



引文格式: 乔英英, 王斯, 罗小凤, 等. 关中平原某工农业区地下水水文地球化学特征及人体健康风险评估[J]. 西北地质, 2026, 59(4): 339–353. DOI: 10.12401/j.nwg.2025113

Citation: QIAO Yingying, WANG Si, LUO Xiaofeng, et al. Hydrogeochemical Characteristics and Human Health Risk Assessment of Groundwater in a Industrial and Agricultural Area of Guanzhong Plain[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(4): 339–353. DOI: 10.12401/j.nwg.2025113

关中平原某工农业区地下水水文地球化学特征及 人体健康风险评估

乔英英¹, 王斯², 罗小凤¹, 王艳¹, 王西³, 张云辉^{4,*}

(1. 中陕核工业集团综合分析测试有限公司, 陕西 西安 710038; 2. 四川省自然资源实验测试研究中心, 四川 成都 610000;
3. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710000; 4. 西南交通大学地球科学与工程学院, 四川 成都 611756)

摘要: 地下水环境保护是区域水资源可持续利用的关键基础。针对关中平原某工农业区地下水水质特征与人体健康风险问题, 本研究系统采集 38 组地下水样品, 综合运用数理统计、Piper 三线图、离子比值分析及熵权水质指数法(EWQI)等方法开展水化学特征解析与健康风险评估。研究表明: ①水化学阳离子的浓度顺序为 $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$, 阴离子的浓度顺序为 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$, 主要水化学类型为 Na-Cl- SO_4 和 Na-Ca- HCO_3 型; ②水化学演化受白云石溶解和阳离子交换作用主导, NO_3^- 浓度高低分布与工业活动密切相关; ③EWQI 评价显示 92.1% 样品水质适宜饮用, 劣质水集中分布于中南部的工业聚集区; ④针对 F^- 和 NO_3^- 人类健康风险评估表明, 不同人群的非致癌人类健康风险顺序为: 儿童 > 成年女性 > 成年男性。建议通过优化工业布局、控制农业面源污染等针对性措施降低健康风险。研究成果为黄土塬区地下水污染防治与可持续管理提供了科学依据。

关键词: 地下水; 水化学特征; 地下水质量; 人体健康风险

中图分类号: P641

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)04-0339-15

Hydrogeochemical Characteristics and Human Health Risk Assessment of Groundwater in a Industrial and Agricultural Area of Guanzhong Plain

QIAO Yingying¹, WANG Si², LUO Xiaofeng¹, WANG Yan¹, WANG Xi³, ZHANG Yunhui^{4,*}

(1. Comprehensive Analysis Test Co., Ltd, Zhongshan Nuclear Industry Group, Xi'an 710038, Shaanxi, China; 2. Sichuan Province Natural Resources Experimental Test Research Center, Chengdu 610000, Sichuan, China; 3. Xi'an Mineral Resources Survey Center of China Geological Survey, Xi'an 710000, Shaanxi, China; 4. Faculty of Geosciences and Engineering,

收稿日期: 2024-05-25; 修回日期: 2025-08-25; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 陕西省科学技术厅创新能力支撑计划项目“陕西省放射性物质专业检验检测服务平台”(2020PT-042), 陕西省科学技术协会青年人才托举计划项目“重金属 Cr(VI) 污染治理关键技术研究”(20230509)联合资助。

作者简介: 乔英英(1984–), 女, 高级工程师, 主要从事地质试验及环境水和土壤污染来源、传播和污染控制研究。E-mail: 350033031@qq.com。

* 通讯作者: 张云辉(1990–), 男, 副教授, 博士, 主要从事水文地质与环境地质教学科研工作。E-mail: zhangyunhui@swjtu.edu.cn。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China)

Abstract: The protection of groundwater environment is a critical foundation for the sustainable utilization of regional water resources. To address the issues of groundwater quality characteristics and human health risks in industrial and agricultural area of Guanzhong plain, this study systematically collected 38 groundwater samples and comprehensively applied mathematical statistics, Piper trilinear diagram, ion ratio analysis, and entropy-weighted water quality index (EWQI) methods to analyze hydrochemical characteristics and assess health risks. The results indicate that: ① The concentration order of cations is $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$, while the concentration order of anions is $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$, with the main hydrochemical types being Na-Cl- SO_4 and Na-Ca- HCO_3 ; ② The hydrochemical evolution is dominated by dolomite dissolution and cation exchange, and the distribution of NO_3^- concentrations is closely related to industrial activities; ③ EWQI evaluation shows that 92.1% of the samples are suitable for drinking, with poor-quality water mainly concentrated in the industrial agglomeration area in the central-southern part of the region; ④ Human health risk assessment of F^- and NO_3^- indicates that the non-carcinogenic health risks for different populations follow the order: children > adult females > adult males. It is recommended to reduce health risks through targeted measures such as optimizing industrial layout and controlling agricultural non-point source pollution. The research results provide a scientific basis for groundwater pollution prevention and sustainable management in the Loess Tableland region.

Keywords: groundwater; hydrochemical characteristics; groundwater quality; human health risk

水资源是地球上生物体赖以生存的物质基础,在人类经济社会发展过程中不可或缺(Li et al., 2020)。地下水是十分重要的水资源,亦是地球上最充足、分布最广泛的淡水资源。因其具有水量稳定、水质清洁等优点,是居民饮用和工农业生产的重要水源(Xu et al., 2019; Gao et al., 2024)。西北地区地表水在水资源总量中占比较低,地下水是主要的供水水源,尤其在一些干旱地区甚至是唯一的水源(Li et al., 2018a)。然而,现今因气候变化和人类活动(工业生产、农业活动等)强度增大,包括中国在内的世界范围内地下水严重枯竭和污染,其极大地影响着农业生产和居民生活用水。因此,保证水资源质量成为当下最需要解决的问题之一。当前,开展地下水水文地球化学调查,评估水质质量和评价人体健康风险对于地下水资源的持续开发和利用、控制地下水污染和维护安全饮用水至关重要(Xu et al., 2019; Li et al., 2020; Adimalla et al., 2021; 张帆等, 2023; 赵敏等, 2025; 李广英等, 2026)。

中国西北地区大多属于干旱、半干旱气候,地表水季节性变化明显,地下水水质和水量相对稳定和有保障,成为该区主要供水水源之一。近年来,众多学者开展了干旱、半干旱地区地下水水化学特征、水质和人体健康风险评价等研究工作(苏贺, 2018; Li et al., 2018b; Zhang et al., 2019; Wang et al., 2020; 黄建军等,

2021; 杨明远等, 2023; 吴君毅等, 2023; 刘春燕, 2024)。刘宜鑫等(2022)明确了西安市主城区地下水水化学特征并进行了水质评价; Zhang et al. (2020a)调查了中国泾惠渠灌区(陕西中部)地下水化学特征、过程和控制因素,还使用健康风险评估模型量化了 Cr^{6+} 对人类健康的影响。Zhang et al. (2020b)对中国的半干旱地区使用水质指数(WQI)评估,并选取硝酸盐和氟化物等作为指标,进一步对人体健康风险进行了评估,认为儿童更容易受到污染。

关中平原是陕西省人口分布最多,经济发展水平最高的区域(李慧, 2018; 刘宜鑫等, 2022)。研究区位于陕西省中部,人口约 46 万,区内第一产业和第二产业分别为农业和工业。地下水是本区居民生活、农业和工业的重要水源。牟海斌等(2022)对研究区的地下水水化学特征与形成作用开展了研究,但该研究样品点分布广泛,可能导致局部特征被平均化,难以准确反映地下水系统的空间差异性。目前,研究区地下水研究基础薄弱,尤其缺乏对该区地下水水化学类型、水质质量及其空间分布等方面的研究。因此,急需开展研究区地下水水文化学地球特征及人体健康风险评估的研究,以期推进研究区以及关中平原的地下水资源可持续利用。

通过收集和整理研究区地质、水文地质资料,本

研究旨在: ①明晰研究区地下水水文地球化学成分的总体特征及其空间分布态势; ②探究区内地下水主要离子来源; ③通过计算区内熵权水质指数评价研究区地下水水质及掌握其空间分布规律; ④计算健康风险总指数(HI), 通过成年男性、成年女性和儿童的经口摄入和皮肤接触途径评估非致癌风险。研究成果对研究区乃至关中平原地下水资源的开发利用和管理具有重要的科学价值和指导意义。

1 研究区概况

研究区位于陕西省关中平原腹地(图1), 泾河、渭河两岸, 西安市北部。研究区东西长为 20.55 km, 南北宽为 20.1 km, 总面积为 294 km²。地势自西北向东南倾斜, 海拔为 275~446 m, 相对高差为 171 m。北部为平川, 占总面积的 76.7%, 主要为淤土, 灌溉条件良好; 偏南部为塬地(占 14%), 主要为姜土, 塬面略有起伏, 沟壑发育; 滩地(占 3.7%), 地势低平, 主要为潮土, 土壤疏松(黄建军等, 2021; 牟海斌等, 2022)。研究区属暖温带季风气候, 最高气温为 41.4 ℃, 最低气温为 -20.8 ℃, 年平均气温为 13.2 ℃, 年降水量为 540 mm(牟海斌等, 2022)。

