

doi: 10.12029/gc20220401003

周殷竹, 马涛, 袁磊, 李甫成, 韩双宝, 周金龙, 李勇. 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.

Zhou Yinzhu, Ma Tao, Yuan Lei, Li Fucheng, Han Shuangbao, Zhou Jinlong, Li Yong. 2024. Hydrochemistry–isotope characteristics and quality assessment of groundwater in the Beiluo River Basin, Shaanxi Province[J]. Geology in China, 51(2): 663–675(in Chinese with English abstract).

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

周殷竹¹, 马涛¹, 袁磊¹, 李甫成¹, 韩双宝^{1,2}, 周金龙³, 李勇⁴

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051; 2. 南方科技大学, 广东 深圳 518055; 3. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 4. 陕西省地质环境监测总站, 陕西 西安 710054)

摘要:【研究目的】北洛河是黄河的重要二级支流, 研究该流域典型支流地下水的水质状况对于黄河流域生态保护和高质量发展具有重要意义。【研究方法】本文以北洛河流域为主要对象, 系统查明流域地下水水质现状, 圈定劣质地下水分布区, 为饮水安全提供保障。此外, 对该区地下水水化学和 D-¹⁸O 同位素组成进行分析, 研究地下水水化学特征及演化机制, 揭示水文地质条件及人为因素对区域地下水水文地球化学特征的控制和影响作用。【研究结果】区内地下水水化学成分除受岩石风化和蒸发浓缩作用的共同控制之外, 部分还受到人类活动的影响。D-¹⁸O 同位素组成指示了地下水整体上受蒸发浓缩作用影响。【结论】上游碎屑岩中的石膏、盐岩等易溶矿物经溶滤进入地下水, 下游松散孔隙水在蒸发浓缩的作用下积聚盐分导致上、下游地下水 TDS 较高; 奥陶系岩溶含水岩组和新生界断陷盆地含水岩组地下水水化学组成主要受蒸发盐岩影响, 此外还受到人类活动的影响。白垩系和石炭系—侏罗系含水岩组地下水主要分布于岩石风化区, 说明该地下水水化学组分主要受岩石风化作用控制, 且主要受硅酸盐岩和蒸发盐岩风化影响, 人类活动影响的扰动相对较小。上、下游地区地下水受工矿活动影响较严重, 中游地下水受工矿活动、农业活动、生活污水影响均较小, 水质整体较好。

关键词: 水化学; D-¹⁸O 同位素; 地下水水质评价; 北洛河流域; 水文地质调查工程; 陕西

创新点: 基于多种水化学指标、D-¹⁸O 同位素与组合特征参数, 研究了北洛河流域地下水水化学特征及演化机制; 揭示了水文地质条件及人为因素对区域地下水水文地球化学特征的控制和影响作用。

中图分类号: X824; P641.3 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2024)02–0663–13

Hydrochemistry–isotope characteristics and quality assessment of groundwater in the Beiluo River Basin, Shaanxi Province

ZHOU Yinzhu¹, MA Tao¹, YUAN Lei¹, LI Fucheng¹, HAN Shuangbao^{1,2}, ZHOU Jinlong³, LI Yong⁴

(1. Hydrogeological and environmental geological survey center of China Geological Survey, Baoding 071051, Hebei, China; 2. Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, Guangdong, China; 3. College of Hydraulic and Civil

收稿日期: 2022–04–01; 改回日期: 2023–01–17

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20190333) 资助。

作者简介: 周殷竹, 女, 1990 年生, 高级工程师, 主要从事水文地质和同位素水文地球化学研究; E-mail: zhouyinzhu@mail.cgs.gov.cn。

通讯作者: 韩双宝, 男, 1983 年生, 正高级工程师, 主要从事水文地质与水资源研究; E-mail: hanshuangbao@mail.cgs.gov.cn。

Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China; 4. Shaanxi Institute of Geo-Environment Monitoring, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: This paper is the result of hydrogeological survey engineering.

[Objective] The Beiluo River Basin is an important secondary tributary of the Yellow River. Research on groundwater quality in typical tributary basin of the Yellow River is of significant for ecological protection and high-quality development. To ensure local drinking water safety, we systematically identified status of groundwater quality and delineated inferior groundwater region in the Beiluo River Basin. **[Methods]** Besides, based on analysis of D-¹⁸O isotope in groundwater, characteristics and evolution mechanism of groundwater hydrochemistry were studied and effects of hydrogeological condition and anthropogenic activities on groundwater hydrochemistry were revealed. **[Results]** Groundwater hydrochemical composition was jointly affected by rock weathering and evaporation concentration, part of which was influenced by anthropogenic activities. D-¹⁸O isotope composition suggested that evaporation concentration is the major influence factor of groundwater hydrogeochemistry. **[Conclusions]** Leaching of soluble minerals such as gypsum halite in clastic and evaporation concentration of pore water in Cenozoic faulted basin in the downstream caused salt accumulation and high TDS in groundwater in the upstream and downstream, respectively. Hydrochemical composition of groundwater in Ordovician karst aquifer and Cenozoic faulted basin aquifer was mainly controlled by evaporites and anthropogenic activities. While hydrochemical composition in Cretaceous aquifer and Carboniferous-Jurassic aquifer was mainly controlled by rock weathering (especially silicate rocks and evaporite) and less affected by anthropogenic activities. Moreover, groundwater in the upstream and downstream was significantly affected by industrial and mining activities. While groundwater in the midstream is of good quality due to less influence of industrial/mining activities, agricultural activities and domestic wastewater.

Key words: hydrochemistry; D-¹⁸O isotope; groundwater quality assessment; Beiluo River Basin; hydrogeology survey engineering; Shaanxi Province

Highlights: Based on hydrochemical indices, D-¹⁸O isotope and characteristic parameters in groundwater, characteristics and evolution mechanism of groundwater hydrochemistry were studied, and effects of hydrogeological condition and anthropogenic activities on groundwater hydrochemistry were revealed.

