源开发利用、用水安全保障和生态地质环境保护具有重要意义。【研究方法】基于区内地下水调查、水样采集与分析,查明地下水主要离子分布特征;综合运用水化学方法和同位素理论,揭示地下水水文地球化学成因机制及其主控因子;借助综合权重水质指数、镁危害系数、钠百分比、Wilcox图、灌溉系数,评估地下水的饮用和灌溉适宜性,进而阐释其次生环境挑战。【研究结果】研究区地下水整体呈弱碱性,泾河南岸地下水的TDS范围为752~2108 mg/L,属淡水和微咸水,北岸地下水的TDS范围为1232~3768 mg/L,属微咸水和咸水;地下水优势阳离子为 Na^+ 和 Mg^{2+} ,优势阴离子为 HCO_3^- 与 SO_4^{2-} ,水化学类型以 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Mg}$ 和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Na}\cdot\text{Mg}$ 型为主,且北岸的水化学类型更复杂。水化学特征主要受岩石风化作用影响,其中以硅酸盐岩的风化溶解作用为主导;蒸发浓缩作用与阳离子交替吸附作用促进了地下水咸化;南岸地下水受农业活动影响显著,北岸地下水主要受工业活动、生活污水与人畜粪肥的综合影响。饮用水质等级以中等为主,引起健康风险的首要因子为总硬度、 NO_3^- 、 F^- 和 SO_4^{2-} ;大部分地下水不适宜直接灌溉,需采取措施,防止累盐,否则会诱发土壤盐渍化。【结论】陕西泾阳南部泾河两岸地下水的水化学特征分异,主要受控于硅酸盐岩风化作用,叠加蒸发浓缩作用与人类活动影响。地下水总硬度、硝酸盐、氟化物等健康风险因子超标,同时地下水咸化,易诱发土壤盐渍化。建议针对性开展地下水污染防治工作,以免面临更严峻的次生环境挑战。

关键词: 地下水; 水化学; 同位素; 水文地球化学过程; 水质评价; 泾阳南部; 陕西

收稿日期: 2024-11-28; 修订日期: 2025-02-15

资助项目: 国家自然科学基金项目《渗流-化学协同作用下黄土微结构演化与强度特性响应研究》(批准号: 42202311)、西安市青年人才托举计划项目《渗流条件下黄土的水-土耦合作用机制及其损伤灾变效应研究》(编号: 959202313095)和大学生创新创业训练计划项目《黄土-古土壤界面渗透特性与微观机理研究》(编号: S202410710325)

作者简介: 徐盼盼(1993-),男,博士,副教授,从事地下水环境演化及水文地球化学研究。E-mail: panpanxu@chd.edu.cn

* 通信作者: 钱会(1963-),男,博士,教授,从事旱区水文地质与工程地质研究。E-mail: qianhui@chd.edu.cn

创新点: 综合运用水化学方法和同位素理论,揭示泾阳南部泾河两岸地下水化学特征分异机制,评估地下水的饮用和灌溉适宜性,阐明次生环境挑战。

中图分类号: P342 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)05-0811-14

Xu P P, Qian H, Zhang Q Y, Zang Y Q, Liu Y, Dong J Y. Hydrogeochemical genesis mechanism and secondary environmental challenges of groundwater in southern Jingyang, Shaanxi Province. *Geological Bulletin of China*, 2025, 44(5): 811-824

Abstract: [Objective] The southern Jingyang, Shaanxi Province is a typical loess distribution area, population gathering area, agricultural activity intensive area, and geological disaster prone area. Thus, studying the hydrogeochemical genesis mechanism and secondary environmental challenges of groundwater in this area is of great significance for the development and utilization of groundwater resources, water safety guarantee, and ecological geological environment protection on the Chinese Loess Plateau.

[Methods] Based on groundwater investigation, water sample collection and analysis in the area, the main ion distribution characteristics of groundwater were identified; the hydrogeochemical genesis mechanism and its main controlling factors of groundwater were revealed by the comprehensive application of hydrochemical methods and isotope theory; the suitability of groundwater for drinking and irrigation was evaluated, and its secondary environmental challenges were explained, using the integrated-weight water quality index, magnesium hazard, soluble sodium percentage, Wilcox plot, and irrigation coefficient.

[Results] The groundwater in this area was weakly alkaline as a whole. The TDS range of groundwater in the south bank of Jing River was 752~2108 mg/L, belonging to freshwater and brackish water, while the TDS ranged from 1232 to 3768 mg/L and was classified as brackish to saline water in the north bank. The dominant cations in groundwater were Na^+ and Mg^{2+} , and the dominant anions were HCO_3^- and SO_4^{2-} ; The hydrochemical types were mainly $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Mg}$ and $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Cl-Na}\cdot\text{Mg}$, and the hydrochemical types in the north bank were more complex. The hydrochemical characteristics of groundwater were mainly controlled by rock weathering, among which the weathering and dissolution of silicate rocks were dominant. Meanwhile, the evaporation and cation alternating adsorption promoted the salinization of groundwater. The groundwater in the south bank was significantly affected by agricultural activities, while the groundwater in the north bank was influenced by a combination of industrial activities, domestic sewage, and human and animal manure. The drinking water quality level was mainly moderate, and the primary factors causing health risks were total hardness, NO_3^- , F^- , and SO_4^{2-} . Most groundwater was not suitable for direct irrigation and measures should be taken to prevent salt accumulation, otherwise soil salinization may occur. **[Conclusions]** The hydrochemical characteristics of groundwater along the banks of Jing River in the south of Jingyang, Shaanxi Province, are mainly controlled by the weathering of silicate rocks, superimposed evaporation and concentration and the influence of human activities. There are health risk factors of groundwater such as total hardness, nitrate, fluoride exceeding the standard, and the salinization of groundwater is easy to induce soil salinization. It is suggested to carry out targeted prevention and control of groundwater pollution to avoid facing more severe secondary environmental challenges.

Key words: groundwater; hydrochemistry; isotope; hydrochemical processes; water quality assessment; southern Jingyang; Shaanxi Province

Highlights: Using hydrochemical methods and isotope theory, this paper reveals the differentiation mechanism of groundwater chemical characteristics on both banks of Jing River in the south of Jingyang, evaluates the suitability of groundwater for drinking and irrigation, and clarifies the secondary environmental challenges.

地下水是水文循环的重要组成部分,对维持生态系统稳定和地球化学循环、支持经济社会发展及保障人类生存具有重要意义(Li et al., 2019; 刘鑫等, 2021a)。在气候变化、生态环境演化、人类活动复杂的叠加影响下,地下水面临水量减少和水质恶化的双重威胁(李书鉴, 2021; 刘鑫等, 2021b)。显然,地下水中化学组分富集到一定程度势必会影响甚至失去原有的水资源功能,由水质型缺水间接演变为水

量型缺水(李军等, 2024)。因此,探明地下水水化学特征及其成因机制,有助于厘清地下水质量演变的水文地球化学动力学过程,为破解区域水质恶化引起的链式生态地质环境难题提供理论支撑,这已成为地下水环境领域的研究热点。

地下水化学成分的变化是其与周围环境相互作用的结果。在水体运移过程中,溶质的来源与迁移转化控制着水体化学特征的重塑与演变,进而对水

环境和水生态产生深远的影响(Fu et al., 2018; 魏善明等, 2021; Hou et al., 2023)。水化学组分来源主控于自然背景和人类活动的叠加效应; 迁移转化是一个极其复杂的过程, 涉及到一系列水文地球化学作用, 如溶滤作用、蒸发浓缩作用、阳离子交替吸附作用等(姜凤等, 2023; 李军等, 2024)。水化学分析方法及同位素示踪技术能够识别水体中主要离子的来源及去向, 为探明水文地球化学过程提供依据(Zheng et al., 2022; Xia et al., 2024)。Xia et al. (2024)采用水化学分析方法与多同位素示踪技术相结合的手段, 揭示了汾河流域地下水中氮污染的时空演化机制; 卢小慧等(2024)将水文地球化学理论与同位素平衡方程联用, 探明了地跨苏州市和上海市的元荡湖流域地表水-地下水的成因机制与转化关系; Gao et al. (2020)利用 Piper 三线图、Gibbs 图、离子比例关系等方法探明了城市化进程中人类活动对西安市地下水化学特征的影响模式。此外, 刘鑫等(2021a)和向伟等(2024)聚焦黄土高原地下水, 借助多种水化学分析方法和同位素指示技术, 阐明了地下水环境演化规律与补径排特征及其控制因素。这些成果不仅使地下水的水文地球化学成因及其主控机制研究有了深度, 也使水环境演化的驱动因子和链式效应在联系上有了广度, 为探索旱区地下水的水化学成因机制提供了方法学基础。

黄土高原是“黄河流域生态保护和高质量发展”战略实施的关键区, 承载着全国 10% 的人口, 面对干旱诱发的水资源匮乏挑战, 地下水对维持区域水安全至关重要(Li et al., 2024; 向伟等, 2024)。作为干旱—半干旱地区的重要资源, 地下水对于黄土高原地区农业发展、人类生存、灾害防治等至关重要。陕西泾阳南部是典型的黄土分布区、人口居住聚集区、农业活动密集区、地质灾害频发区, 研究该区地下水的水文地球化学成因机制及次生环境挑战可为黄土高原地下水环境研究提供新的思路与范式。然而, 目前关于泾阳地区地下水水化学研究的报道仅涉及水化学类型与特征(牛盟等, 2023)。鉴于此, 以陕西泾阳南部为研究区, 在查明地下水主要离子分布特征的基础上, 综合运用水化学方法和同位素理论, 揭示区内地下水的水文地球化学作用机制; 借助综合权重水质指数、镁危害系数、钠百分比、灌溉系数, 评估地下水的饮用和灌溉适宜性, 阐释其次生环境挑战, 以期为黄土地区的地下水资源开发利用、