研究区的水域主要包括泾河和渭河, 水域占全境面积的 5.6%。渭河自西向东流经境域南部, 境内流长约为 20 km。泾河自西北向东南在泾渭镇泾渭堡东北流入渭河, 境内流长为 13 km(牟海斌等, 2022)。区域含水层主要由第四系松散堆积物组成, 自上而下可分为潜水含水层和承压水含水层。潜水含水层厚度较大, 分布广泛; 承压水含水层则厚度较小, 分布不均。

区内地下水分布、富水性及补给条件受地形地貌、河流水系影响显著。本区地形地貌由北至南依次划分为山前冲洪积平原、一级冲洪积平原、二级冲洪积平原、渭河三级阶地及泾河一级阶地。由北至南, 靠近渭河, 含水层岩性颗粒逐渐变粗, 由山前冲洪积平原的粉细砂为主, 变为泾河一级阶地的中粗砂为主, 富水性逐渐变好。地下水径流方向与地形倾向一致, 由西北流向东南排泄于渭河(牟海斌等, 2022)。研究区冲积平原的潜水主要由大气降水、河水以及人工地表水体的渗入、承压水等补给。地下水排泄主要由垂直蒸发与水平排泄为主。

研究区位于关中盆地中部, 处第四系固市凹陷与西安凹陷之间(刘林等, 2018)。地层属华北地区层、汾渭分区、渭河小区。地质构造简单, 地表出露地层单一。全境地表均被第四系覆盖, 局部地段有第三系出露, 未见基底岩裸露(刘林等, 2018)。其中, 出露的第四系地层为上更新统至全新统地层。上更新统上部为马栏组风积层, 岩性为灰黄色疏松状垂直节理发育的砂质黄土, 底部可见厚 4~5 m 富含钙质结核的古壤层, 厚度为 20~30 m。下部为乾县组冲积层, 岩性为粘质砂土、砂质黏土及砂卵石层(未见底)。全新统上部冲积层分布于泾、渭河的河漫滩地带, 岩性为冲积砂、砂砾卵石层及亚砂土、亚黏土, 厚度为 2~38 m; 下部冲积层分布于泾、渭河一级阶地冲积平原内, 岩性为砂质黏土、粘质砂土、砂、砂卵石层, 厚度约 80 m。

研究区所处大地构造位置为汾渭断陷渭河断陷区域, 地表覆盖层深厚, 基底隐伏断层较多, 主要有宝鸡-咸阳-渭南断层及泾阳-高陵-渭南断层组成地垒

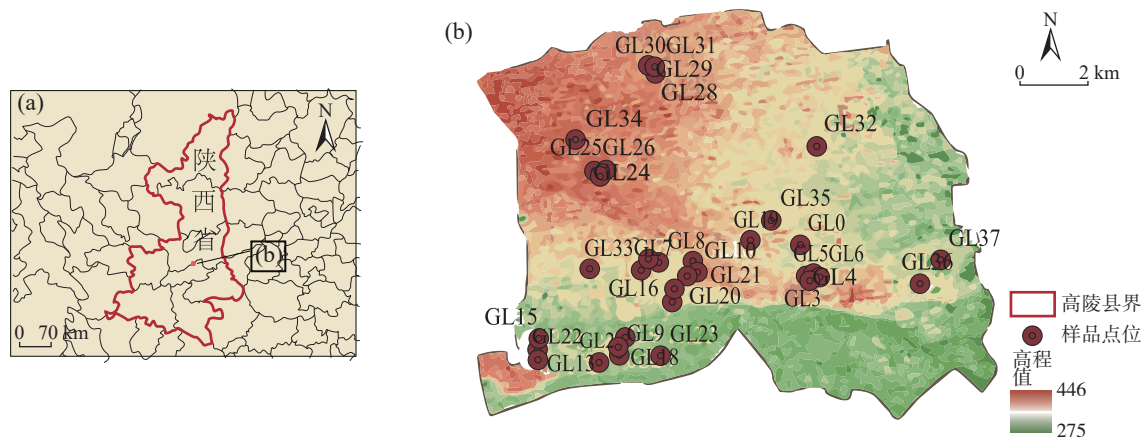


图1 研究区域(a)和采样点位置(b)

Fig. 1 (a) Location of the study area and (b) sampling points

式结构的构造形式(曹建平等, 2017; 刘林等, 2018)。宝鸡-咸阳-渭南断层为秦岭地槽褶皱带与陕甘宁台坳的分界, 呈 NEE 向由宝鸡经咸阳延伸至渭南。该断层是一早期为压性, 后期为张性的活跃性深层断裂, 倾向南, 倾角为 $70^{\circ} \sim 75^{\circ}$, 断距大于 1 000 m; 泾阳-高陵-渭南断层经高陵南、零口、渭南东至华县附近, 西段 NW 向, 东段 EW 向, 断层面北倾, 倾角 68° , 断距大于 1 000 m。其中, 西段推测断层位置处地面平坦, 仍处于隐伏状态, 活动不明显, 断层通过处黄土塬区有清楚陡坎, 属晚近时期活动断裂(苏英等, 2013; 曹建平等, 2017; 黄建军等, 2021)。

2 研究方法

2.1 样品采集与分析测试

本研究采集包括民井和监测井(井深为 21~70 m)在内的 38 件水样, 样品主要集中在人类活动较多的西南地区(图 1b)。采集水样前, 使用手持 GPS 设备记录水样点地理位置。为了确保水质参数的准确结果, 且尽量减少井眼积水的影响。现场采用贝勒管抽水法, 使用大于三倍井眼积水的水量清洗生活井。用 DS500 系列便携式多参数水质仪实时监测水样, 确保参数稳定后, 采集水样, 当采集井较深时采用贝勒管取水。水样采用 550 ml 高密度聚乙烯瓶保存, 用 DS500 系列便携式多参数水质仪原位测量温度及 pH 等。所有样品收集后于 4°C 冷藏保存, 送回中陕核工业集团测试分公司实验室后一周内进行分析。结合检测参数标准分析方法和《地下水环境监测技术规范》(HJ 164—2020)要求, 在分析测试过程中从空白分析、精密度分析、准确度分析、中间点校准分析、标准样品分析等方面进行质量控制。质量控制方式、频次及检测结果均满足标准分析方法和《地下水环境监测技术规范》(HJ 164—2020)的要求。研究区地下水 TH 采用玻璃电极法(GB/T 6920—1986), TDS 采用溶解性固体总量测定的重量法(DZ/T 0064.9—2021)。阳离子(K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Mg^{2+})采用电感耦合等离子体发射光谱法(HJ 776—2015)测定。阴离子(Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^-)采用离子色谱法(HJ 84—2016)测定, HCO_3^- 采用滴定法(DZ/T 0064.49—1993)测定。研究区所有地下水样品按照《水质采样技术规范样品保存和处理(2019)》中相应方法采集和储存, 均满足相应要求。据公式(1)计算所采集水样主要阳离子和阴离子的电

荷平衡误差(CBE), 其误差均为 $\pm 5\%$ 。

$$CBE = \frac{\sum \text{阳离子浓度} - \sum \text{阴离子浓度}}{\sum \text{阳离子浓度} + \sum \text{阴离子浓度}} \times 100\% \quad (1)$$

2.2 熵权水质指数(EWQI)

本研究采用改进的 WQI 方法, 利用熵权法对地下水质量进行评价。熵权法是一种客观赋权方法, 是利用信息熵的工具计算各指标的权重, 可以减少因忽略权重而带来的误差, 为多个指标的综合评价提供依据。该方法将信息熵引入水质指标的定量评价中, 以此消除人为主观对数据分析的影响, 达到定量分析的目的(Li et al., 2010; Wang et al., 2022)。EWQI 计算过程主要分为 5 个步骤。

(1) 建立初始矩阵 X_{ij} , 计算过程表达为公式(2)。

$$X_{ij} = (x_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: x_{ij} 为原始测量数据; m 为地下水样品个数; n 为评价水化学指标个数。

(2) 数据标准化, 计算方法为公式(3)和公式(4)。

$$y_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - (x_{ij})_{\min}}{(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}} \\ \frac{(x_{ij})_{\max} - x_{ij}}{(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}} \end{cases} \quad (3)$$

$$Y = (y_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m1} & \cdots & y_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $(y_{ij})_{\max}$ 为最大值, $(y_{ij})_{\min}$ 为最小值。

(3) 计算信息熵“ e_j ”和熵权“ w_j ”, 计算过程表达为公式(5)~公式(7)。

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m (P_{ij} \times \ln P_{ij}) \quad (5)$$

$$P_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_i y_{ij}} \quad (6)$$

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{i=1}^n (1 - e_j)} \quad (7)$$

式中: P_{ij} 为样品 i 的第 j 个指标值。

(4) 质量评定量表(q_j), 计算过程表达为公式(8)~公式(9)。

$$q_j = \frac{C_j}{S_j} \times 100 \quad (8)$$

$$q_{\text{pH}} = \begin{cases} \frac{C_{\text{pH}} - 7}{8.5 - 7} \times 100, & \text{pH} > 7 \\ \frac{7 - C_{\text{pH}}}{7 - 6.5} \times 100, & \text{pH} \leq 7 \end{cases} \quad (9)$$

式中: “ q_j ”是水化学指标分级的定量标度,由水化学组分浓度 C_j 及其相关饮水标准 S_j 计算得出。由于pH为无量纲数据,且规范为范围值,所以对其作单独计算公式 q_{pH} ,其中 C_{pH} 为pH的实测浓度值。