About the first author: ZHOU Yinzhu, female, born in 1990, senior engineer, engaged in the research of hydrogeological survey and isotopic hydrogeochemistry; E-mail: yinzhu_zhou@qq.com.

About the corresponding author: HAN Shuangbao, male, born in 1983, professor level senior engineer, engaged in the research of hydrogeology and water resources; E-mail: hanshuangbao@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20190333).

1 引 言

黄河流域是中国重要的生态屏障和经济地带,上中下游面临着不同生态环境问题,地下水在调节水资源循环演化、维系生态系统健康、保障优质水源等方面起着重要作用(韩双宝等, 2021; 罗新燕, 2021)。黄河中下游平原区是重要农业生产基地和能源化工基地,地下水质量与当地居民生活和生产用水紧密相关(Tong et al., 2022)。黄河流域中下游水质问题较为突出,主要为 TDS、总硬度、硫酸盐、砷、氟、碘等水化学指标超标(韩双宝等, 2021; Zhi et al., 2021; Qiao et al., 2022)。

北洛河位于黄河流域中游,为黄河二级支流,

其上游为陕北油气资源勘探开发重要区域,20 世纪 80 年代以来,北洛河流域受到严重污染,河流中石油类严重超标。近年来虽然环境管理工作逐步加强,由于陕北地区石油工业的迅速发展和人口密度的增大,水污染状况没有得到根本性好转,水质恶化、水体功能降低与丧失等水质型缺水问题仍然非常突出(康媛, 2008)。目前,有关该流域的研究多集中于洪水(赵明等, 2011)、上游水沙特性(秦伟等, 2010; 井涌等, 2010; 葛芬莉, 2013; 韩双宝等, 2023)等水文和地下水资源分布与开发潜力(马涛等, 2023)等方面,而针对北洛河流域地下水水化学及其成因方面的研究尚未深入展开。本研究依托中国地质调查局黄河流域水文地质调查工程(韩双

宝, 2021), 聚焦于黄河中游北洛河流域, 分析了该流域的地下水水化学特征及其形成机理, 为当地水资源管理提供了科学依据。此外, 系统查明流域地下水水质现状, 并对区内浅层地下水和深层地下水的质量分类进行初步评价, 圈定劣质地下水分布区, 为饮水安全提供保障。

2 研究区概况

2.1 自然地理概况

北洛河为黄河二级支流, 是渭河的第二大支流(图 1), 发源于陕西省定边县白于山郝庄梁, 流经陕西省榆林、延安、铜川、渭南, 其中游支流葫芦河上游深入甘肃省华池、合水两县, 于大荔县东南汇入渭河(徐文梅, 2007), 总长 680.0 km。作为延安市第一大河, 北洛河在延安经济社会发展中具有举足轻重的地位(马禹锟, 2017)。

北洛河流域(37°15'10"N~35°24'05"N, 107°39'40"E~110°16'49"E)地处暖温带, 属大陆性气候, 年平均降水量为 500.0~550.0 mm, 多年平均蒸发量为 1173.6~1193.5 mm。流域面积 26905 km², 陕西省境内流域面积 26533 km², 是陕西省黄河流域面积最大的二级支流, 其中延安市境内流域面积 17948 km²(于松延等, 2014; 马禹锟, 2017)。

2.2 水文地质概况

北洛河中上游位于子午岭向斜的东侧, 下游位于关中平原。北洛河由北向南依次切割碎屑岩裂隙孔隙含水岩组、碳酸盐岩岩溶含水岩组、松散孔隙含水岩组, 各含水岩组被泥岩等弱透水层分隔, 水力联系较弱。大气降水是地下水主要的补给来源。北洛河是地下水的最低排泄基准面。

按地下水埋藏条件、水动力条件, 将研究区含水系统分为奥陶系岩溶含水系统、石炭系—侏罗系含水系统、白垩系含水系统和松散岩类孔隙含水系统。奥陶系岩溶含水岩组主要岩性为泥灰岩、灰岩及白云岩, 其地层受地质构造控制, 由北向南呈阶梯状断落, 整体含水层具有统一水动力场, 水位在 360 m 左右, 地下水以地表水渗漏补给为主, 北部裸露区主要接受大气降水入渗补给。石炭系—侏罗系含水岩组在侵蚀基准面以上区域, 岩性以砂岩为主, 大气降水是唯一的补给来源, 含水层位置较高, 径流途径短, 排泄条件良好, 矿化度较低。其中侏罗系局部地区煤层自燃形成烧变岩带, 主要接受上覆松散层地下水补给, 孔隙发育, 水质较好; 侵蚀基准面以下的碎屑岩类裂隙水, 主要接受上覆各类地下水垂向补给, 受水循环交替作用和溶滤作用影响, 呈现水平和垂向分带性特征。白垩系含水岩组