居民用水安全保障和生态地质安全建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

泾阳县(东经 $108^{\circ}29'40''$ ~ $108^{\circ}58'23''$ 、北纬 $34^{\circ}26'37''$ ~ $34^{\circ}44'57''$)隶属咸阳市, 位于关中盆地中部, 县域面积约 780 km^2 , 地势西北高、东南低, 地面平均坡降约 3.0%(牛盟等, 2023)。气候属温带大陆性季风气候, 四季分明, 雨热同期, 多年平均降水量和温度分别为 537 mm 和 13°C (徐盼盼, 2021)。县内主要有 3 条过境河流, 分别为泾河、冶峪河、清河, 其中泾河是渭河的一级支流, 自西北向东南流经泾阳县南部, 县内河长约 77 km, 是泾阳地表水的主要供给来源(图 1)。研究区位于泾阳南部, 泾河南岸的地貌类型为黄土台塬, 塬面地形较平坦, 塬边直接以陡崖、陡坎形式与泾河河床、河漫滩相接, 由于不断受到泾河的侧向侵蚀, 形成了海拔 450~500 m 的陡坡, 加之区内农业活动强烈, 大水漫灌的方式造成地下水位反复抬升, 且多余水分侧向排泄进入塬边, 致使滑坡地质灾害频发(杨炳强, 2015; 张小筱, 2016); 区内主要为第四系松散岩类孔隙水和第四系松散岩类裂隙孔隙水, 含水层由中更新统风积黄土组成, 地下水属潜水型, 补给以降水与灌溉为主, 排泄以泄流为主(张小筱, 2016; 牛盟等, 2023)。泾河左岸的地貌类型为一级阶地, 地势低平, 由西北向东南微度倾斜, 区内主要为第四系松散岩类孔隙水, 含水层颗粒粗, 厚度大, 透水性好, 水量丰富(杨元波等, 2023); 长期引水灌溉持续补给地下水, 使地下水位较浅, 径流条件减弱, 加之半干旱地区蒸发强烈, 引起土壤盐渍化、地下水咸化等环境问题, 严重威胁粮食安全与生态安全。

1.2 样品采集与测试

2024 年 4 月, 在收集研究区水文地质资料的基础上, 充分利用已有的机(民)井, 分别在泾河南岸和北岸采集 8 组和 15 组地下水样品, 共 23 组, 采样点如图 1 所示。取样时, 首先打开潜水泵抽水, 直至前期管道滞留的水排净, 确保抽取的地下水为新水; 选用 2.5 L 和 500 mL 的聚乙烯瓶作为取样瓶, 分别用于水化学组分和氢氧稳定同位素分析, 利用水样荡洗采样器与水样容器 3 次, 避免容器壁残留物对水质的影响; 将样品瓶装满水后, 立即拧紧瓶盖、密封

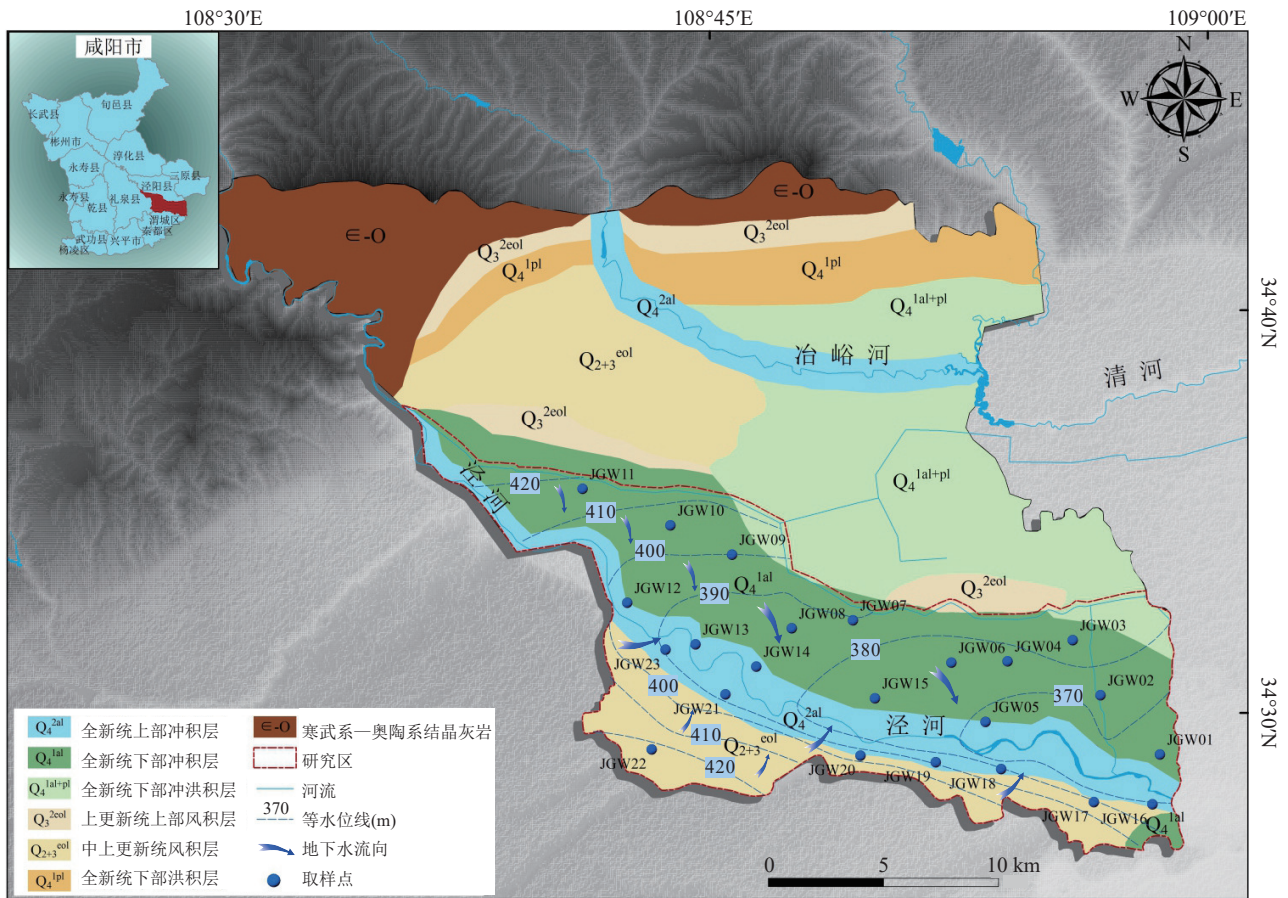


图1 研究区及采样点位(据胡伟, 2018 修改)

Fig. 1 Location of study area and sampling points

处理;再对样品进行编号,粘贴标签,并记录采样时间、点位、周围环境等信息;最后,置于 Alpicool-CX30 车载冰箱内 4℃ 冷藏,以备运往实验室检测。

利用水质多功能检测仪(衡欣-AZ86031)现场测定水温(T)、溶解性总固体(TDS)和电导率(EC),其余水化学指标送交陕西工程勘察研究院水土检测中心进行检测。采用 SP-3520AA 型原子吸收分光光度计(火焰)测定 K^+ 和 Na^+ 含量,利用 EDTA 滴定法测定 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量;采用乙二胺四乙酸二钠-钡滴定法和银量滴定法分别测定 SO_4^{2-} 和 Cl^- 含量,采用酸碱中和滴定法测定 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 和总硬度(TH),利用 722N 型可见分光光度计测定 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 及 SiO_2 的含量,利用 PXSJ-216 型离子计测定 F^- 。依据阴阳离子电荷平衡相对误差(E)验证数据的准确性,发现全部样品的 E 值介于 -2.47%~1.55% 之间,绝对值均小于 5%,表明水化学指标检测结果具有强准确性与高可信度(Zhang et al., 2024)。氢氧稳定同位素(D 和 ^{18}O)采用长安大学水资源与环境实验

中心的 Picarro L2130-i 型同位素分析仪测定,结果以相对于维也纳标准平均海水(VSMOW)标准的千分差 $\delta(\text{‰})$ 呈现。

1.3 数据处理

运用 ArcGIS10.2 软件绘制研究区概况及地下水采样点分布图,利用 SPSS 20.0 软件开展地下水水化学数据统计工作,采用 Origin 2021 和 Grapher 10 绘制 Piper 三线图、Gibbs 图和离子关系图等图件。采用综合权重水质指数(IWQI)对研究区地下水饮用适宜性进行评价,选用 pH、TDS、TH、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 F^- 共 8 项参数进行 IWQI 评价,具体步骤见文献(Zhang et al., 2021),相应的水质等级划分为 5 类: I 优良($IWQI < 50$)、II 良好($50 \leq IWQI < 100$)、III 中等($100 \leq IWQI < 200$)、IV 差($200 \leq IWQI < 300$)、V 极差($IWQI \geq 300$)。鉴于黄土层中广泛分布碳酸盐矿物,高含量的 Mg^{2+} 会诱发土壤镁碱化,对作物产生不利影响,因此采用镁危害系数(MH, Magnesium hazard)评估灌溉水中镁对土壤结