(5) 计算EWQI值,计算过程表达为公式(10)。

$$\text{EWQI} = \sum_{j=1}^m (w_j \times q_j) \quad (10)$$

按照EWQI分级(表1; Zhang et al., 2021)标准,规定EWQI>100时水体不适合人体饮用。

表1 基于EWQI值的水质分级标准

Tab. 1 Water quality grading standard based on EWQI value

等级	EWQI值	水质评价
1	0<值<25	优秀
2	25≤值<50	良好
3	50≤值<100	中等
4	100≤值<150	差
5	值≥150	极差

2.3 人体健康风险评估

非致癌风险评价方法适用于评估长期暴露于低浓度污染物对人体健康的潜在影响(USEPA, 2009)。长期摄入过量氟离子导致氟斑牙和氟骨症等健康问题,但通常不直接引发癌症,属于非致癌健康风险;高浓度硝酸盐在体内可能转化为亚硝酸盐,进而引发蓝婴综合征,但其致癌性较弱,主要被视为非致癌健康风险。因此,本研究主要针对地下水中的 F^- 和 NO_3^- 采用非致癌风险对研究区地下水的人体健康风险进行评价,采用美国环境保护署(USEPA)提出的健康风险评估数学模型对研究区潜在危害进行定量评估(USEPA, 2009)。污染水体可以通过多种途径对人体健康造成风险,例如皮肤接触(沐浴)和摄入水(口服)这两个直接途径(Jayarajan et al., 2021)。因此,本研究主要根据人体健康风险评估中的暴露参数(表2)和公式(11)~公式(16)对皮肤接触和经口摄入的非致癌风险进行评估(Wu et al., 2018; He et al., 2020; Zhang et al., 2021),选择儿童、成年男性和成年女性作为受体评估对象,分析过多接触和过量摄入研究区地下水中的 F^- 和 NO_3^- 对儿童、成年男性和成年女性的健康危

害程度。

(1) 计算饮用水中污染物的长期每日摄入量(CDI),计算过程表达为公式(11)。

$$\text{CDI} = \frac{Ci \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (11)$$

(2) 计算经口摄入的危害商数 HQ_{oral} ,计算过程表达为公式(12)。

$$HQ_{\text{oral}} = \frac{\text{CDI}}{\text{RfD}_{\text{oral}}} \quad (12)$$

(3) 计算用水中污染物的长期每日皮肤接触量(CDD),计算过程表达为公式(13)。

$$\text{CDD} = (Ci \times K \times C \times t \times CF \times EV \times SA \times EF \times ED) / (EW \times AT) \quad (13)$$

(4) 计算皮肤接触的危害商数 HQ_{derm} ,计算过程表达为公式(14)。

$$HQ_{\text{derm}} = \frac{\text{CDD}}{\text{RfD}_{\text{derm}}} \quad (14)$$

(5) 计算健康风险总指数HI,计算过程表达为公式(15)~公式(16)。

$$HQ = HQ_{\text{oral}} + HQ_{\text{derm}} \quad (15)$$

$$HI = \sum_i^n HQ_i \quad (16)$$

3 结果与分析

3.1 地下水化学组分特征

水文地球化学成分的统计分析通常用于分析水文地球化学的一般特征(Yidana et al., 2018; Feng et al., 2020)。本次对研究区地下水的pH、TH、TDS、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Cl^- 、 F^- 、 NO_3^- 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 共12个指标,对其最小值、最大值、均值、标准差、变异系数、峰度和偏度等参数进行统计分析(图2、表3)。此外,利用ArcGIS 10.7(地理信息系统软件)软件,采用反距离权重插值法(IDW)绘制了研究区地下水中TDS、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 和 F^- 质量浓度空间分布插值图(图3)。

研究区地下水pH值呈现出7.10~9.70的波动区间(均值为7.68),整体表现为弱碱性特征。总硬度(TH)范围为25~1 583 mg/L(均值为579.13 mg/L),参考《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017),研究区大部分地下水样品总硬度超过450 mg/L,主要处于硬水范围。TH异常值位于较大一侧(图2),表明数据分布呈右偏态,且其离散程度较为显著。溶解性总固体

表 2 人体健康风险评估中的暴露参数
Tab. 2 Exposure parameters in human health risk assessment

	参数(非致癌)	单位	儿童	成年女性	成年男性
经口摄入	C_i 污染物浓度	mg/L	—	—	—
	IR 饮水摄取率	L/day	0.7	1.5	1.5
	EF 暴露频率	days/year	365	365	365
	ED 持续暴露时间	years	12	32	32
	BW 体重(平均)	kg	26.8	59	69.6
	AT 非致癌暴露时间	days	4 380	11 680	11 680
	RfD_{oral} F 直接摄入参考剂量	mg/(kg·day)	0.04	0.04	0.04
	RfD_{oral} NO_3 直接摄入参考剂量	mg/(kg·day)	1.6	1.6	1.6
经皮肤接触	K 皮肤渗透系数	cm/h	0.001	0.001	0.001
	C_i 污染物浓度	mg/L	—	—	—
	t 接触持续时间	h/day	0.4	0.4	0.4
	CF 转换因子	—	0.001	0.001	0.001
	EV 洗漱频率	times/day	1	1	1
	SA 皮肤接触面积	cm ²	8 905.41	16 246.82	18 230.74
	BH 身高(平均)	cm	99.4	158.00	169.70
	EF 暴露频率	days/year	200	200	200
	ED 持续暴露时间	years	12	32	32
	BW 体重(平均)	kg	26.8	59	69.6
	AT 非致癌暴露时间	days	4 380	11 680	11 680
	RfD_{derm} F 皮肤接触参考剂量	mg/(kg·day)	0.04	0.04	0.04
	RfD_{derm} NO_3 直接摄入参考剂量	mg/(kg·day)	1.6	1.6	1.6

(TDS)范围为 274.00~11 024.00 mg/L(均值为 1 461.53 mg/L), 其中有一处 TDS 浓度高达 11 024.00 mg/L, 未达到世界卫生组织(WHO, 2011)所规定的饮用标准(1 000 mg/L), 箱体较扁代表 TDS 数据波动性较小(图 2), 说明大部分样品数据较稳定且离散程度小。TDS 浓度较高区域主要分布在研究区东南部 and 东北部(图 3)。地下水中阳离子 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 的浓度范围分别为 0.41~1 500.00 mg/L、1.41~116.00 mg/L、0.76~339.00 mg/L 和 10.97~2 117.50 mg/L(其均值依次为 43.07 mg/L、47.04 mg/L、97.56 mg/L、301.27 mg/L)。 Ca^{2+} 浓度数据的离散程度相对较大, 并且主要集中在研究区西北部(图 1, 图 2)。 Mg^{2+} 浓度数据存在较多异常值且分布在较大值一侧, 表明 Mg^{2+} 的浓度数据不遵循正态分布, 呈右偏态分布, 其浓度空间分布主要集中在研究区西部。 Na^+ 浓度数据波动较小, 数据稳定; 其浓度空间分布主要集中在研究区东南部。阴离子 Cl^- 、 F^- 、 NO_3^- 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 的浓度分别为

3.16~4 576.50 mg/L、0.31~3.28 mg/L、0.00~47.20 mg/L、66.04~4 405.10 mg/L 和 21.00~988.00 mg/L(均值为 310.45 mg/L、1.14 mg/L、9.80 mg/L、661.82 mg/L 和 326.35 mg/L)。其中, Cl^- 和 HCO_3^- 的浓度数据波动小且较为稳定, HCO_3^- 浓度较高区域主要集中在研究区东南部。 F^- 浓度较高区域主要分布在研究区西南部和东南部。 NO_3^- 数据存在较多异常值且集中在较大值一侧, 表明 NO_3^- 浓度数据的分布呈右偏态分布, 其浓度空间分布主要集中在研究区西北部。 SO_4^{2-} 浓度较高区域主要集中在研究区东北部。值得注意的是, K^+ 和 Cl^- 浓度的空间分布相似, 主要分布在研究区东南部, 这暗示它们可能源于相同的人类活动。

3.2 水化学类型

基于研究区地下水中 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 等测试数据绘制 Piper 三线图, 以分析区域地下水水化学类型和组分特征(图 4)。