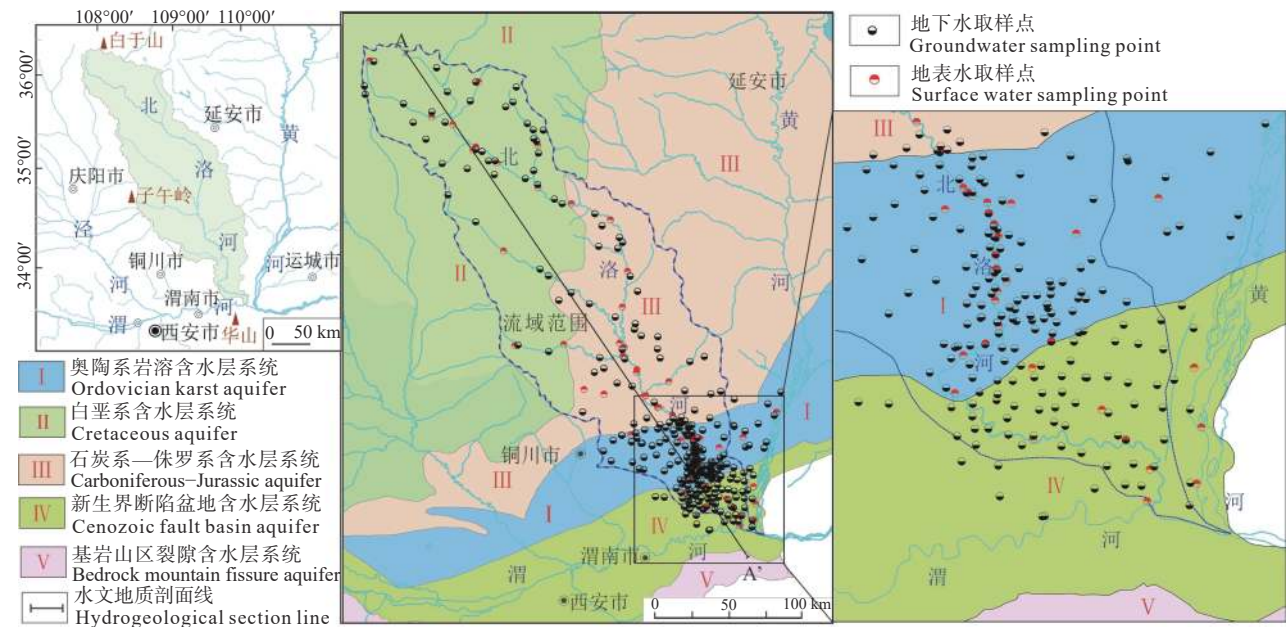


图 1 研究区位置及采样点分布图
Fig.1 Location of the study area and distribution of sampling points

分层明显,可分为洛河含水岩组、环河含水岩组和罗汉洞含水岩组 3 个相对独立的含水岩组,受沉积相等因素影响。洛河含水岩组地下水水质整体优于环河组和罗汉洞组。白垩系大部分地区被第四系黄土和新近系泥岩所覆盖,与上覆第四系黄土层水力联系微弱,主要接受地表水侧向补给,地下水整体向洛河河谷方向汇集排泄。新生界第四系松散层主要指下游冲积层,其补给来源较多,包括大气降水入渗、河流补给和渠灌回归补给等,水化学成分相对复杂,排泄途径包括人工开采、侧向流入河流等。

研究区南北向水文地质剖面图如图 2 所示。甘泉县以北上游区主要为黄土丘陵沟壑区,以白垩系及侏罗系红色砂岩互层为主,在裸露区和浅埋区,白垩系上部普遍发育厚度 20~60 m 的风化裂隙层,部分无隔水层区域与上覆松散层构成统一潜水含水层,部分区域黄土层下分布上新统泥质砂岩,此区域承压水水位埋深一般为 15~173 m,靠近白于山、子午岭深达 220 m 以上(蒋观滔, 2016)。甘泉至白水为中游区,以三叠系灰色砂页岩互层为主,厚度 300 余米,上覆深厚黄土,与下伏二叠系不整合接触;白水至河口为下游,穿铁镰塬进入关中平原,上覆第四系松散层逐渐变厚,岩溶含水层隐伏其下。其中岩溶含水层按照埋藏条件分为裸露区、浅埋区(0~300 m)、深埋区(>300 m)(王学平和李稳哲, 2010)。第四系松散层含水系统可分为黄土台塬孔隙-裂隙含水系统和冲积平原孔隙含水系统,潜水含水层厚度为 50~80 m,承压水系统顶板埋

深从 60~110 m 至<300 m(董英等, 2019)。

按照含水层类型与埋藏深度,奥陶系岩溶含水系统埋藏深度≤300 m 一般划为浅层地下水、>300 m 划为深层地下水,石炭系—侏罗系含水系统和白垩系含水系统埋藏深度一般以分布于浅层≤100 m 的风化带地下水划为浅层地下水,>100 m 划为深层地下水,松散岩类孔隙含水系统埋藏深度≤50~150 m 划为浅层地下水、>150 m 划为深层地下水。

3 材料与方 法

3.1 水样采集与测试

2019 年 8 月至 2021 年 9 月,自下游大荔县至上游吴起县,沿北洛河及两岸共采集地下水样品 269 组,地表水样品 68 组。

取样时严格按照《地下水环境监测技术规范(HJ/T164-2004)》执行,取样前用待取水样润洗取样瓶 3 次。野外现场记录井的类型、井深以及地下水位。利用 Hanna 多参数分析仪(HI9828)现场测定水温、pH、电导率、氧化还原电位。用于阳离子测试的水样用 0.45 μm 微孔滤膜过滤后加入 1:1 HNO₃ 酸化至 pH<2,装入 250 mL 聚乙烯瓶中;用于阴离子测试的水样不添加保护剂,用 0.45 μm 微孔滤膜过滤后装入容量为 1500 mL 聚乙烯瓶中;用于 δ¹⁸O 和 δD 同位素分析的水样用 0.45 μm 微孔滤膜过滤后装入容量为 10 mL 离心管中。所有水样采集后,不留气泡,用封口膜密封并 4.0 °C 冷藏保存。