构造造成的损害程度(Tahmasebi et al., 2018);其次,基于钠百分比(SSP, Soluble sodium percentage)和电导率(EC),利用 Wilcox 图评估地下水水质的灌溉适宜性,并划分灌溉水质等级(Xu et al., 2019);在综合考虑地下水中各组分对植物生长影响的情况下,利用灌溉系数 K_a 进行灌溉水质评价(周金龙等, 2009)。相应计算公式如下:

$$MH = \frac{Mg^{2+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+}} \times 100\% \quad (1)$$

$$SSP = \frac{(Na^+ + K^+)}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+} \times 100\% \quad (2)$$

$$K_a = \begin{cases} \frac{288}{5Cl^-} & \text{当 } Na^+ < Cl^- \\ \frac{288}{Na^+ + 4Cl^-} & \text{当 } Cl^- < Na^+ < Cl^- + 2SO_4^{2-} \\ \frac{288}{10Na^+ - 5Cl^- - 9SO_4^{2-}} & \text{当 } Na^+ > Cl^- + 2SO_4^{2-} \end{cases} \quad (3)$$

式中, MH 表示镁危害系数, SSP 表示钠百分比,离子单位为 meq/L。

2 结 果

2.1 水化学特征

陕西泾阳南部地下水水化学参数统计结果见表 1。研究区地下水均呈弱碱性,泾河南岸的 pH 值介于 7.85~8.53 之间,均值为 8.21,而北岸的 pH 值较小,介于 7.42~8.19 之间,均值为 7.79。泾河南岸的地貌类型以黄土台塬为主,其富含碳酸盐矿物,加之

大水漫灌的方式补给地下水,促使 pH 增大,亦使水样中检出 CO_3^{2-} , 浓度值介于 6~18 mg/L 之间。按照有关地下水分类标准(张人权等, 2018),南岸的 $\rho(TDS)$ 介于 752~2108 mg/L 之间,淡水($TDS < 1$ g/L)和微咸水($1 \text{ g/L} \leq TDS < 3 \text{ g/L}$)各占 50%;而北岸的地下水具有高 $\rho(TDS)$,微咸水($1 \text{ g/L} \leq TDS < 3 \text{ g/L}$)和咸水($3 \text{ g/L} \leq TDS < 10 \text{ g/L}$)分别占 93.3% 和 6.7%,可见研究区地下水咸化是严重的水环境问题。南岸与北岸的地下水 $\rho(TH)$ 分别为 90.1~801 mg/L 和 480~1727 mg/L,相应均值为 381.6 mg/L 和 960 mg/L,与 TDS 的分布特征相似。泾阳南部地下水阴离子浓度的均值顺序为 $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^- > NO_3^- > F^- > NO_2^-$;阳离子浓度的均值顺序为 $Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > K^+$,且 NH_4^+ 未被检出; SiO_2 含量大体一致,无明显差异。南岸水化学参数的变异系数介于 0.03~2.07 之间,其中 $K^+(CV=1.02)$ 与 $NO_2^-(CV=2.07)$ 空间差异性较大,表明地下水可能受到农业活动的影响,引起离子局部富集(刘海等, 2023);北岸 NO_3^- 与 NO_2^- 的变异系数大于 1,亦表明农业生产施氮肥促使离子空间分布差异性显著。

2.2 水化学类型

Piper 三线图是水文地球化学分析常用的一种工具,具有凸显主控离子和水化学类型的优势(Piper, 1944)。由图 2 可知,南岸地下水主导阳离子为 Na^+ ,其次是 Mg^{2+} ,主要阴离子为 HCO_3^- ,其次为 SO_4^{2-} 和 Cl^- ,水化学类型以 $HCO_3 \cdot SO_4 \cdot Cl-Na \cdot Mg$ 型为主;北岸地下水主导阳离子为 Na^+ 和 Mg^{2+} ,阴离子主要为

表 1 陕西泾阳南部地下水水化学参数统计特征

Table 1 Statistical characteristics of hydrochemical parameters of groundwater in southern Jingyang, Shaanxi Province

类型	统计值	pH值	TDS	TH	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	F ⁻	SiO ₂
泾河南岸	Max	8.53	2108	801	12.05	444	80.2	148	340	509	873	18	221	0.123	2.88	16.9
	Min	7.85	752	90.1	1.32	226	10	15.8	42	52.8	311	6	21.86	0.003	0.83	11.3
	Mean	8.21	1213	381.6	3.84	308	37.3	70.1	158	252.7	632	13	92.52	0.024	1.47	13.9
	Std	0.25	484.59	293.95	3.93	70.87	27.47	54.88	97.90	166.97	183.94	5.02	62.95	0.05	0.69	1.73
	CV	0.03	0.40	0.77	1.02	0.23	0.74	0.78	0.62	0.66	0.29	0.38	0.68	2.07	0.48	0.12
泾河北岸	Max	8.19	3768	1727	15.45	532	281.0	249.0	850	889	879	/	453	0.086	1.10	17.3
	Min	7.42	1232	480	3.16	240	48.1	77.8	155	240	567	/	20.92	0.004	0.44	11.8
	Mean	7.79	1969	960	6.68	336	117.7	161.7	343	548	704	/	102.49	0.025	0.71	14.5
	Std	0.25	629.58	307.32	3.23	80.02	57.77	47.97	159.15	187.19	89.26	/	106.28	0.03	0.20	1.68
	CV	0.03	0.32	0.32	0.48	0.24	0.49	0.30	0.46	0.34	0.13	/	1.04	1.08	0.28	0.12

注: Max表示最大值, Min表示最小值, Mean表示均值, Std表示标准差; CV表示变异系数, 无量纲; pH为无量纲, 其余成分单位均为mg/L; /表示未检出

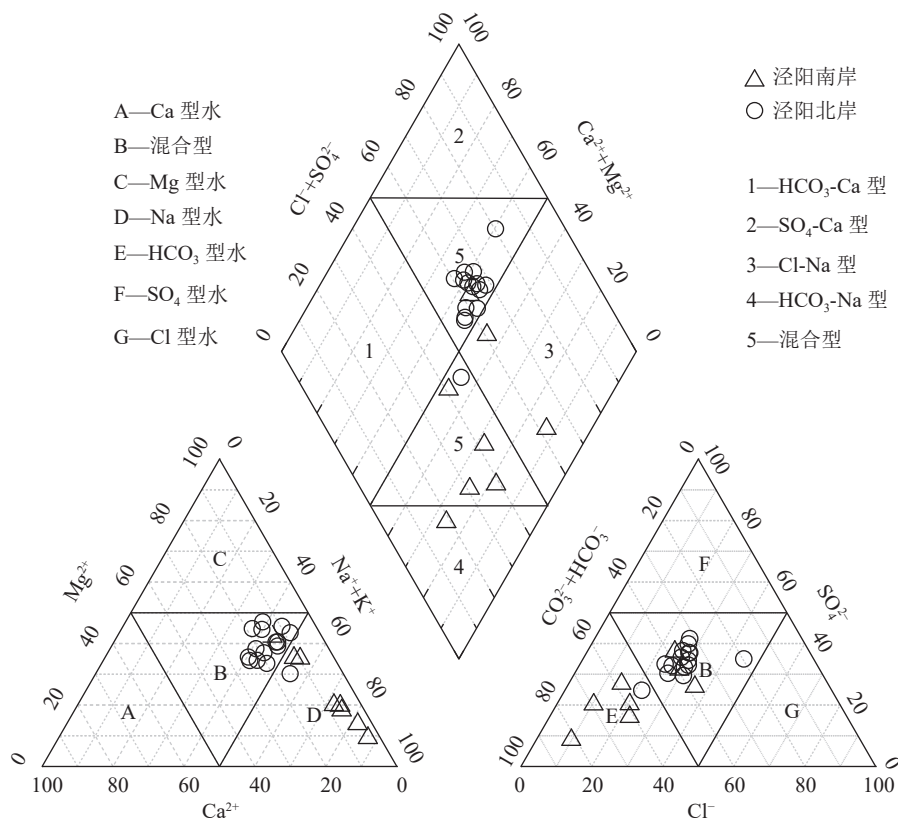


图2 研究区地下水 Piper 三线图

Fig. 2 Piper diagrams of groundwater in the study area

HCO_3^- 和 SO_4^{2-} , Cl^- 次之, 水化学类型主要为 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na} \cdot \text{Mg}$ 型, 其次为 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Mg}$ 和 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na} \cdot \text{Mg}$ 型, 可见, 北岸的水化学类型更复杂, 受到人类活动的影响更显著。

2.3 同位素组成

泾河南岸地下水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别介于 -84.89‰ ~ -56.77‰ 和 -11.64‰ ~ -8.86‰ 之间, 相应均值分别为 -69.94‰ 和 -9.95‰ , 标准差分别为 0.31‰ 和 2.08‰ ; 北岸地下水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 -70.06‰ ~ -63.20‰ 和 -9.90‰ ~ -8.89‰ , 均值分别为 -65.65‰ 和 -9.29‰ , 标准差分别为 0.87‰ 和 8.54‰ ; 可见南岸地下水的氢氧稳定同位素相对贫化。此外, 研究区地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的变异系数介于 -0.03 ~ -0.12 之间, 整体变异性较小。