区内水样阳离子的离子优势为 $Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} >$

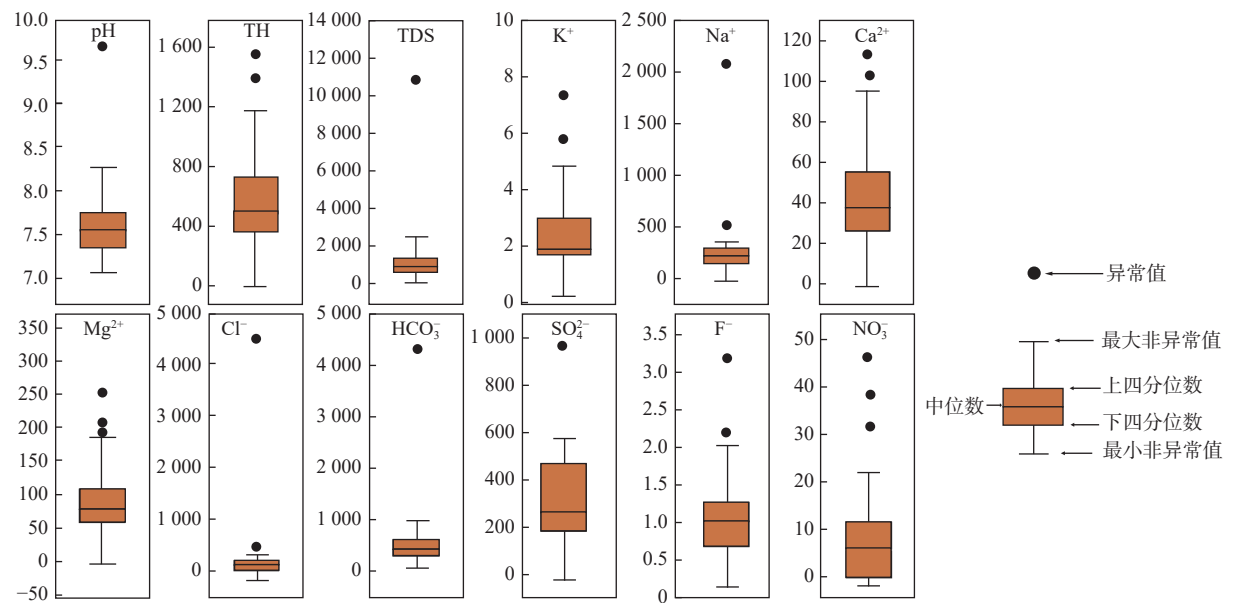


图2 地下水主要指标统计箱线图

Fig. 2 Statistical Box and Whisker plot of main indexes of groundwater

表 3 地下水主要指标统计分析

Tab. 3 Statistical analysis of main indexes of groundwater

主要指标	pH	TH (mg/L)	TDS (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)
最大值	9.70	1 583.00	11 024.00	1 500.00	2 117.50	116.00
最小值	7.10	28.00	274.00	0.41	10.97	1.41
平均值	7.68	579.13	1 461.53	43.07	301.27	47.04
标准差	0.43	355.72	1 683.70	242.81	321.60	28.00
变异系数	0.06	0.61	1.15	5.64	1.07	0.60
峰度	13.37	0.94	29.86	37.95	29.15	0.08
偏度	2.98	0.95	5.19	6.16	5.09	0.93
主要指标	Mg ²⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	F ⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)
最大值	339.00	4 576.50	47.20	988.00	3.28	4 405.10
最小值	0.76	3.16	0.00	21.00	0.31	66.04
平均值	97.56	310.45	9.80	326.35	1.14	661.82
标准差	72.31	723.27	11.51	202.17	0.60	662.06
变异系数	0.74	2.33	1.17	0.62	0.52	1.00
峰度	2.43	35.22	2.58	1.60	3.50	29.28
偏度	1.35	5.84	1.62	0.85	1.48	5.11

K⁺, 阴离子的离子优势为 HCO₃⁻>SO₄²⁻>Cl⁻>NO₃⁻, 阳离子和阴离子主要以 Na⁺和 HCO₃⁻为主(表 3, 图 4)。地下水化学类型主要为 Na-Cl-SO₄型和 Na-Ca-HCO₃型,前者占总体的 31.6%,后者占总体的 39.5%。

3.3 水化学成因分析

3.3.1 Gibbs 分析

Gibbs 图被广泛用于分析水体溶质组分成因类型

(Gibbs, 1970), 其构建原理是以 TDS 质量浓度值为对数纵坐标, 以 Cl⁻/(Cl⁻+HCO₃⁻)和 Na⁺/(Na⁺+Ca²⁺)为横坐标, 反映大气降水、岩石风化、蒸发结晶等天然因素对水化学形成过程的影响(刘林等, 2023; 郭高轩等, 2024; 朱春芳等, 2025)。所测定的 Cl⁻/(Cl⁻+HCO₃⁻)和 Na⁺/(Na⁺+Ca²⁺)的离子比值分别为 0.01~0.66 和 0.26~1.00。研究区域的样品离子主要集中分布于水岩作用

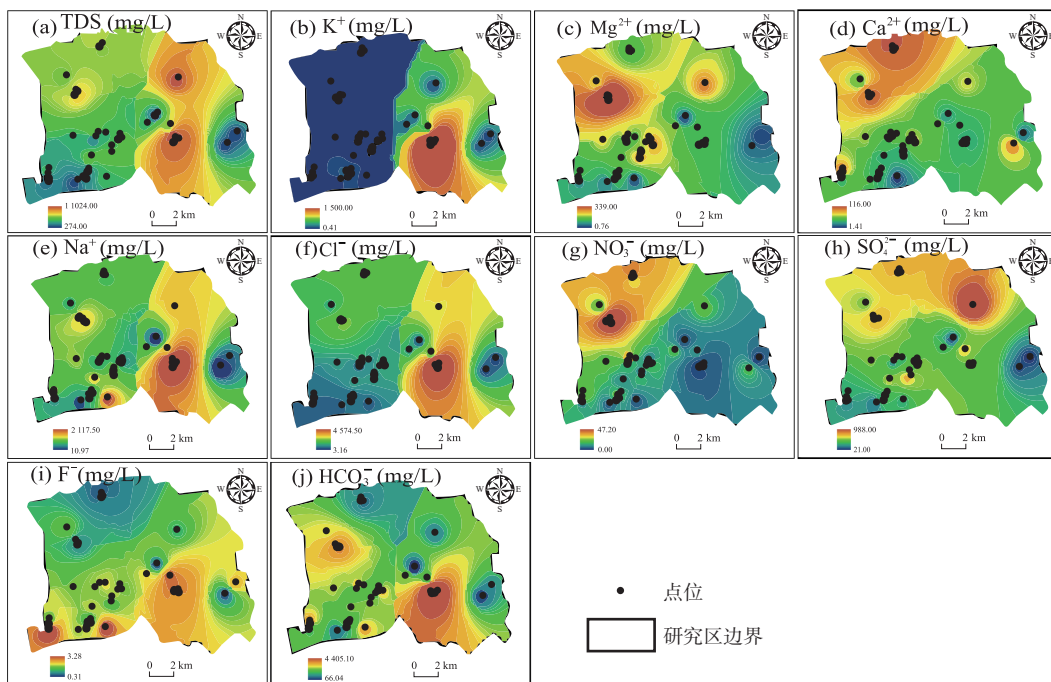


图3 研究区化学组分浓度空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution diagram of chemical composition concentration in study area

- ① Ca-HCO₃ 类型
- ② Na-Cl-SO₄ 类型
- ③ 混合的 Ca-Na-HCO₃ 类型
- ④ 混合的 Ca-Mg-Cl 类型
- ⑤ Ca-Cl 类型
- ⑥ Na-HCO₃ 类型

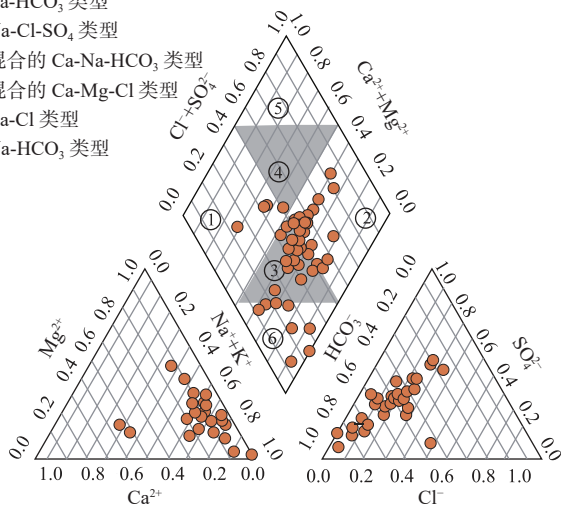


图4 地下水样品的 Piper 三线图

Fig. 4 Piper trilinear diagram of groundwater samples

影响区域(图 5), 揭示了水岩相互作用是研究区地下水化学形成的主要原因。部分水样呈现出向蒸发作用影响区域漂移的态势, 可推断在该区域由于潜水埋深相对较浅, 地下水化学组分亦受到蒸发作用影响。

3.3.2 主要离子比分析

水体中各离子组分的比值在研究水体离子来源方面具有关键作用, 通过绘制研究区域内主要离子比值图, 能够深入剖析研究区水文地球化学的演化进程

(吴嘉铃等, 2022; 蔡磊等, 2023)。岩盐溶解产生的 Na⁺和 Cl⁻的摩尔比为 1 : 1, 所以 Cl⁻/Na⁺常用来揭示地下水中 Na⁺和 Cl⁻的来源 (Liu et al., 2022; Wu et al., 2018)。研究区大部分地下水样品处于盐岩溶解 y=x 线以下(图 6a)。Cl⁻/Na⁺值为 0.02~1.40, 平均值为 0.53, 且 Na⁺浓度显著高于 Cl⁻浓度。由此可推断, Na⁺和 Cl⁻并非源于盐岩溶解过程, 过量的 Na⁺可能来源于矿物风化作用或离子交换过程。假设 SO₄²⁻和 Ca²⁺比值接近于 1, 可判断地下水中 SO₄²⁻和 Ca²⁺主要来源于硫酸盐矿物的溶解反应(李晓等, 2018; Wang et al., 2023)。研究区大部分地下水样品分布于石膏溶解的 y=x 线之上, 且未在 y=x 溶解线附近(图 6b), 表明样品中 SO₄²⁻和 Ca²⁺的主要来源为石膏溶解, 但并非唯一来源, 推测可能存在阳离子交换作用, 导致 Ca²⁺浓度降低, 或者存在其他硫酸盐矿物的溶解, 导致 SO₄²⁻浓度升高。通过分析 Ca²⁺和 HCO₃⁻的比值图(图 6c), 可知研究区多数样本处于白云石溶解 y=2x 线上方, 仅有极少部分样品处于白云石溶解线 y=2x 和方解石溶解线 y=x 的过渡区域, 意味着研究区地下水中 Ca²⁺和 HCO₃⁻主要来源于白云石溶解(Yao et al., 2022), 极少部分受到方解石溶解的影响。为进一步探究水岩相互作用的影响方式, 利用端元法, 依据 Mg²⁺/Na⁺、Ca²⁺/Na⁺以及 HCO₃⁻/Na⁺值, 将样品离子的主要来源划分为碳酸盐岩、硅酸盐岩和蒸发盐岩这 3 种类型