地下水水样组分检测由中国地质调查局水文

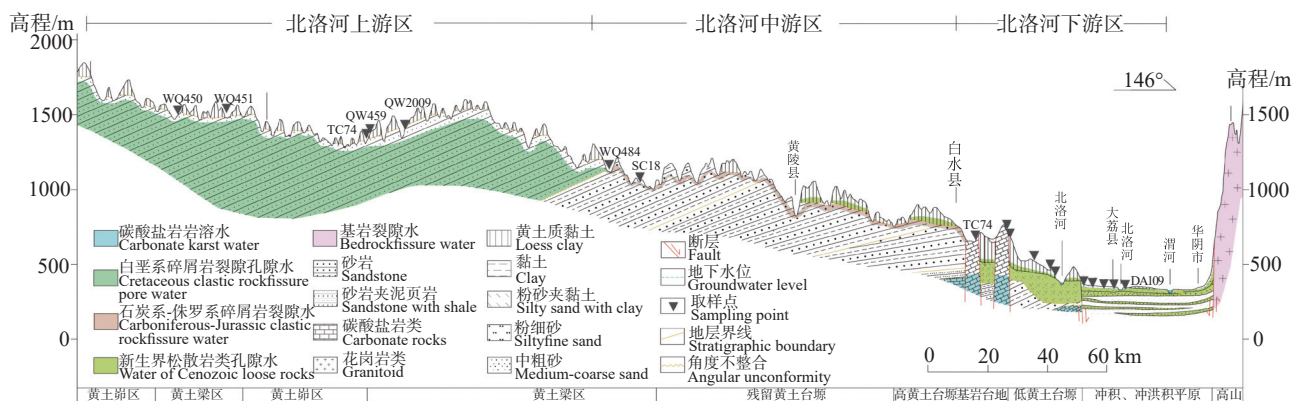


图 2 水文地质剖面图
Fig.2 Hydrogeological profile of the study area

地质环境地质调查中心实验室按照《生活饮用水标准检验法》(GB/T5750-2006)测试完成,所有检测样品阴阳离子平衡误差均低于 $\pm 5\%$ 。 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 测试由中国地质调查局水文地质环境地质调查中心实验室完成, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 采用波长扫描光腔衰荡光谱技术(CRDS, Thermo)测试,精度分别为 0.10% 和 0.03% ,分析结果采用VSMOW标准。水质单项分析各项测试指标对应检测手段及检出限信息见下表1。

3.2 数据处理与分析

本文采用Excel 2016进行数据统计,利用Map GIS 6.7软件进行数据的统计与分析,并利用Grapher 15.0绘制相关Piper三线图、散点图和箱型图。

4 结果与讨论

4.1 地下水水化学特征

Piper三线图显示(图3),平面上,区内白垩系和石炭系—侏罗系含水岩组地下水阴离子主要以 HCO_3^- 为主,阳离子主要以 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主;奥陶系岩溶含水岩组和新生界断陷盆地含水岩组地下水阴离子主要以 SO_4^{2-} 和 Cl^- 为主,阳离子主要以 Na^+ 和 K^+ 为主。北洛河流域不同含水岩组地下水水化学指标统计值见表2。

根据地下水赋存条件,可将水文地质剖面分为5段(图2),选取代表性地下水样品(主要为潜水和

微承压水)进行分析。其中,段1主要为位于上游白垩系含水岩组的地下水,段2主要为石炭系—侏罗系含水岩组的地下水,段3和段4主要为奥陶系岩溶含水岩组地下水,段5主要为新生界第四系含水岩组地下水。

沿水文地质剖面,代表性地下水水化学类型由 HCO_3^- -Ca·Na型(段1)向 HCO_3^- -Ca型(段2和段3)、 HCO_3^- -Na型(段4)和Cl-Na型(段5)演化(图4)。

地下水TDS(218~11819 mg/L)平均值为1403 mg/L,高于Ⅲ类地下水水质标准的1000 mg/L。其中上游(平均值975 mg/L)、中游(平均值445 mg/L)和下游(平均值1675 mg/L),沿水文地质剖面自上游至下游,地下水TDS呈现先降低后显著升高的趋势,且在段5的地下水TDS最高(图5a)。上游、中游和下游地下水TDS超标率分别为4.36%、0.67%和43.6%。上游碎屑岩中的石膏、盐岩等易溶矿物经溶滤进入地下水,下游新生界含水岩组松散孔隙水在蒸发浓缩的作用下积聚盐分。

地下水pH(7.14~9.90)平均值7.91,各含水岩组地下水之间无显著差异,整体均呈弱碱性;3.69%的地下水pH超过地下水质量标准的Ⅲ类水标准。地下水Eh(-165~598 mV)平均值为139 mV。沿水文地质剖面自上游至下游,地下水pH变化并不显著(图5b),区内地下水整体处于还原—亚氧化环境。

下游奥陶系岩溶含水岩组和新生界断陷盆地

表 1 水质单项分析指标检测方法及检出限

Table 1 Detection methods and detection limits of water quality indices

检测指标	检出限	测试手段	检测指标	检出限	测试手段	检测指标	检出限	测试手段
pH值	0.10	电感耦合等离子体发生光谱	NO_3^- (mg/L)	0.02	离子色谱	Mn(mg/L)	0.0002	电感耦合等离子体发生光谱
K^+ (mg/L)	0.01	电感耦合等离子体发生光谱	Br(mg/L)	0.30	离子色谱	Sr(mg/L)	0.001	电感耦合等离子体发生光谱
Na^+ (mg/L)	0.01	电感耦合等离子体发生光谱	Cr^{6+} (mg/L)	0.04	紫外可见分光光度计	Li($\mu\text{g/L}$)	5.00	电感耦合等离子体质谱
Ca^{2+} (mg/L)	0.004	电感耦合等离子体发生光谱	H_2SiO_3 (mg/L)	0.06	紫外可见分光光度计	Cr($\mu\text{g/L}$)	1.00	电感耦合等离子体质谱
Mg^{2+} (mg/L)	0.01	电感耦合等离子体发生光谱	NH_4^+ (mg/L)	0.04	紫外可见分光光度计	Cu($\mu\text{g/L}$)	0.50	电感耦合等离子体质谱
HCO_3^- (mg/L)	5.00	酸式滴定	NO_2^- (mg/L)	0.00	紫外可见分光光度计	Zn($\mu\text{g/L}$)	1.00	电感耦合等离子体质谱
CO_3^{2-} (mg/L)	5.00	酸式滴定	PO_4^{3-} (mg/L)	0.10	紫外可见分光光度计	As($\mu\text{g/L}$)	1.00	电感耦合等离子体质谱
OH^- (mg/L)	2.00	酸式滴定	TH(mg/L)	10.00	酸式滴定	Se($\mu\text{g/L}$)	1.00	电感耦合等离子体质谱
Cl^- (mg/L)	0.10	离子色谱	COD(mg/L)	0.04	滴定	Cd($\mu\text{g/L}$)	0.02	电感耦合等离子体质谱
SO_4^{2-} (mg/L)	0.20	离子色谱	TDS(mg/L)	4.00	万分之一天平	Hg($\mu\text{g/L}$)	0.55	电感耦合等离子体质谱
F ⁻ (mg/L)	0.006	离子色谱	Fe(mg/L)	0.002	电感耦合等离子体发生光谱	Pb($\mu\text{g/L}$)	0.05	电感耦合等离子体质谱