3 讨论

3.1 地下水化学成因解析

3.1.1 水岩作用

Gibbs 图是一种半对数坐标图, 常用于判断地下水中离子来源的主控机制, 主要包括蒸发浓缩控制

型、岩石风化控制型和大气降水控制型(刘海等, 2023; 陈雯等, 2024)。由图 3-a 可知, 阳离子 $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 的范围为 0.62 ~ 0.96 , 泾河北岸的大部分水样点落在蒸发浓缩控制型区域, 泾河南岸的地下水样点落在区域外, 这些点具有高 NO_3^- 含量, 表明在蒸发浓缩作用显著影响地下水化学组分的同时, 可能存在较强的人类活动; 这与刘鑫等(2021b)在渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素一文中的研究结果一致。在图 3-b 中, 阴离子 $\gamma(\text{Cl}^-)/\gamma(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 介于 0.11 ~ 0.70 之间, 绝大部分水样点分布在岩石风化作用控制区域, 但有向蒸发浓缩控制型区域逼近的趋势, 且由于北岸地下水埋藏较浅, 受蒸发浓缩作用更明显。综合看来, 陕西泾阳南部地下水化学组分主控于岩石风化作用和蒸发浓缩作用, 与此同时, 人类活动对地下水溶质的影响亦不可忽视。

地下水与围岩介质的相互作用会产生各种离子, 因此利用离子之间的比例关系探讨地下水的水化学成因机制是一种有效的方法(林聪业等, 2021; Zhang et al., 2022; 邓立伟等, 2024)。由图 4-a 可知,

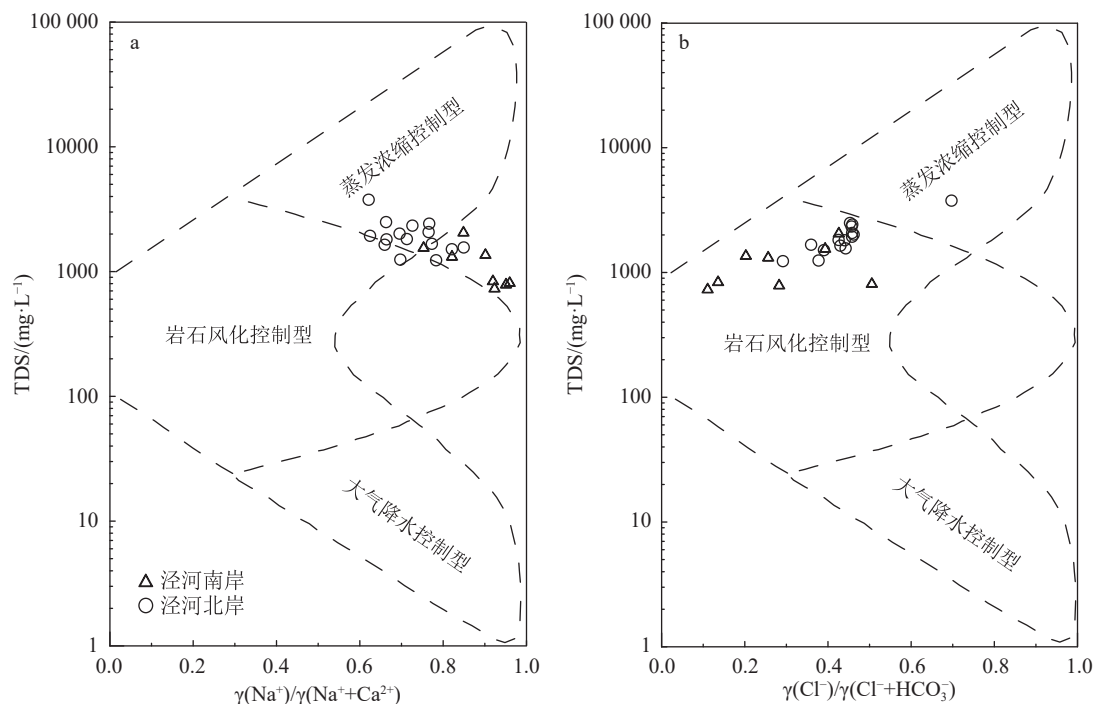


图3 研究区地下水 Gibbs 图

Fig. 3 Gibbs diagrams of groundwater in the study area

研究区水样点均落在 $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-)=1:1$ 线的上方, 表明两岸地下水在向泾河流动过程中, 除岩盐溶解作用外, 还可能存在钠长石溶解和阳离子交替吸附作用, 且泾河南岸地下水更明显。通过 $\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 与 $\gamma(\text{SO}_4^{2-})$ 的比例关系, 可以判断石膏溶解对地下水化学成分的影响程度(邓立伟等, 2024)。从图 4-b 看出, 所有水样点均落在 $\gamma(\text{Ca}^{2+})/\gamma(\text{SO}_4^{2-})=1:1$ 线下方, 说明 Ca^{2+} 亏损可能受到了阳离子交替吸附作用或去白云石化作用影响(Xu et al., 2021)。当碳酸盐岩与硫酸盐岩溶解作用对地下水化学成分起主控作用时, $\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$ 与 $\gamma(\text{SO}_4^{2-}+\text{HCO}_3^-)$ 的比值趋于 1:1(陈伟志等, 2024)。图 4-c 显示出, 大部分泾河北岸水样点沿 1:1 线展布, 而泾河南岸水样点落在 1:1 线下方, 表明硅酸盐岩风化与阳离子交替吸附作用对泾河南岸地下水的水化学成因影响程度更大。结合 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 的比例关系(图 4-d), 水样点分布在 1:1 线下方, 表明存在白云石的溶解, 且阳离子交替吸附作用消耗了大量的 Ca^{2+} 。

为了验证上述研究结果, 利用 $\gamma(\text{Ca}^{2+})/\gamma(\text{Na}^+)$ 分别与 $\gamma(\text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{Na}^+)$ 和 $\gamma(\text{HCO}_3^-)/\gamma(\text{Na}^+)$ 的关系揭示水体中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子的岩石风化来源(李军等, 2024; 刘海等, 2024)。由图 5 可知, 泾河南岸地下水样品分布以硅酸盐岩为中心, 向蒸发盐岩和碳

酸盐岩两端展布, 表明南岸地下水化学特征主控于硅酸盐岩风化作用的同时, 碳酸盐岩和蒸发盐岩的风化也起到了重要作用; 至于泾河北岸地下水, 水样点分布在硅酸盐岩与碳酸盐岩之间, 表明二者的风化作用是地下水离子来源的主控因素, 这可能与研究区广泛分布的硅酸盐类岩石有关, 如页岩或泥板岩等(刘鑫等, 2021b)。硅酸盐体系稳定场图可用于进一步判断地下水系统内硅酸盐和铝硅酸盐矿物间的溶解-沉淀平衡状态(刘海等, 2023, 2024), 如图 6 所示。水样点的 SiO_2 含量超过石英饱和线, 但未达到非晶质硅饱和线, 且主要落在蒙脱石与长石的稳定区边界附近(图 6-a, c), 表明钙长石与钠长石的溶解作用生成了蒙脱石等粘土矿物, 验证了上述结论的合理性。

3.1.2 阳离子交替吸附

地下水中的阳离子交替吸附作用常用 $\gamma(\text{Na}^++\text{K}^+-\text{Cl}^-)$ 与 $\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}-\text{HCO}_3^-)$ 的关系进行判别, 一般而言, 二者线性拟合斜率接近-1, 表明存在显著的阳离子交替吸附作用(Sheng et al., 2023)。由图 7-a 可知, 泾河南岸与北岸水样点的拟合斜率分别为-1.08 和-1.39, 表明研究区地下水中的阳离子交替吸附作用普遍存在, 且南岸更显著。此外, 阳离子交替吸附作用亦可通过氯碱指数(CAI-I 和 CAI-II)