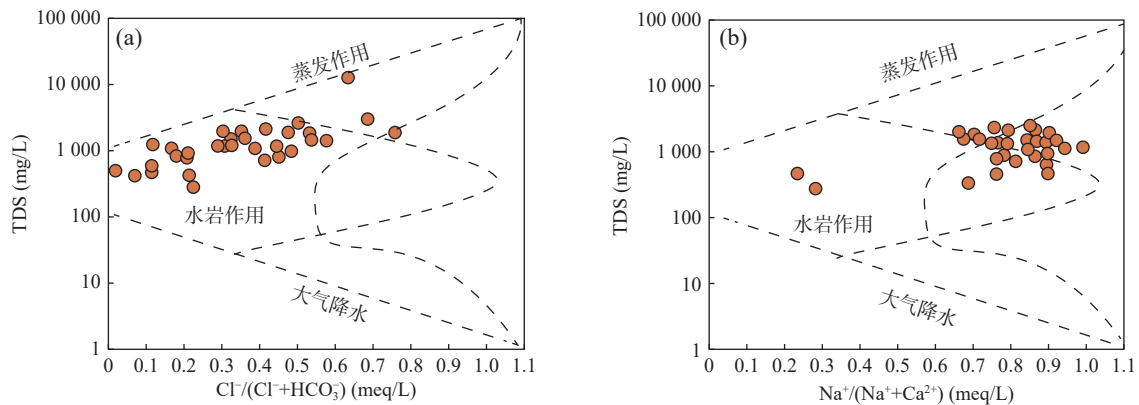


图5 研究区地下水样品 Gibbs 图

Fig. 5 Gibbs diagram of groundwater samples in the study area

(Xing et al., 2013)。在 Mg^{2+}/Na^+ 和 Ca^{2+}/Na^+ 的离子比图(图 6d、图 6e)中,地下水样品集中分布于硅酸盐岩和蒸发岩之间的过渡区域且围绕硅酸盐岩端分布; HCO_3^-/Na^+ 和 Ca^{2+}/Na^+ 的离子比值图中,研究区地下水样品主要位于硅酸盐岩与碳酸盐岩的过渡区域,且靠近硅酸盐岩端元,这充分表明研究区地下水主要受硅酸盐矿物风化作用的显著影响。

$HCO_3^-+SO_4^{2-}$ 和 $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ 二者的比值图可用于分析水中碳酸盐岩和硅酸盐岩的反应情况,如果仅受此两类岩石控制平衡,样点会分布在 $y=x$ 溶解线上(黄珣等, 2024; 罗欢等, 2024)。地下水样品主要分布在 $y=x$ 线上方(图 6f),进一步证实了硅酸盐风化对地下水化学组成具有显著影响,与上述分析一致。 $(Na^++K^+-Cl^-)$ 与 $(Ca^{2+}+Mg^{2+})-(HCO_3^-+SO_4^{2-})$ 的比值也反映了离子交换的存在。氯碱指数 CAI-I 和 CAI-II 是判定含水层中发生离子交换的重要指标(Kumar et al., 2018),可由公式(17)和公式(18)来计算。

$$CAI-I = (Cl^- - (Na^+ + K^+))/Cl^- \quad (17)$$

$$CAI-II = (Cl^- - (Na^+ + K^+))/(HCO_3^- + SO_4^{2-} + CO_3^{2-} + NO_3^-) \quad (18)$$

地下水中的 CAI 值大多数小于零(图 6h),表示在研究区中各样品存在阳离子交换过程。矿物饱和度(SI)作为衡量水与矿物之间处于溶解或沉淀状态的关键参数,在水文地球化学研究领域具有重要意义(袁兴成等, 2023; 邓承东等, 2025)。本研究借助 PHREEQC 3.9 软件计算方解石、白云石、石膏和岩盐的饱和度(图 6i),地下水样品中方解石的 SI 平均值为 0.10,白云石的 SI 平均值为 0.77,表明研究区地下 waters 方解石、白云石表现出较饱和的特征;地下水样品中的石膏和岩盐的 SI 平均值分别为 -0.83 和 -6.14,表

明石膏和岩盐均处于未饱和状态。

3.3.3 NO_3^- 和 Cl^- 来源分析

在地下水环境遭受人为活动显著影响的情形下,其中的 NO_3^- 和 Cl^- 的浓度会呈现升高态势,并且 NO_3^-/Na^+ 和 Cl^-/Na^+ 值越高,则表明人为活动对研究区地下水影响程度越大(彭红霞等, 2021)。在 NO_3^-/Na^+ 和 Cl^-/Na^+ 值图(图 7a、图 7b)中,地下水样品主要分布在城市污水端和农业活动端之间的区域,然而其分布态势较分散;在 SO_4^{2-}/Na^+ 和 NO_3^-/Na^+ 值图中,研究区域内 SO_4^{2-} 浓度大于 NO_3^- 浓度,且样品点偏向工业活动一侧。由此推断地下水中的 NO_3^- 和 Cl^- 的浓度主要受到城市工业污水的影响,同时部分受到农业活动污水的作用。

3.4 基于熵权水质指数(EWQI)的饮用水质分析

熵权水质指数(EWQI)是评估地下水是否适合饮用的重要工具,可以减少因忽略权重而带来的误差,为多个指标的综合评价提供依据(Xiao et al., 2021)。根据本研究实验结果,可将水质指标等级分为 5 级,分别为优秀(25)、良好(25~50)、中等(50~100)、差(100~150)和极差(≥ 150)。其中,水质等级为“优秀”和“良好”的地下水水质较好且适合饮用。本研究计算结果表明,EWQI 值波动范围在 10.56~703.53,平均值为 70.17。研究区大部分地下水样品都处于“良好”和“中等”区域(图 8a),13.16% 的样品处于“优秀”区域,34.21% 的样品属于“良好”类别,44.74% 的样品属于“中等”范畴。存在 3 个样品的 EWQI 值大于 100,其水质表现为极差,不适宜人体饮用。

利用 ArcGIS 10.7 软件对 EWQI 开展反距离权重插值分析可知,研究区水质整体呈现出以中良为主的特征(图 8b)。地下水样品 EWQI 值超过安全饮用限