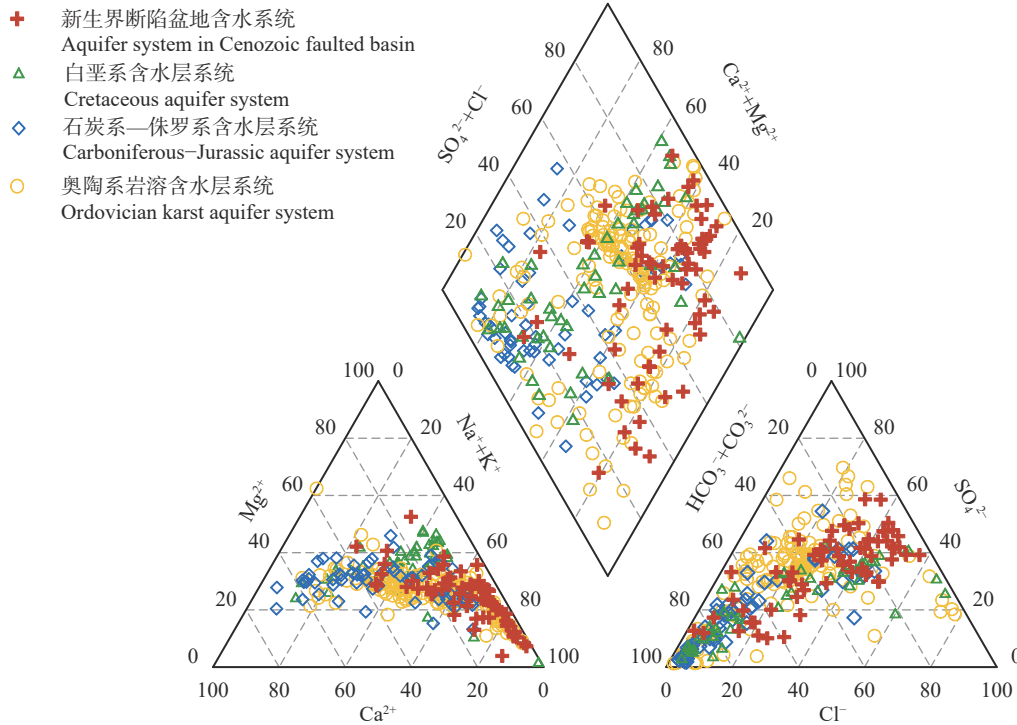


图3 不同含水岩组地下水 Piper 三线图
Fig.3 Piper trilinear diagram of groundwater in different aquifer groups

表2 北洛河流域不同含水岩组地下水水化学指标与组合特征参数统计值

Table 2 Statistics of hydrochemical indices and characteristic parameters of groundwater in different aquifer groups in Beiluo River Basin

水化学指标	白垩系含水岩组 地下水 (n=42)	石炭系—侏罗系含水岩组 地下水 (n=46)	奥陶系岩溶含水岩组 地下水 (n=131)	新生界断陷盆地含水岩组 地下水 (n=59)
pH	7.40~9.90/8.07	7.35~8.51/7.94	7.18~8.73/7.83	7.26~9.40/7.98
TDS/(mg/L)	230.0~5883.00/869.00	218.00~1815.00/525.00	242.00~11819.00/1295.0	290.00~7910.00/2774.00
TH/(mg/L)	11.60~3125.0/437.00	108.00~1031.00/270.00	82.10~5240.00/516.00	107.00~3815.00/856.00
K ⁺ /(mg/L)	0.62~13.05/2.87	0.58~16.47/1.73	0.56~22.86/5.64	1.22~40.73/5.86
Na ⁺ /(mg/L)	23.60~962.00/156	9.90~234.00/67.80	22.50~2729.00/301.00	21.44~2324.00/709.00
Ca ²⁺ /(mg/L)	18.36~270.00/60.30	13.55~321.00/61.20	4.57~908.00/84.30	6.33~677.00/94.52
Mg ²⁺ /(mg/L)	16.58~601.00/69.28	12.11~114.00/29.90	12.60~664.00/71.50	10.36~507.00/138.00
Cl ⁻ /(mg/L)	6.13~2255.22/183.00	4.48~87.60/21.50	3.55~5620.00/266.00	8.98~2581.00/602.00
SO ₄ ²⁻ /(mg/L)	6.64~1401.00/189.00	4.09~195.00/47.52	3.00~2016.00/360.00	26.95~2976.00/858.00
HCO ₃ ⁻ /(mg/L)	83.45~618.00/321.00	204.00~491.00/331.00	193.00~886.00/408.00	11.13~1060.00/504.00
CO ₃ ²⁻ /(mg/L)	<5.00~45.60/16.47	<5.00~33.44/13.59	<5.00~125.00/28.56	<5.00~140.00/34.99
NO ₃ ⁻ /(mg/L)	1.28~375.50/42.33	0.30~251.80/22.68	0.46~736.60/37.55	0.19~1162.00/102.00
F ⁻ /(mg/L)	0.092~2.65/0.78	0.198~2.30/0.785	0.183~6.300/1.498	<0.006~6.300/2.021
Cd/(mg/L)	0.003~0.15/0.036	0.003~0.046/0.020	0.001~0.373/0.054	0.001~0.328/0.057
Cr ⁶⁺ /(mg/L)	0.005~0.19/0.037	0.005~0.030/0.015	0.004~0.556/0.071	0.004~0.334/0.082
As/(mg/L)	<0.001~0.009/0.004	<0.001~0.013/0.003	<0.001~0.267/0.017	<0.001~0.023/0.007
δD/‰	-98.00~-62.34/-82.60	-67.19~-61.13/-64.44	-83.80~-65.60/-72.61	-79.90~-54.97/-66.30
δ ¹⁸ O/‰	-12.40~-7.94/-10.57	-8.9~-8.08/-8.61	-10.5~-8.60/-9.54	-10.7~-7.30/-8.80
γNa/γCl	0.66~14.23/3.99	0.81~20.14/6.18	0.60~35.71/4.80	0.90~27.18/3.14
(100×γSO ₄)/γCl	27.00~792.00/142.00	35.00~472.00/155.00	15.00~1537.00/211.00	34.00~1060.00/141.00
γ(Cl-Na)/γMg	-2.93~0.43/-0.74	-3.00~0.07/-1.02	-9.64~0.93/-1.61	-19.92~0.16/-2.21