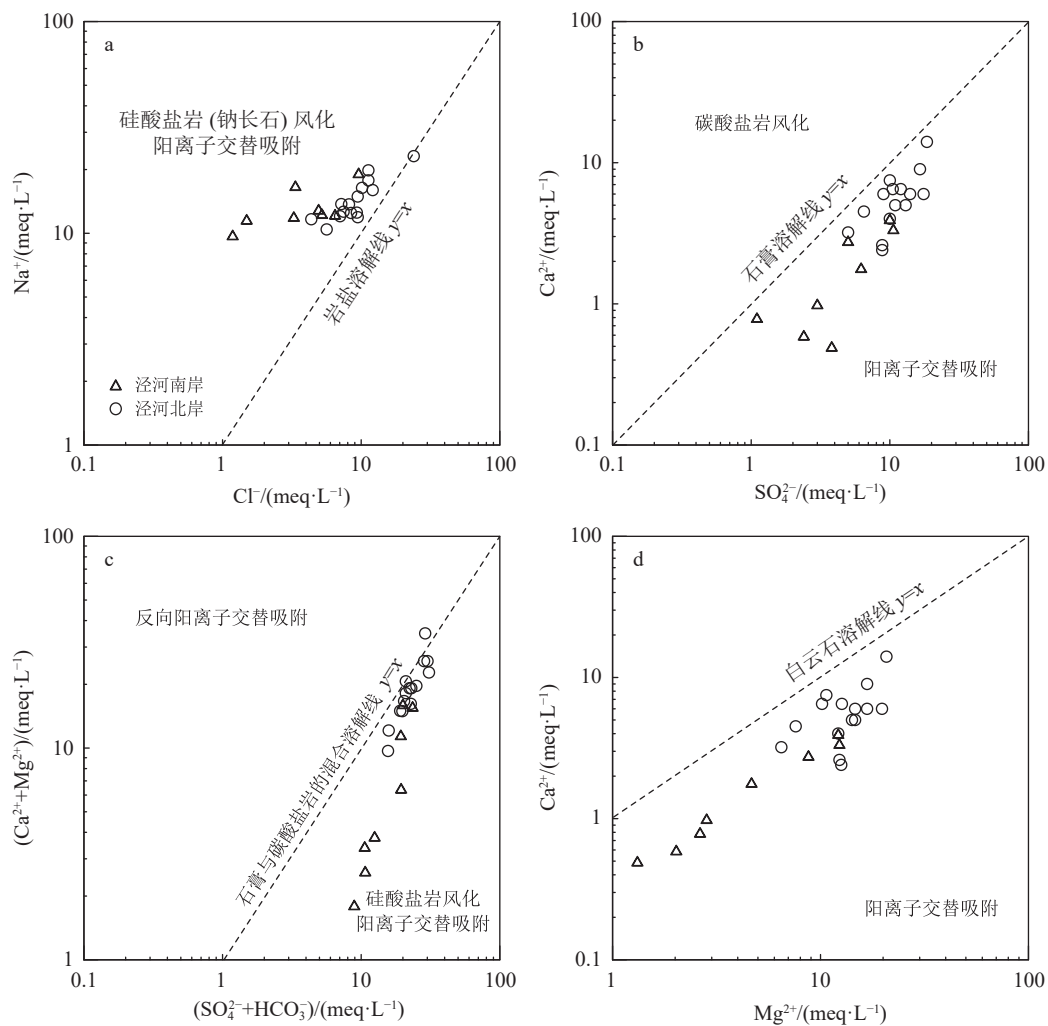


图4 地下水主要离子关系

Fig. 4 Relationship of major ions in groundwater

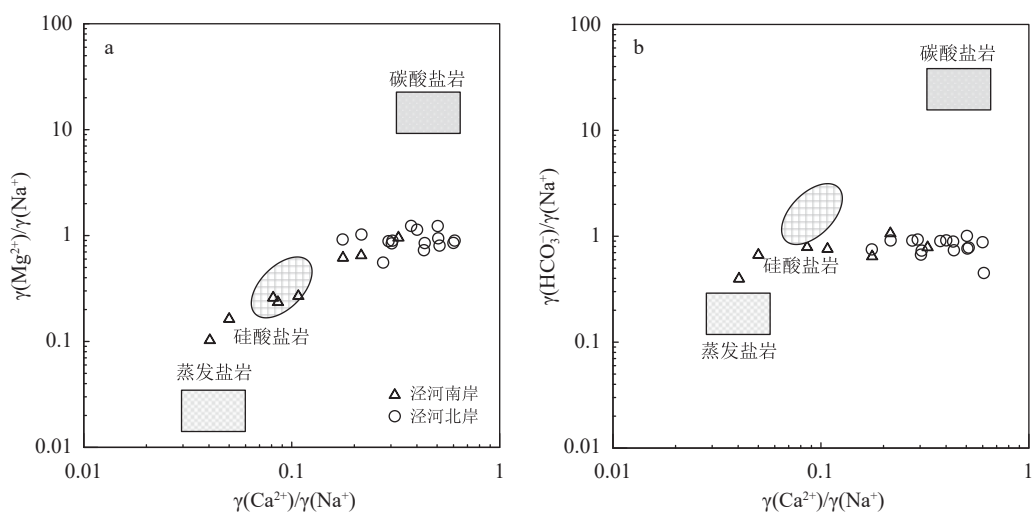


图5 地下水离子比值端元图

Fig. 5 Endmember diagrams of ion ratio in groundwater

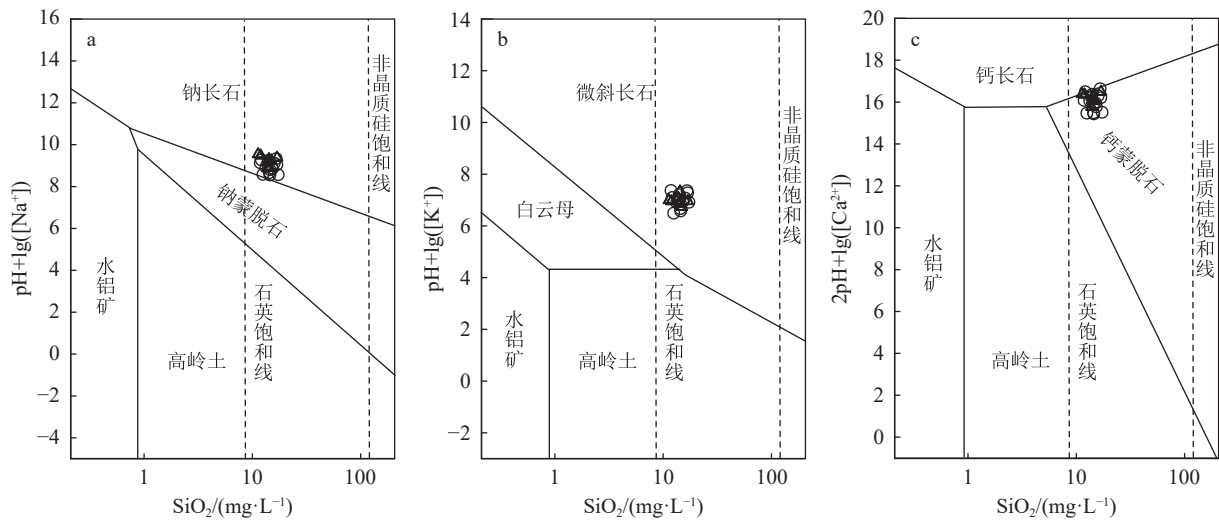


图 6 地下水硅酸盐稳定场

Fig. 6 Silicate stability field of groundwater

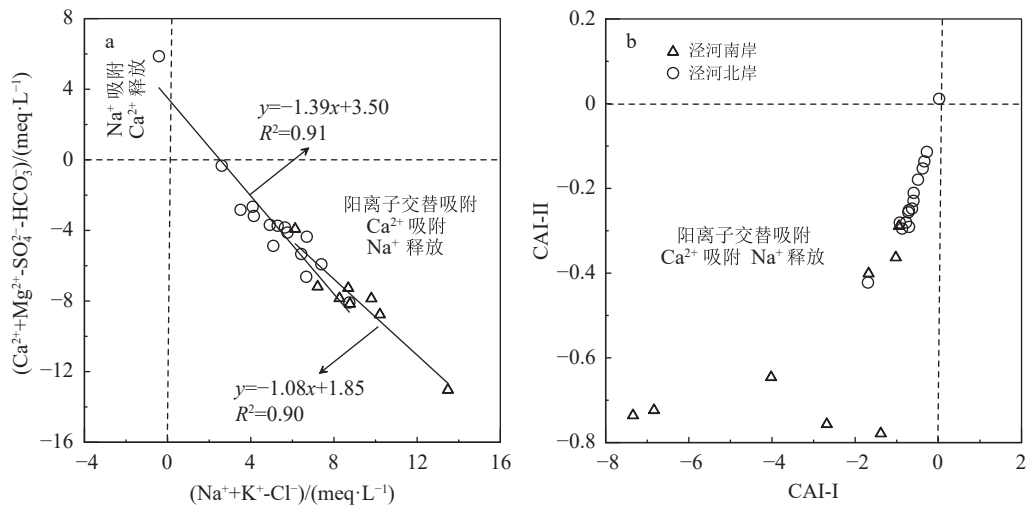


图 7 地下水阳离子交替吸附作用判别图解

Fig. 7 Discrimination of cation exchange and adsorption in groundwater

来检验,二者均为负值时,表明地下水环境中存在阳离子交替吸附作用(Liu et al., 2021)。从图 7-b 可看出,泾河南岸地下水的 CAI-I 和 CAI-II 值分别介于 -7.34~-0.95 和 -0.77~0.29 之间,相应均值分别为 -3.24 和 -0.58;泾河北岸地下水的 CAI-I 和 CAI-II 值分别介于 -1.69~0.02 和 -0.42~0.01 之间,相应均值分别为 -0.65 和 -0.22,也说明研究区地下水中存在钙离子置换钠离子的作用,且南岸黄土层富含粘土矿物,其交替吸附作用更强,这与图 4 得到的结论吻合。

3.1.3 人类活动影响

随着社会生产力的快速增长,人类活动对地下

水化学成分的影响不可忽视,常通过 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ 与 $\text{NO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ 关系判别不同人类活动对地下水水化学组成的影响(陈伟志等, 2024; 周殷竹等, 2024)。如图 8-a 所示,泾河南岸地下水 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{NO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ 分别介于 1.38~7.63(均值为 3.35)和 0.00~1.07(均值为 0.70)之间,北岸地下水相应值分别介于 1.32~3.66(均值为 2.14)和 0.00~0.59(均值为 0.24)之间,表明研究区地下水受矿业活动影响更显著,这与 20 世纪 80 年代以来工业化快速发展及大规模采矿活动有关(刘鑫等, 2021b);相比北岸,南岸地下水受农业活动影响更大,这与南岸黄土层农耕、施肥及灌溉活动频繁相吻合。此外, $\gamma(\text{Cl}^-)$ 与 $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ 关系可