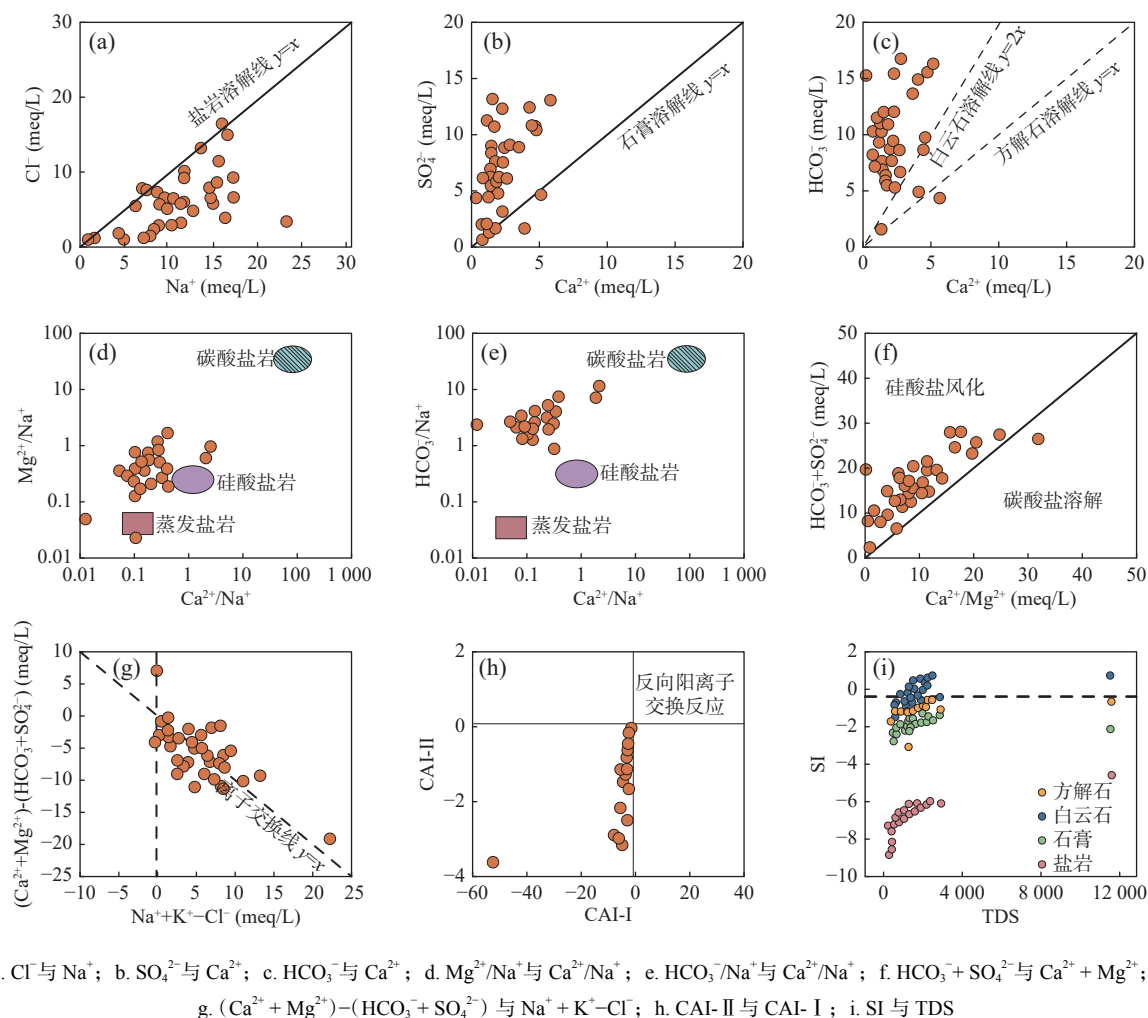
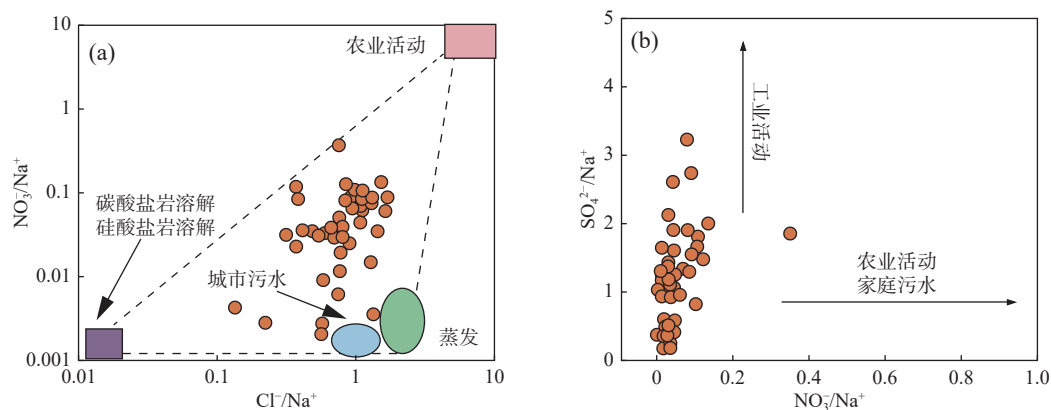


图6 地下水主要离子及其比值系数相关性图

Fig. 6 Correlation diagram of main ions in groundwater and their ratio coefficients in Gaoling area

图7 地下水 NO_3^- 离子来源解析图Fig. 7 Source analysis of NO_3^- pollution sources in groundwater in Gaoling area

值的区域主要集中在研究区中南部,该区域以城镇区为主(涵盖工矿用地及城镇建成区)。由于工业废水及生活污水的大量排放,导致该区域水质恶化。此外,

由于研究区地形呈现西北向东南倾斜的态势,这种地形特征促使该区域地下水中各种化学成分易于积聚,进而导致水体污染加重。因此,未来更需要重视研究

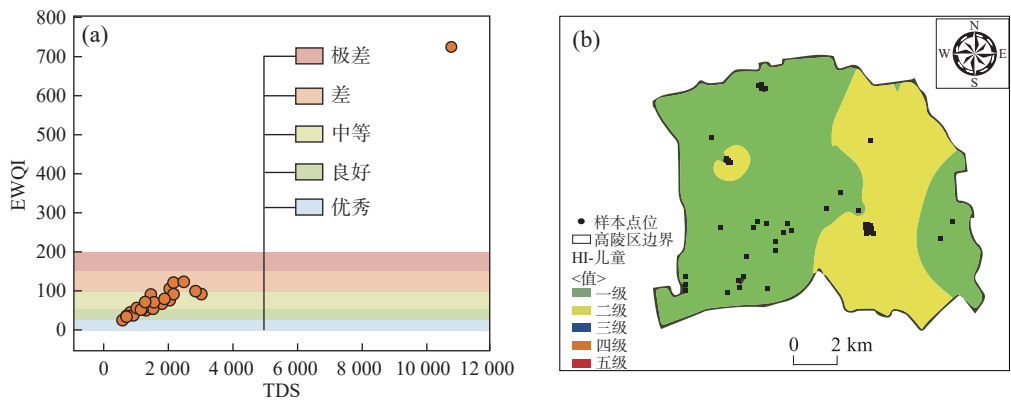


图8 EWQI 与 TDS 关系图(a)和 EWQI 空间分布图(b)

Fig. 8 (a) Relationship diagram between EWQI and TDS, (b) spatial distribution map of EWQI

区中南部地区地下水的长期保护及动态监测,以保障地下水环境的可持续性与安全性,为区域水资源合理运用及生态环境保护提供支持。

3.5 人体健康风险评估

本研究采用美国国家环境保护署健康风险评价模型(USEPA, 2009)对研究区地下水中的 F 和 NO₃⁻ 进行计算分析。主要计算了成年男性、成年女性和儿童因经口摄入和皮肤接触 F 和 NO₃⁻ 而产生的健康风险总指数(HI)(表 4)。其中,成年男性的 HI 总值为 0.18~1.78(平均值为 0.75),成年女性的 HI 总值为 0.21~2.10(平均值为 0.88),儿童的 HI 总值为 0.22~2.16(平均值为 0.91)。结果显示,对成年女性和儿童而言,均有 4.5% 的水样其非致癌风险指数超过 1,而成年男性有 3% 的水样非致癌风险指数超过 1,这表明本研究区域总体上对人体健康的风险处于相对较低水平,然而,相较于成年男性,成年女性和儿童群体更易遭受 F 和 NO₃⁻ 污染所带来的健康损害。此外,通过进一步计算比较发现,研究区健康风险总指数构成中, F 和 NO₃⁻ 的健康风险指数分别占健康风险总指数的 82.29% 和 17.71%,这表明相较于硝酸盐,在饮用该研究区地下水时,人体健康更容易受到 F 的影响。

基于 GIS 软件中的反距离权重插值技术,在研究区地图上对非致癌人类健康风险的空间分布进行了可视化呈现。儿童群体的非致癌健康风险区域面积最大,约占研究区的近 1/4 区域,且 HI 总值较高区域集中分布在研究区南部和西南部(图 9d)。与儿童相比,成年女性和男性的非致癌健康风险区域面积相对较小,且集中在研究区的西南部。总体而言,非致癌健康风险区域面积大小顺序依次为儿童>成年女性>成年男性。

本研究中,地下水中 F 和 NO₃⁻ 的浓度受到多种因素影响,其中工业活动的影响较为显著,同时也受到农业活动和城市污水的部分影响(例如工业有机废水排放、生活污水的渗入和磷肥的生产和使用等)。人类若长期摄入硝酸盐浓度高的地下水,将会遭受一系列健康风险(如蓝婴综合症、食管癌、胃癌、甲状腺腺大等)(Zhang et al., 2021)。过量吸收氟化物,会让儿童的恒牙发育受到影响;氟污染也可以使动、植物中毒,进而对农业和牧业生产等造成负面影响(赵增锋等, 2023)。因此,针对 NO₃⁻ 所引发的人类健康风险,相应的针对性措施应聚焦于工农业活动的改进上,包括减少氮肥的使用、改变灌溉方式等;严格控制工业废水、生活污水的排放量,选择科学的施肥和科学的田间管理模式等措施来降低饮用水水源中的硝酸盐含量。针对 F 所致的人类健康风险,其针对性措施可以集中在减少部分工业生产,为了控制过量氟对人体健康的危害,要严格把控氟的排放量等,从而保障研

表 4 研究区地下水健康风险评估结果

Tab. 4 Results of groundwater health risk assessment in the study area					
	群体	最小值	最大值	平均值	标准差
HI-氟化物	男性	0.17	1.77	0.62	0.32
	女性	0.20	2.09	0.73	0.37
	儿童	0.20	2.15	0.75	0.38
HI-硝酸盐	男性	0.00	0.64	0.13	0.15
	女性	0.00	0.75	0.16	0.18
	儿童	0.00	0.77	0.16	0.19
HI-总	男性	0.18	1.78	0.75	0.28
	女性	0.21	2.10	0.88	0.33
	儿童	0.22	2.16	0.91	0.34