注：“/”左侧数值为“最小值~最大值”，“/”右侧数值为“平均值”。

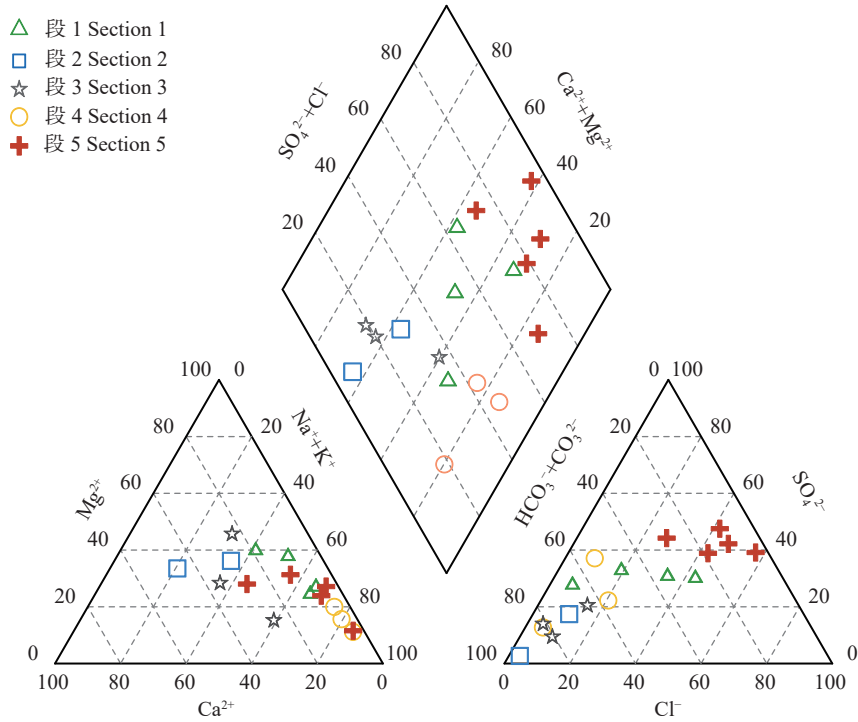


图 4 沿水文地质剖面代表性地下水 Piper 三线图
Fig.4 Piper trilinear diagram of typical ground water samples along the hydrogeological profile

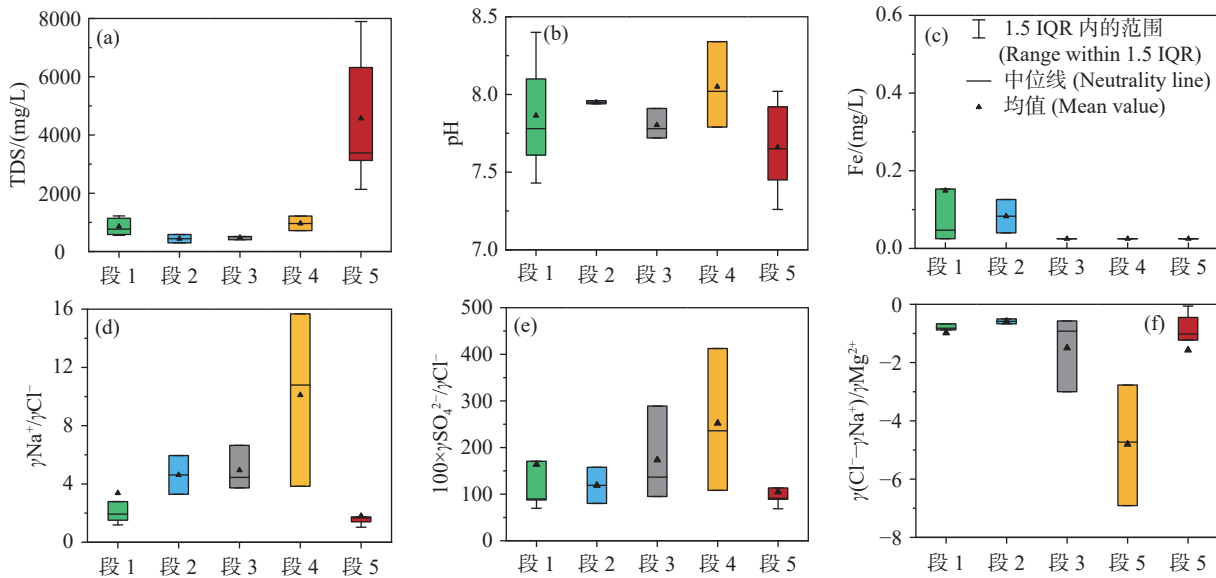


图 5 沿水文地质剖面代表性地下水 TDS(a)、pH(b)、Fe(c)、 $\gamma\text{Na}/\gamma\text{Cl}$ (d)、 $100 \times \gamma\text{SO}_4/\gamma\text{Cl}$ (e) 和 $\gamma(\text{Cl}-\text{Na})/\gamma\text{Mg}$ (f) 箱型图
Fig.5 Box plot of TDS(a), pH (b), Fe (c), $\gamma\text{Na}/\gamma\text{Cl}$ (d), $100 \times \gamma\text{SO}_4/\gamma\text{Cl}$ (e) and $\gamma(\text{Cl}-\text{Na})/\gamma\text{Mg}$ (f) of typical groundwater samples along the hydrogeological profile