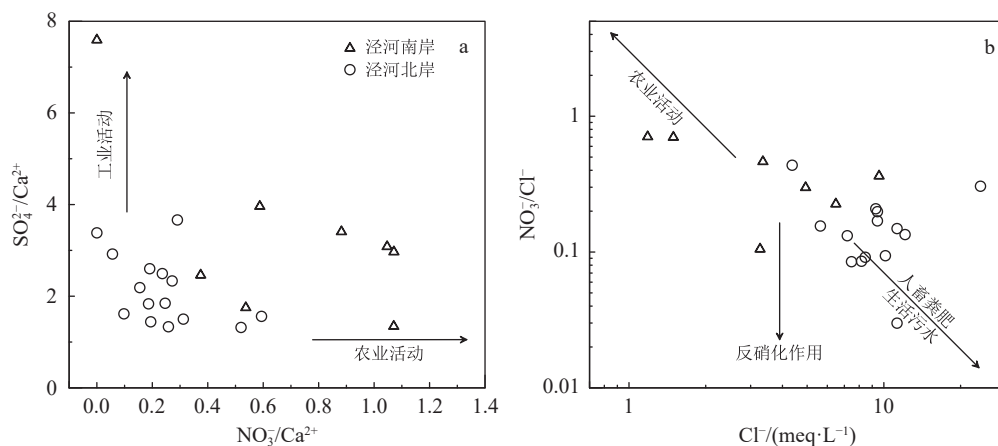


图 8 地下水 $\text{NO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ – $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ (a)和 Cl^- – $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ (b)关系图解

Fig. 8 Relationships between $\text{NO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ and $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ (a), Cl^- and $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ (b) in groundwater

以有效识别 NO_3^- 的来源,进一步判断人类活动的类型(Torres-Martínez et al., 2020; 陈雯等, 2024)。图 8-b 也表明泾河南岸地下水受农业活动影响较明显。此外,北岸地下水亦在一定程度上受到生活污水与人畜粪肥的影响。

3.1.4 地下水补给来源与蒸发作用

氢氧(D与 ^{18}O)稳定同位素在水循环过程中具有较强的示踪优势,广泛应用于识别地下水的补给来源(曾邯斌等, 2021; Zhao et al., 2024)。研究区地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ – δD 关系如图 9-a 所示,所有水样点均沿当地大气降水线两侧分布,表明大气降水是地下水的主要补给来源。泾河北岸水样点的氢氧稳定同位

素拟合曲线的斜率为 6.0,小于当地大气降水线的斜率 7.5,且水样点存在一定程度的氧漂移,说明地下水受蒸发作用影响,发生了非平衡分馏,重同位素富集(Xiang et al., 2020; 向伟等, 2024)。南岸属于典型的黄土塬区,地下水埋深相对较深,在降水补给地下水过程中包气带对 ^{18}O 和D的削弱作用引起重同位素相对贫化;此外,南岸地下水通过优先流的方式接受补给,受地表蒸发作用的影响较弱,同位素不发生明显的分馏(刘鑫等, 2021c; 向伟等, 2024)。 Cl^- – $\delta^{18}\text{O}$ 关系亦可指示地下水经历的水文地球化学作用,如果地下水中 Cl^- 浓度增加而 $\delta^{18}\text{O}$ 值无明显变化,表明岩石风化溶解是地下水水化学成因的主控机制;如

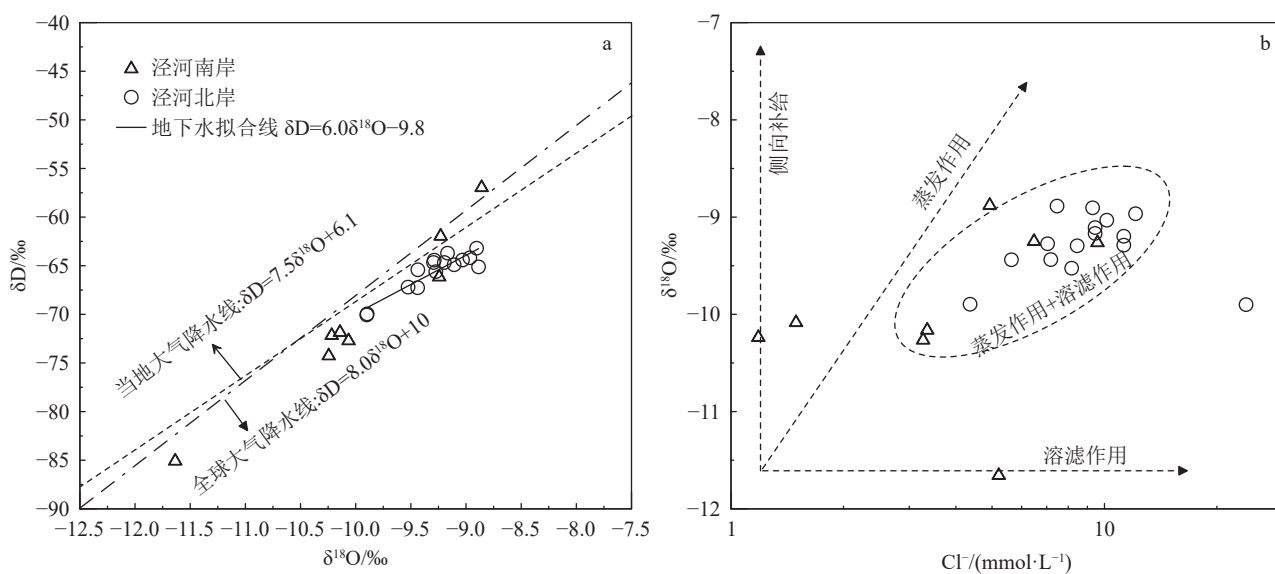


图 9 地下水 $\delta^{18}\text{O}$ – δD (a)和 Cl^- – $\delta^{18}\text{O}$ (b)关系图解

Fig. 9 Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ (a) and δD , Cl^- and $\delta^{18}\text{O}$ (b) concentration in groundwater

果 Cl^- 浓度与 $\delta^{18}\text{O}$ 值等比增加, 呈显著的正相关, 表明蒸发作用是主控作用(曾邯斌等, 2021; 何锦等, 2023)。由图 9-b 可知, 研究区泾河北岸水样点和大部分南岸水样点分布在蒸发作用与溶滤作用的混合区, 且更靠近蒸发作用主控线, 这与 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 关系图(图 9-a)得到的结论一致。

3.2 次生环境挑战

依据《地下水质量标准(GB/T 14848—2017)》, 结合表 1, 区内地下水 Mg^{2+} 与 Ca^{2+} 含量丰富, 总硬度超标明显, 长期饮用会增加人群心血管、神经、泌尿等系统病变风险; 泾河南、北岸地下水中 NO_3^- -N 均值分别为 20.89 mg/L 和 23.14 mg/L, 超过了饮用限值 20 mg/L, 饮用硝酸盐超标的水在引发高铁血红蛋白症的同时, 也会增加患癌风险; 泾河南岸地下水中 F 含量介于 0.83~2.88 mg/L 之间, 均值为 1.47 mg/L, 超过了饮用水限值 1.0 mg/L, 这与黄土地层中含氟矿物的溶解作用有关, 长期饮用会引起氟斑牙、氟骨症、骨骼发育不良等疾病(Zhang et al., 2020); 此外, 泾河南、北岸地下水 SO_4^{2-} 浓度均值分别为 252.7 mg/L 和 548 mg/L, 均超过饮用水限值 250 mg/L, 长期饮用硫酸盐含量过高的水可能会导致胃肠道紊乱。借助综合权重水质指数(IWQI)对研究区地下水饮用适宜性进行评价, 结果表明, 泾河北岸地下水的 IWQI 值介于 89.07~227.09 之间, 均值为 125.25, IWQI 值介于 50~100 之间(水质良好)的地下水占 20%, 介于 100~200 之间(水质中等)的地下水占 73.33%, 介于 200~300 之间(水质差)的地下水占 6.67%; 泾河南岸地下水的 IWQI 值介于 76.45~147.47 之间, 均值为 106.16, IWQI 值介于 50~100 之间(水质良好)和 100~200 之间(水质中等)的地下水各占 50%。可见, 相对泾河南岸, 北岸地下水水质差, 这与北岸地下水受矿业活动、生活污水与人畜粪肥的综合影响密切相关。

镁危害系数(MH)用于评估地下水中镁对土壤结构造成的损害程度及土壤镁碱化的可能性(周金龙等, 2009; Xu et al., 2019), $\text{MH}<50\%$ 表示地下水适宜灌溉, 反之则不适宜。泾河南岸与北岸的地下水 MH 值分别介于 72.07%~78.36% 和 58.72%~83.95% 之间, 相应的均值分别为 75.20% 和 70.11%, 表明从镁危害的角度看, 地下水不适宜灌溉。此外, 钠百分比(SSP)是表征钠危害的重要指标(Xu et al., 2019; 刘鑫等, 2021), 水质等级可分为 5 类: 优秀($\text{SSP}<$

20%)、良好($20\%\leq\text{SSP}<40\%$)、一般($40\%\leq\text{SSP}<60\%$)、较差($60\%\leq\text{SSP}<80\%$)和极差($80\%\leq\text{SSP}$)。泾河北岸地下水的 SSP 值介于 36.81%~54.83% 之间, 均值为 43.88%, 水质等级良好与一般占比分别为 20% 和 80%; 南岸地下水的 SSP 值介于 43.81%~87.24% 之间, 均值为 67.93%, 水质等级一般、较差和极差占比分别为 37.5%、37.5% 和 25%; 结合 Wilcox 图(图 10)可知, 泾河北岸地下水主要分布在水质保留区与不适宜区, 而南岸地下水主要分布在水质可接受区和保留区。再者, 依据灌溉系数 K_a , 水质等级可划分为 4 类(周金龙等, 2009): 极差($K_a<1.2$)、较差($1.2\leq K_a<6.0$)、一般($6.0\leq K_a<18$)和良好($18\leq K_a$)。泾河北岸地下水的 K_a 值为 2.4~9.9, 均值为 6.0, 水质等级较差与一般各占 53.33% 和 46.67%; 南岸地下水的 K_a 值介于 3.0~8.8 之间, 均值为 5.4, 水质等级较差与一般各占 62.50% 和 37.50%, 表明研究区地下水总体上不适宜灌溉, 即使灌溉, 也需采取措施, 防止累盐。从上述 3 个指标的评价结果可以看出, 研究区地下水的灌溉适宜性较差, 主要原因包括: 研究区地层中存在大量白云岩, 长期的风化溶解作用, 可能引起去白云石化作用, 促使地下水中镁离子富集, 灌溉易导致镁危害; 其次, 地下水运移过程中发生的阳离子交替吸附作用, 加之农业活动强烈, 引起 Na^+ 富集, 易形成钠危害, 影响土壤结构及其通透性(Kawo and Karuppnan, 2018); 再者, 由于人类活动频繁, 地下水水文地球化学成因复杂, 各组分含量较高, 易诱发土壤盐渍化,