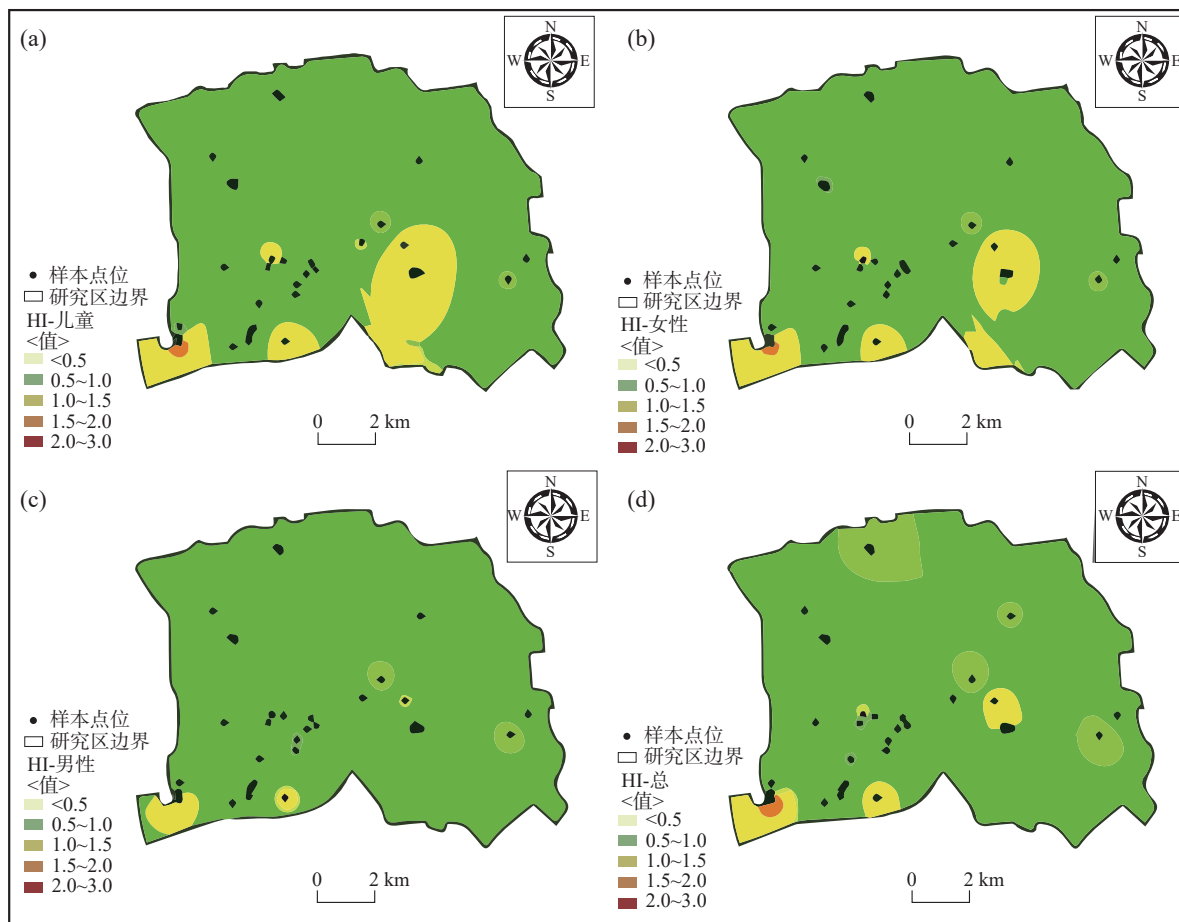


图9 不同年龄段人体健康风险评估健康指数空间分布图

Fig. 9 Spatial distribution diagram of health index for human health risk assessment in different age groups

究区居民的健康安全。

4 结论

(1)研究区地下水整体呈弱碱性, TDS 变化范围较大, 为 274~11 024 mg/L。阳离子的离子优势模式为 $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$, 阴离子的离子优势模式为 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ 。研究区主要的地下水类型为 Na-Cl- SO_4 和 Na-Ca- HCO_3 类型。水化学组成以白云石溶解和离子交换过程为主。 NO_3^- 污染主要归因于工业活动。

(2)根据熵权水质指数(EWQI)评价体系, 地下水样品中适宜饮用的占 92.11%, 不适宜饮用的仅占 7.89%。水质差、极差样品主要分布在研究区的西南部, 今后应重点关注该区域的地下水环境监管与保护。

(3)非致癌风险评估结果显示, 健康风险指数(HI)值及空间分布顺序为儿童>成年女性>成年男性。

健康风险评估明显发现, 研究地区的儿童和成年女性在摄入 F 和 NO_3^- 污染物的情况下比成年男性更容易遭受健康风险。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

- 蔡磊, 苏晶文, 李状, 等. 新安江流域上游地区地下水化学特征及水文地球化学作用研究[J]. 华东地质, 2023, 44(3): 262-272.
- CAI Lei, SU Jingwen, LI Zhuang, et al. Study on the chemical characteristics and hydrogeochemistry process of groundwater in the upper reaches of Xin'an River Basin[J]. East China Geology, 2023, 44(3): 262-272.
- 曹建平, 郑增记, 张永奇, 等. 陕西高陵 M4.4 地震前后断裂活动

- 垂直形变特征综合分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2017(4): 335–338, 360.
- CAO Jianping, ZHENG Zengji, ZHANG Yongqi, et al. Comprehensive Analysis of Fault Vertical Deformation before and after Gaoling M4.4 Earthquake in Shaanxi Province[J]. Geodesy and geodynamics, 2017(4): 335–338, 360.
- 邓承东, 张云辉, 袁兴成, 等. 藏东南迦巴瓦构造结高硫酸盐地热水的形成机理探讨[J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(2): 173–189.
- DENG Chengdong, ZHANG Yunhui, YUAN Xingcheng, et al. Genesis of high-sulfate geothermal water in the Namcha Barwa syntaxis, eastern Xizang[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(2): 173–189.
- 郭高轩, 代垠东, 许亮, 等. 北京西山岩溶地下水化学特征及成因分析[J]. 环境科学, 2024, 45(2): 802–812.
- GUO Gaoxuan, DAI Yindong, XU Liang, et al. Chemical characteristics and genesis analysis of karst groundwater in Xishan, Beijing[J]. Environmental Science, 2024, 45(2): 802–812.
- 黄建军, 周阳, 滕宏泉, 等. 关中盆地西安凹陷地热水赋存特征及其资源量估算[J]. 西北地质, 2021, 54(1): 196–203.
- HUANG Jianjun, ZHOU Yang, TENG Hongquan, et al. On the Occurrence Characteristics and the Estimation of Geothermal Water in Xi'an Sag, Guanzhong Basin[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(1): 196–203.
- 黄珣, 张云辉, 李晓, 等. 川西磨西断裂湾东地热水化学特征及成因机制[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(6): 91–101.
- HUANG Xun, ZHANG Yunhui, LI Xiao, et al. Hydrochemical characteristics and genetic mechanism of geothermal water in the Wandong geothermal area along the Moxi fault in western Sichuan[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(6): 91–101.
- 李晓, 王金金, 黄珣, 等. 鲜水河断裂带康定至道孚段热水化学与同位素特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2018, 45(6): 733–745.
- LI Xiao, WANG Jinjin, HUANG Xun, et al. Chemical and isotopic characteristics of hot water in the Kangding-Daofu section of Xianshuihe fault zone, Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2018, 45(6): 733–745.
- 刘春燕, 刘景涛, 荆继红, 等. 西宁市富铁地下水分布特征及影响因素分析[J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(5): 45–55.
- LIU Chunyan, LIU Jingtiao, JING Jihong, et al. Distribution characteristics and influencing factors of iron-rich groundwater in Xining City[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(5): 45–55.
- 刘林, 芮会超. 渭河盆地结构特征及演化研究[J]. 地质力学学报, 2018, 24(1): 60–69.
- LIU Lin, RUI Huichao. Exploration on structural characteristics of the weihe basin and its evolution[J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24(1): 60–69.
- 刘林, 陈琦, 赵汝荣, 等. 人类活动驱动下的高碘地下水成因机制——以福州市为例[J]. 华东地质, 2023, 44(4): 457–466.
- LIU Lin, CHEN Qi, ZHAO Rurong, et al. The mechanism of high iodine groundwater driven by human activities: a case study of Fuzhou City[J]. East China Geology, 2023, 44(4): 457–466.
- 刘宜鑫, 商佳涛, 钱会, 等. 西安主城区地下水化学特征及水质评价[J]. 环境化学, 2022, 41(6): 1976–1987.
- LIU Yixin, SHANG Jiatao, QIAN Hui, et al. Groundwater chemical characteristics and water quality evaluation in the main urban area of Xi'an[J]. Environmental Chemistry, 2022, 41(6): 1976–1987.
- 李慧. 城市化影响下西安市地下水场演变及其机制[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- LI Hui. The Evolution of Groundwater Flow Field and Its Mechanism in Xi'an City with the Influence of Urbanization[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- 罗欢, 刘振南, 马一奇, 等. 云南落漏河流域温泉水化学特征及成因模式[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(1): 56–69.
- LUO Huan, LIU Zhennan, MA Yiqi, et al. Hydrochemistry characteristics and genesis mode of hot springs in the Luolou River basin, Yunnan, China[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(1): 56–69.
- 李广英, 楚小云, 邓得玲, 等. 环青海湖区土壤与湖水重金属污染特征、生态风险及来源解析[J]. 西北地质, 2026, 59(1): 274–287.
- LI Guangying, CHU Xiaoyun, DENG Deling, et al. Heavy Metal Pollution Characteristics, Ecological Risks and Sources in Soil and Lake Water Around Qinghai Lake[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(1): 274–287.
- 牟海斌, 邹愈, 郭鹏. 高陵地区浅层地下水水化学特征及其形成作用[J]. 地下水, 2022(3): 13–16, 121.
- MOU Haibin, ZHOU Yu, GUO Peng. Hydrochemical characteristics and formation of shallow groundwater in Gaoling Area[J]. Groundwater, 2022(3): 13–16, 121.
- 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 等. 雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5375–5383.
- PENG Hongxia, HOU Qingqin, ZENG Min, et al. Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Groundwater in the Leizhou Peninsula[J]. Environmental Science, 2021, 42(11): 5375–5383.
- 苏英, 刘洋, 李晓华, 等. 渭河断裂咸阳吴家堡附近浅部特征研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(7): 1729–1733.
- SU Ying, LIU Yang, LI Xianhua, et al. Study on the Shallow Features of Weihe Fault in the Vicinity of Xianyang Wujiaobao[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(7): 1729–1733.
- 苏贺. 地下水化学演化及驱动机制研究[D]. 西安: 西北大学,