含水岩组地下水中各水化学组分浓度均较高(表 2), 而上游白垩系含水岩组段 1 和石炭系—侏罗系含水岩组段 2 的地下水总溶解性 Fe 含量较其他段更高(图 5c)。

钠氯系数 ($\gamma\text{Na}/\gamma\text{Cl}$)、脱硫酸系数 ($100 \times \gamma\text{SO}_4/\gamma\text{Cl}$) 和变质系数 $\gamma(\text{Cl}-\text{Na})/\gamma\text{Mg}$ 特征系数可反映地下水的封存状态和水盐相互作用情况(谭开俊等, 2012)。

研究区地下水钠氯系数($\gamma\text{Na}/\gamma\text{Cl}$)平均值均大于 1.0(表 3),说明地下水受到不同程度的大气降水淋滤作用影响。沿水文地质剖面自上游至下游,地下水 $\gamma\text{Na}/\gamma\text{Cl}$ 整体呈现升高趋势,而在段 5 最小(图 5d),说明除段 5 外的阳离子交换吸附作用较弱,而段 5 地下水可能还存在阳离子交换吸附作用。

脱硫酸系数($100\times\gamma\text{SO}_4/\gamma\text{Cl}$)是表征地下水氧化还原环境的水文地球化学重要参数之一。在还原环境中,当存在有机质时,脱硫酸细菌能使 SO_4^{2-} 还原成 HS^- ,使地下水中 SO_4^{2-} 减少以致消失, HCO_3^- 增加, pH 值增大(谭开俊等, 2012)。地下水脱硫酸系数变化范围较大(15~1537),且均大于 3,说明硫酸盐氧化还原作用不彻底,地下水 SO_4^{2-} 含量可能受到表层氧化作用的影响。沿水文地质剖面自上游至下游,地下水($100\times\gamma\text{SO}_4$)/ γCl 整体呈现升高趋势,在段 5 显著降低,段 1、段 2 和段 5 均较低(图 5e),说明白垩系含水岩组、石炭系—侏罗系含水岩组和新生界第四系含水岩组地下水整体处于封闭或半封闭的水文地球化学环境,脱硫酸系数相对较小,脱硫酸作用程度相对较强;奥陶系岩溶含水岩组地下水整体处于较开放的水文地球化学环境,脱硫酸作用程度相对较弱。

上游白垩系含水岩组地下水水岩相互作用强烈,变质系数($\gamma(\text{Cl}-\text{Na})/\gamma\text{Mg}$)相对其他含水岩组地下水更大(表 2),地下水变质程度相对较高,水化学类型以 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型为主。沿水文地质剖面自上游至下游,地下水 $\gamma(\text{Cl}-\text{Na})/\gamma\text{Mg}$ 在段 1、段 2 和段 5 均较高,段 3 和段 4 较低(图 5f),说明三叠系含水岩组和奥陶系岩溶含水岩组地下水变质程度相对较低。

4.2 地下水氘氧稳定同位素特征

氘氧同位素可以有效地指示水体的补给来源(梁杏等, 2020; 张帆等, 2023)。西安地区雨水线(LMWL)方程为 $\delta\text{D}=7.49\delta^{18}\text{O}+6.13$, 指示在降水过

程中发生了蒸发,符合半干旱的气候环境特点。地下水、地表水和泉水均分布于 LMWL 的右下方,表明地下水主要受大气降水补给,且在水循环过程中受到了蒸发分馏作用的影响。地下水和地表水样点基本位于全球大气降水线(GMWL)和 LMWL 下方,说明研究区地下与地表水体整体上受蒸发浓缩作用影响。白垩系含水岩组、奥陶系岩溶含水岩组和新生界断陷盆地含水岩组中地下水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 特征值见表 3, $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 斜率分别为 7.50、5.44 和 6.07(图 6),说明奥陶系含水岩组和新生界断陷盆地含水岩组中地下水受蒸发浓缩作用影响相对较强。前者主要取决于含水岩组埋藏深度,风化带受蒸发影响较大,而其下部埋藏区受蒸发影响小;后者整体上受蒸发浓缩作用较强。白垩系含水岩组和奥陶系岩溶含水岩组中地下水受蒸发浓缩作用影响相对较弱,这是由于白垩系和奥陶系大部分地区被第四系黄土和新近系泥岩所覆盖,地下水的蒸发一定程度受限。

4.3 地下水水质评价

按照《地下水质量标准》(GB/T 14848-2007),根据地下水样品的水化学分析测试结果,采用内梅罗指数法分别对研究区浅层地下水和深层地下水的分类进行初步评价。

结果显示,北洛河流域地下水以 IV 类和 V 类水为主,占比 96.3%,其中 IV 类水占 34.5%, V 类水占 61.8%。TDS<1000 mg/L 的淡水广泛分布于中游地区,其中 I~III 类地下水主要分布于中游志丹县、洛川县、黄龙县、白水县、合阳县以及华池县东部、黄陵县西部等白垩系环河组、三叠系延长组等砂岩分布区域, IV 类和 V 类地下水主要分布于北洛河流域上游和下游。地下水主要超标组分为《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)中的一般化学指标,包括 TDS、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和总硬度。区内 IV 类和 V 类地下水多为原生劣质水,主要受地质背景影响。

尽管地下水取样点分布满足《地下水监测规

表 3 北洛河流域不同含水岩组地下水同位素组成

同位素指标	白垩系含水岩组 地下水 (n=11)	石炭系—侏罗系含水岩组 地下水 (n=0)	奥陶系岩溶含水岩组 地下水 (n=12)	新生界断陷盆地含水岩组 地下水 (n=19)
$\delta\text{D}/\text{‰}$	-98.00~-62.34/-83.18	/	-83.80~-65.60/-72.61	-79.90~-54.97/-66.30
$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	-12.40~-7.94/-10.69	/	-10.5~-8.60/-9.54	-10.7~-7.30/-8.80