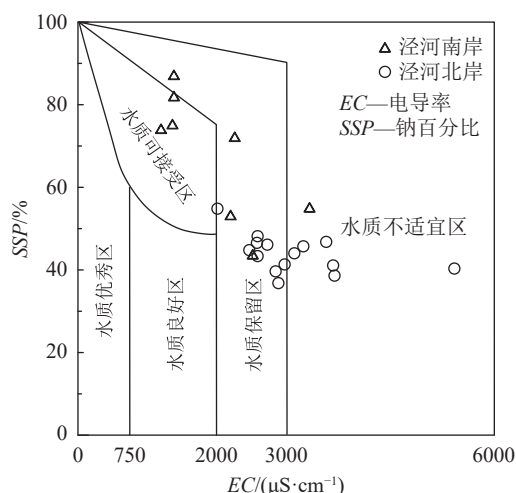


图 10 地下水灌溉适宜性的 Wilcox 图

Fig. 10 Wilcox diagram for irrigation suitability of groundwater

降低耕地质量,威胁粮食安全。

综上所述,人类活动作为研究区地下水化学组分的主要贡献因素之一,也对地下水的水文地球化学成因产生影响。泾河北岸城镇化程度较高,加之生活污水排放及工业活动的历史性影响,使北岸地下水中 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 富集,水质下降,不适于饮用及灌溉。由于地下水的水质劣化,开发利用程度减弱,导致水位回升,埋藏变浅,蒸发浓缩作用强烈,诱发土地盐渍化、地下水咸化等生态环境问题。泾河南岸主要为黄土塬区,地下水埋藏较深,地下水多通过优先流的方式接受补给;南岸频繁的农耕与灌溉活动使得黄土中蒸发盐岩、碳酸盐岩与硅酸盐岩的淋溶作用充分,导致水化学指标的空间变异性升高;同时,氮肥的施用促使地下水中 NO_3^- 浓度升高,水质劣化,地下水面临面源氮污染的风险。

4 结 论

(1)陕西泾阳南部地下水整体呈弱碱性。泾河南岸 TDS 范围为 752~2108 mg/L,属淡水和微咸水;北岸 TDS 范围为 1232~3768 mg/L,属微咸水和咸水。区内地下水优势阳离子为 Na^+ 和 Mg^{2+} , 优势阴离子为 HCO_3^- 与 SO_4^{2-} , 水化学类型以 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Cl-Na}\cdot\text{Mg}$ 型为主;且北岸的水化学类型更复杂,受到人类活动影响更显著。

(2)陕西泾阳南部地下水化学组成主控于岩石风化作用,其中硅酸盐岩(如钙长石与钠长石)的风化溶解作用为主导,碳酸盐岩和蒸发盐岩次之。干旱的气候条件促使蒸发浓缩作用显著影响水化学组分,这是地下水咸化的关键。此外,阳离子交替吸附作用促进了 Na^+ 富集,加剧了地下水咸化程度。再者,南岸地下水受农业活动影响显著,北岸地下水受工矿活动影响的同时,亦在一定程度上受到生活污水与人畜粪肥的影响,使区内地下水中 NO_3^- 与 SO_4^{2-} 含量超标。

(3)基于综合权重水质指数(IWQI)对地下水饮用适宜性进行评价,泾河北岸水质等级以中等为主,南岸以良好与中等为主。依据 MH 、 SSP 和 K_a 对地下水灌溉适宜性进行评价,区内大部分地下水不适宜灌溉,即使灌溉,也需要采取措施,防止累盐,否则会诱发土壤盐渍化,降低耕地质量,威胁粮食安全。

致谢:感谢课题组硕士研究生王琪铭和王灵博采集野外试样,陕西工程勘察研究院水土检测中心

提供测试平台,审稿专家提出宝贵的修改意见和建议。

References

- Chen W Z, Tao L C, Li J T, et al. 2024. Hydrochemical characteristics and controlling factors of surface water in the Napahai Basin, a plateau wetland[J]. *Earth Science Frontiers*: 1–19[2025-04-07]. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2024.6.39>(in Chinese with English abstract).
- Chen W, Wu Y, Zhang H X, et al. 2024. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in the western part of the Hepu Basin[J]. *Environmental Science*, 45(1): 194–206 (in Chinese with English abstract).
- Deng L W, Lu L, Yuan D F, et al. 2024. Hydrochemical characteristics and genetic mechanisms of groundwater in the Dongjiang and Hanjiang River Basins[J]. *Environmental Science & Technology*, 47(4): 113–124 (in Chinese with English abstract).
- Fu Q, Hou Y, Wang B, et al. 2018. Scenario analysis of ecosystem service changes and interactions in a mountain–oasis–desert system: A case study in Altay Prefecture, China[J]. *Scientific reports*, 8(1): 12939.
- Gao Y Y, Qian H, Ren W H, et al. 2020. Hydrogeochemical characterization and quality assessment of groundwater based on integrated–weight water quality index in a concentrated urban area[J]. *Journal of Cleaner Production*, 260: 121006.
- He J, Zhang H S, Cai W T, et al. 2023. Causes of shallow groundwater salinization in Taocheng district, Hengshui City[J]. *Environmental Science*, 44(8): 4314–4324 (in Chinese with English abstract).
- Hou Q, Pan Y, Zeng M, et al. 2023. Assessment of groundwater hydrochemistry, water quality, and health risk in Hainan Island, China[J]. *Scientific Reports*, 13(1): 12104.
- Hu W. 2018. Study on the evaluation method of geological hazard susceptibility in Jingyang County based on GIS[D]. Master Thesis of Xi'an University of Science and Technology (in Chinese with English abstract).
- Jiang F, Zhou J L, Zhou Y Z, et al. 2023. Hydrochemical characteristics of groundwater and identification of pollution sources in the plain area of the Bayi Basin[J]. *Environmental Science*, 44(11): 6050–6061 (in Chinese with English abstract).
- Kawo N S, Karuppannan S. 2018. Groundwater quality assessment using water quality index and GIS technique in Modjo River Basin, central Ethiopia[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 147: 300–311.
- Li S J. 2021. Hydrochemical characteristics and pollution evaluation of groundwater on the Loess Plateau[D]. Master Thesis of Northwest A&F University (in Chinese with English abstract).
- Li Z, Coles A E, Xiao J. 2019. Groundwater and streamflow sources in China's Loess Plateau on catchment scale[J]. *Catena*, 181: 104075.
- Li J, Ouyang H T, Zhou J L, et al. 2024. Main controlling factors of groundwater salinization and pollution in the Oasis Zone of the Che'erchen River Basin, Xinjiang[J]. *Environmental Science*, 45(1):