- 2018.
- SU He. Study on chemical evolution and driving mechanism of groundwater[D]. Xi'an: Northwest University, 2018.
- 吴嘉铃, 王莹, 胡倩, 等. 雷州半岛地下水水化学特征及成因分析[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(1): 145–153, 162.
- WU Jialing, WANG Ying, HU Qian, et al. Hydrochemical Characteristics and Genetic Analysis of Groundwater in Leizhou Peninsula[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(1): 145–153, 162.
- 袁兴成, 张云辉, 王鹰, 等. 鲜水河断裂带地热水化学特征及结垢趋势分析[J]. 沉积与特提斯地质, 2023, 3(2): 357–372.
- YUAN Xingcheng, ZHANG Yunhui, WANG Ying, et al. , Geo-thermal water chemical characteristics and scaling analysis of Xianshuihe fault zone[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2023, 43(2): 357–372.
- 吴君毅, 刘洪, 欧阳渊, 等. 螺髻山北麓地下水化学特征与水质评价[J]. 西北地质, 2023, 56(5): 151–164.
- WU Junyi, LIU Hong, OUYANG Yuan, et al. Hydrochemical Characteristics and Water Quality Assessment of Groundwater in Northern Foothill of Luoji Mountains[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(5): 151–164.
- 杨明远, 赵佳怡, 马超, 等. 新疆博阿断裂附近地表水和地下水的水化学和同位素特征及水质评价[J]. 西北地质, 2023, 56(6): 186–197.
- YANG Mingyuan, ZHAO Jiayi, MA Chao, et al. Hydrochemical and Isotopic Characteristics and Water Assessment Analysis of Surface Water and Groundwater Near Bolokenu–Aqikekuduke Fault in Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(6): 186–197.
- 张帆, 王广才, 张茂省, 等. 产出水识别及受污染地下水水化学和氢氧稳定同位素特征[J]. 西北地质, 2023, 56(3): 98–108.
- ZHANG Fan, WANG Guangcai, ZHANG Maosheng, et al. Identification of Produced Water and Characteristics of Hydrochemistry and Stable Hydrogen–Oxygen Isotopes of Contaminated Groundwater[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(3): 98–108.
- 赵增锋, 付永亮, 邱小琮, 等. 黄河流域宁夏段地表水氟污染特征与风险评价[J]. 中国环境科学, 2023, 43(11): 5800–5811.
- ZHAO Zengfeng, FU Yonglaing, QIU Xiacong, et al. Characteristics and risk assessment of fluorine pollution in surface water of Ningxia section of the Yellow River Basin[J]. China Environmental Science, 2023, 43(11): 5800–5811.
- 朱春芳, 龚建师, 檀梦蛟, 等. 淮北平原浅层地下水水化学特征及水质动态研究[J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(3): 56–67.
- ZHU Chunfang, GONG Jianshi, TAN Mengjiao, et al. Hydrochemical characteristics and water quality dynamic analysis of shallow groundwater in Huaibei Plain[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(3): 56–67.
- 赵敏, 苏贺, 朱亮, 等. 菏泽地区高氟地下水分布规律及成因分析[J]. 西北地质, 2025, 58(6): 94–106.
- ZHAO Min, SU He, ZHU Liang, et al. Distribution Pattern and Cause Analysis of High Fluorine Groundwater in Heze Area[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(6): 94–106.
- Adimalla N, QIAN H. Groundwater chemistry, distribution and potential health risk appraisal of nitrate enriched groundwater: a case study from the semi-urban region of South India[J]. Ecotoxicology & Environmental Safety, 2021, 207: 111277.
- Feng F, Jia Y F, Yang Y, et al. Hydrogeochemical and statistical analysis of high fluoride groundwater in northern China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(28): 34840–34861.
- Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. Science, 1970, 170(3962): 1088–1090.
- Gao D D, Yan Y T, Yao R W, et al. Spatial analysis and GIS mapping of regional hydrochemistry, groundwater quality, and probabilistic health risk in western Sichuan Basin, southwestern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2024(1): 83.
- He X D, Li P Y. Surface water pollution in the middle Chinese Loess Plateau with special focus on hexavalent chromium(Cr^{6+}): Occurrence, sources and health risks[J]. Exposure and Health, 2020, 12(3): 385–401.
- Jayarajan S K P, Kuriachan L. Exposure and health risk assessment of nitrate contamination in groundwater in Coimbatore and Tirupur districts in Tamil Nadu, South India[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(8): 10248–10261.
- Kumar S, Venkatesh A S, Singh R, et al. Geochemical signatures and isotopic systematics constraining dynamics of fluoride contamination in groundwater across Jamui district, IndoGangetic alluvial plains, India[J]. Chemosphere, 2018, 205: 493–505.
- Li P Y, Qian H, Wu J H. Groundwater quality assessment based on improved water quality index in Pengyang County, Ningxia, northwest China[J]. Journal of Chemistry, 2010, 7(S1): S209–S216.
- Li P Y. To make the water safer[J]. Exposure and Health, 2020, 12(3): 337–342.
- Li P Y, Qian H. Water resources research to support a sustainable China[J]. International Journal of Water Resources Development, 2018a, 34(3): 327–336.
- Li P Y, Qian H, Wu J H. Conjunctive use of groundwater and surface water to reduce soil salinization in the Yinchuan Plain, North-West China[J]. International Journal of Water Resources Development, 2018b, 34(3): 337–353.
- Liu M J, Xiao C L, Liang X J, et al. Response of groundwater chemical characteristics to land use types and health risk assessment of nitrate in semi-arid areas: A case study of Shuangliao City,

- Northeast China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 236: 113473.
- USEPA. Office of Solid Waste Emergency Response, Waste and Cleanup Risk Assessment. Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS), Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment) Interim[R].USEPA, 2009.
- World Health Organization(WHO). Guidelines for Drinking-water Quality 4th Ed[R].World Health Organization, 2011.
- Wang Y H, Li P Y. Appraisal of shallow groundwater quality with human health risk assessment in different seasons in rural areas of the Guanzhong Plain (China)[J]. *Environmental Research*, 2022, 207: 112210.
- Wang D, Wu J H, Wang Y H, et al. Finding high-quality groundwater resources to reduce the hydatidosis incidence in the Shiqu county of Sichuan province, China: analysis, assessment, and management[J]. *Exposure and Health*, 2020, 12(2): 307–322.
- Wu C, Wu X, Qian C, et al. Hydrogeochemistry and groundwater quality assessment of high fluoride levels in the Yanchi endorheic region, northwest China[J]. *Applied Geochemistry*, 2018, 98: 404–417.
- Wang Y, Li R, Wu X C, et al. Evaluation of Groundwater Quality for Drinking and Irrigation Purposes Using GIS-Based IWQI, EWQI and HHR Model[J]. *Water*, 2023, 15(12): 2233.
- Xing L N, Guo H M, Zhan Y H. Groundwater hydrochemical characteristics and processes along flow paths in the north China plain[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 70–71: 250–264.
- Xiao Y, Xiao D, Hao Q C, et al. Accessible Phreatic Groundwater Resources in the Central Shijiazhuang of North China Plain: Perspective From the Hydrogeochemical Constraints[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, 9: 747097.
- Xu B, Zhang Y, Wang J F. Hydrogeochemistry and human health risks of groundwater fluoride in Jinhuiqu irrigation district of Wei river basin, China[J]. *Human & Ecological Risk Assessment*, 2019, 25(1–2): 230–249.
- Yidana S M, Bawoyobie P, Sakyi P, et al. Evolutionary analysis of groundwater flow: application of multivariate statistical analysis to hydrochemical data in the Densu Basin, Ghana[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2018, 138: 167–176.
- Yao R W, Yan Y T, Wei C L, et al. Hydrochemical Characteristics and Groundwater Quality Assessment Using an Integrated Approach of the PCA, SOM, and Fuzzy c-Means Clustering: A Case Study in the Northern Sichuan Basin[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 907872.
- Zhang Y H, Dai Y S, Wang Y, et al. Hydrochemistry, quality and potential health risk appraisal of nitrate enriched groundwater in the Nanchong area, southwestern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 784: 147186.
- Zhang Y, Xu B, Guo Z F, et al. Human health risk assessment of groundwater arsenic contamination in Jinghui irrigation district, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 237: 163–169.
- Zhang Y, Xiong Y Q, Chao Y, et al. Hydrogeochemistry and quality assessment of groundwater in Jinghui canal irrigation district of China[J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2020a, 26(9): 2349–2366.
- Zhang Q Y, Xu P P, Qian H. Groundwater Quality Assessment Using Improved Water Quality Index (WQI) and Human Health Risk (HHR) Evaluation in a Semi-arid Region of Northwest China[J]. *Exposure and Health*, 2020b, 12(3): 487–500.