- 207–217 (in Chinese with English abstract).
- Li M Y, Xie Y Q, Dong Y H, et al. 2024. Review: Recent progress on groundwater recharge research in arid and semiarid areas of China[J]. *Hydrogeology Journal*, 32(1): 9–30.
- Lin C Y, Sun Z X, Gao B, et al. 2021. Study on the hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Lhasa area[J]. *Earth Science Frontiers*, 28(5): 49–58 (in Chinese with English abstract).
- Liu H, Kang B, Guan Z T, et al. 2023. Hydrochemical characteristics and controlling factors of surface water and groundwater in Huainan coal mining area[J]. *Environmental Science*, 44(11): 6038–6049 (in Chinese with English abstract).
- Liu J T, Peng Y M, Li C S, et al. 2021. 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*, 258: 115947.
- Liu H, Wei W, Song Y, et al. 2024. Hydrochemical characteristics, controlling factors and water quality evaluation of shallow groundwater in the Tan–Lu fault zone (Anhui Section)[J]. *Environmental Science*, 45(5): 2665–2677 (in Chinese with English abstract).
- Liu X, Xiang W, Ma X J, et al. 2021a. Hydrochemical characteristics and influencing factors of shallow groundwater in the Central Loess Plateau[J]. *China Environmental Science*, 41(11): 5201–5209 (in Chinese with English abstract).
- Liu X, Xiang W, Si B C. 2021b. Hydrochemical characteristics and controlling factors of shallow groundwater in the Weihe River and Jinghe River Basins[J]. *Environmental Science*, 42(6): 2817–2825 (in Chinese with English abstract).
- Liu X, Xiang W, Si B C. 2021c. Characteristics of hydrochemistry and stable isotopes of hydrogen and oxygen in shallow groundwater of the Fenhe River Basin and their indicative significance[J]. *Environmental Science*, 42(4): 1739–1749 (in Chinese with English abstract).
- Lu X H, Wang M Y, Gong X L, et al. 2024. Study on the transformation between surface water and groundwater in Plain Lakes and Marshes based on hydrogen and oxygen isotopes[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 55(4): 416–427 (in Chinese with English abstract).
- Niu M, Liu T S, Li H, et al. 2023. Study on the types and chemical characteristics of groundwater in Jingyang County[J]. *Ground Water*, 45(4): 72–74, 98 (in Chinese with English abstract).
- Piper A M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water–analyses[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 25(6): 914–928.
- Sheng D R, Meng X H, Wen X H, et al. 2023. Hydrochemical characteristics, quality and health risk assessment of nitrate enriched coastal groundwater in northern China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 403: 136872.
- Tahmasebi P, Mahmudy–Gharaie M H, Ghassemzadeh F, et al. 2018. Assessment of groundwater suitability for irrigation in a gold mine surrounding area, NE Iran[J]. *Environmental earth sciences*, 77(22): 766.
- Torres–Martínez J A, Mora A, Knappett P S K, et al. 2020. Tracking nitrate and sulfate sources in groundwater of an urbanized valley using a multi–tracer approach combined with a Bayesian isotope mixing model[J]. *Water Research*, 182: 115962.
- Wei S M, Ding G T, Yuan G X, et al. 2021. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in the Yinan area of the Dongwen River, Shandong Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(6): 1973–1983 (in Chinese with English abstract).
- Xia Y, Xiao J, Wang W, et al. 2024. Nitrate dynamics in the streamwater–groundwater interaction system: Sources, fate, and controls[J]. *Science of The Total Environment*, 918: 170574.
- Xiang W, Evaristo J, Li Z. 2020. Recharge mechanisms of deep soil water revealed by water isotopes in deep loess deposits[J]. *Geoderma*, 369: 114321.
- Xiang W, Liu X, Si B C. 2024. Characteristics of stable isotopes of groundwater at the regional scale of the Loess Plateau and their indicative significance[J]. *Environmental Science*, 45(9): 5290–5297 (in Chinese with English abstract).
- Xu P P. 2021. Study on the mechanism of water–soil interaction in the change of permeability of remolded loess[D]. Doctoral Dissertation of Chang'an University (in Chinese with English abstract).
- Xu P P, Zhang Q Y, Qian H, et al. 2021. Investigating the mechanism of pH effect on saturated permeability of remolded loess[J]. *Engineering Geology*, 284: 105978.
- Xu P P, Feng W W, Qian H, et al. 2019. Hydrogeochemical characterization and irrigation quality assessment of shallow groundwater in the central–western Guanzhong Basin, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16: 1492.
- Yang B Q. 2015. Study on the Characteristics and disaster–causing mechanism of the loess landslide in Hetan Village, Southern Jingyang Loess Tableland[D]. Master Thesis of Chang'an University (in Chinese with English abstract).
- Yang Y B, Shang W B, Liao X C, et al. 2023. Study on the dynamic variation characteristics of the groundwater level in Jingyang County[J]. *Ground Water*, 45(5): 99–101 (in Chinese with English abstract).
- Zhang X X. 2016. Study on the characteristics of saturated permeability coefficient of the loess slope in the southern Jingyang Loess Tableland[D]. Master Thesis of Chang'an University (in Chinese with English abstract).
- Zhang J, Chen L, Hou X, et al. 2022. Effects of multi–factors on the spatiotemporal variations of deep confined groundwater in coal mining regions, North China[J]. *Science of the Total Environment*, 823: 153741.
- Zhang R Q, Liang X, Jin M G, et al. 2018. Fundamentals of hydrogeology (Seventh Edition)[M]. Beijing: Geological Publishing House: 53–54 (in Chinese).
- Zhang Q Y, Qian H, Ren W H, et al. 2024. Salinization of shallow groundwater in the Jiaokou Irrigation District and associated secondary environmental challenges[J]. *Science of the Total Environment*, 908: 168445.

- Zhang Q Y, Qian H, Xu P P, et al. 2021. Groundwater quality assessment using a new integrated-weight water quality index (IWQI) and driver analysis in the Jiaokou Irrigation District, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 111992: 212.
- Zhang Q Y, Xu P P, Qian H, et al. 2020. Hydrogeochemistry and fluoride contamination in Jiaokou irrigation district, Central China: Assessment based on multivariate statistical approach and human health risk[J]. *Science of the Total Environment*, 741: 15.
- Zhao W J, Qian H, Xu P P, et al. 2024. Tracing groundwater-surface water sources and transformation processes in the Ba River Basin through dual isotopes and water chemistry[J]. *Applied Geochemistry*, 176: 106199.
- Zheng L, Jiang C, Chen X, et al. 2022. Combining hydrochemistry and hydrogen and oxygen stable isotopes to reveal the influence of human activities on surface water quality in Chaohu Lake Basin[J]. *Journal of Environmental Management*, 312: 114933.
- Zhou Y Z, Ma T, Yuan L, et al. 2024. Hydrochemical and isotopic characteristics of groundwater and its water quality evaluation in the Beiluo River Basin, Shaanxi Province[J]. *Geology in China*, 51(2): 663–675 (in Chinese with English abstract).
- Zhou J L, Wu B, Wang Y P, et al. 2009. Distribution and quality evaluation of moderately saline groundwater in the Plain area of the Tarim Basin, Xinjiang[J]. *China Rural Water and Hydropower*, (9): 32–36 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈伟志, 陶兰初, 李静婷, 等. 2024. 高原湿地纳帕海流域地表水水化学特征及控制因素[J/OL]. 地学前缘: 1–19[2025-04-07]. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2024.6.39>.
- 陈雯, 吴亚, 张宏鑫, 等. 2024. 合浦盆地西部地区地下水水化学特征及形成机制[J]. *环境科学*, 45(1): 194–206.
- 邓立伟, 卢丽, 袁东方, 等. 2024. 东江和韩江流域地下水水化学特征及成因机制[J]. *环境科学与技术*, 47(4): 113–124.
- 何锦, 张怀胜, 蔡五田, 等. 2023. 衡水市桃城区浅层地下水咸化成因[J]. *环境科学*, 44(8): 4314–4324.
- 胡伟. 2018. 基于 GIS 的泾阳县地质灾害易发性评价方法研究[D]. 西安科技大学硕士学位论文.
- 姜凤, 周金龙, 周殷竹, 等. 2023. 巴伊盆地平原区地下水水化学特征及污染源识别[J]. *环境科学*, 44(11): 6050–6061.
- 李书鉴. 2021. 黄土高原地下水水化学特征以及污染评价[D]. 西北农林科技大学硕士学位论文.
- 李军, 欧阳宏涛, 周金龙. 2024. 新疆车尔臣河流域绿洲带地下水咸化与污染主控因素[J]. *环境科学*, 45(1): 207–217.
- 林聪业, 孙占学, 高柏, 等. 2021. 拉萨地区地下水水化学特征及形成机制研究[J]. *地学前缘*, 28(5): 49–58.
- 刘海, 康博, 管政亨, 等. 2023. 淮南煤矿区地表水和地下水水化学特征及控制因素[J]. *环境科学*, 44(11): 6038–6049.
- 刘海, 魏伟, 宋阳, 等. 2024. 庐庐断裂带(安徽段)浅层地下水水化学特征、控制因素及水质评价[J]. *环境科学*, 45(5): 2665–2677.
- 刘鑫, 向伟, 马小军, 等. 2021a. 黄土高原中部浅层地下水水化学特征及影响因素[J]. *中国环境科学*, 41(11): 5201–5209.
- 刘鑫, 向伟, 司炳成. 2021b. 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*, 42(6): 2817–2825.
- 刘鑫, 向伟, 司炳成. 2021c. 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*, 42(4): 1739–1749.
- 卢小慧, 王梦瑶, 龚绪龙, 等. 2024. 基于氢氧同位素的平原湖荡地表水与地下水转化研究[J]. *水利学报*, 55(4): 416–427.
- 牛盟, 刘甜思, 李辉, 等. 2023. 泾阳县地下水类型与化学特征研究[J]. *地下水*, 45(4): 72–74, 98.
- 魏善明, 丁冠涛, 袁国霞, 等. 2021. 山东省东汶河沂南地区地下水水化学特征及形成机理[J]. *地质学报*, 95(6): 1973–1983.
- 向伟, 刘鑫, 司炳成. 2024. 黄土高原区域尺度地下水稳定同位素特征及其指示意义[J]. *环境科学*, 45(9): 5290–5297.
- 徐盼盼. 2021. 重塑黄土渗透性变化的水-土作用机制研究[D]. 长安大学博士学位论文.
- 杨炳强. 2015. 泾阳南塬河滩村黄土滑坡的特征及致灾机理研究[D]. 长安大学硕士学位论文.
- 杨元波, 尚文斌, 廖显程, 等. 2023. 泾阳县地下水位动态变化特征研究[J]. *地下水*, 45(5): 99–101.
- 曾邯斌, 苏春利, 谢先军, 等. 2021. 河套灌区西部浅层地下水咸化机制[J]. *地球科学*, 46(6): 2267–2277.
- 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 等. 2018. 水文地质学基础(第七版)[M]. 北京: 地质出版社: 53–54.
- 张小筱. 2016. 泾阳南塬黄土边坡饱和渗透系数特性研究[D]. 长安大学硕士学位论文.
- 周殷竹, 马涛, 袁磊, 等. 2024. 陕西北洛河流域地下水水化学和同位素特征及其水质评价[J]. *中国地质*, 51(2): 663–675.
- 周金龙, 吴彬, 王毅萍, 等. 2009. 新疆塔里木盆地平原区中盐度地下水分布及其质量评价[J]. *中国农村水利水电*, (9): 32–36.