注:“/”左侧数值为“最小值~最大值”,“/”右侧数值为“平均值”。

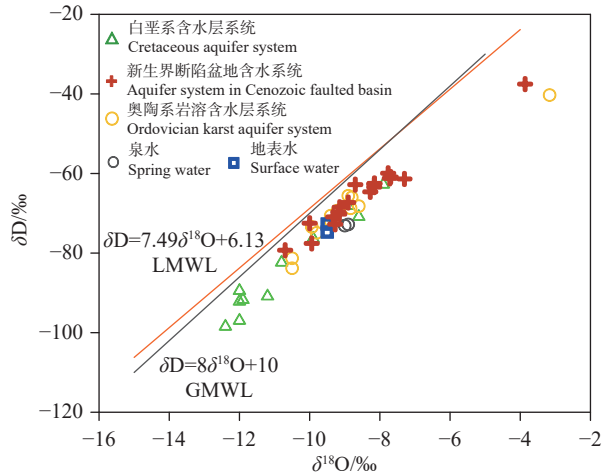


图 6 地表水、泉水和不同含水岩组地下水氘氧同位素组成 (GMWL 为全球大气降水线, LMWL 为当地大气降水线)
 Fig.6 Isotope composition of D and ¹⁸O of surface water, spring water and groundwater in different aquifer groups (GMWL is short for Global Meteoric Water Line, LMWL is short for Local Meteoric Water Line)

范》(SL 183-2005)要求,但采样点多分布于下游平原区,中游黄土丘陵区采样点相对较少。因此,按照综合的泰森多边形法、克里金插值法和反权重法克里格插值法,分别绘制浅层地下水和深层地下水质量分布图(图 7)。

整体上,北洛河流域中游地下水水质相对较好,可作为饮用水;上游水质次之,这是由于大部分上游地区位于陕北能源化工基地规划区和陇东能源化工基地规划区的石油开采化工区之间,地下水水质一定程度上受到石油化工开采的影响,但经适当处理后可饮用;下游平原区水质较差,以IV类和V类为主,这是由于下游地区多位于关中高新技术产业开发带的煤炭开发区和火电工业区,地下水水质一定程度上受到工矿活动的影响,部分地下水经适当处理后可饮用,而部分不宜饮用。

此外,作为主要饮用水水源的深层地下水水质优于浅层地下水水质。IV类和V类深层地下水仅存在于上游和下游平原区部分地区,且分布面积显著小于浅层地下水。

4.4 水化学成因分析

Gibbs 图(图 8)显示,大多数地下水取样点分布于岩石风化-蒸发浓缩混合区以及岩石风化区,说明研究区地下水水化学成分受岩石风化和蒸发浓缩作用的共同控制(Gibbs, 1970)。大部分上游和下游地下水点位于蒸发浓缩-岩石风化混合区和岩石风化区,说明下游地下水水化学组成主要受蒸发浓

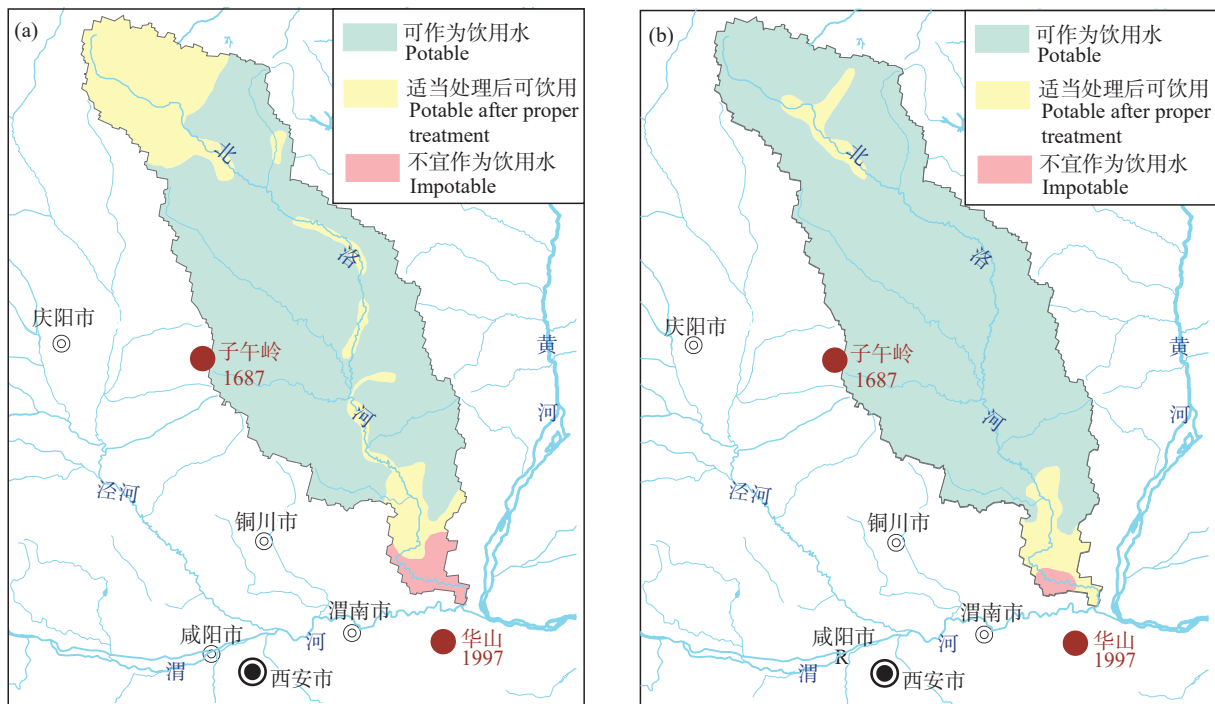


图 7 北洛河流域浅层地下水(a)和深层地下水(b)水质评价结果
 Fig.7 Quality evaluation of shallow (a) and deep (b) groundwater in the Beiluo River Basin

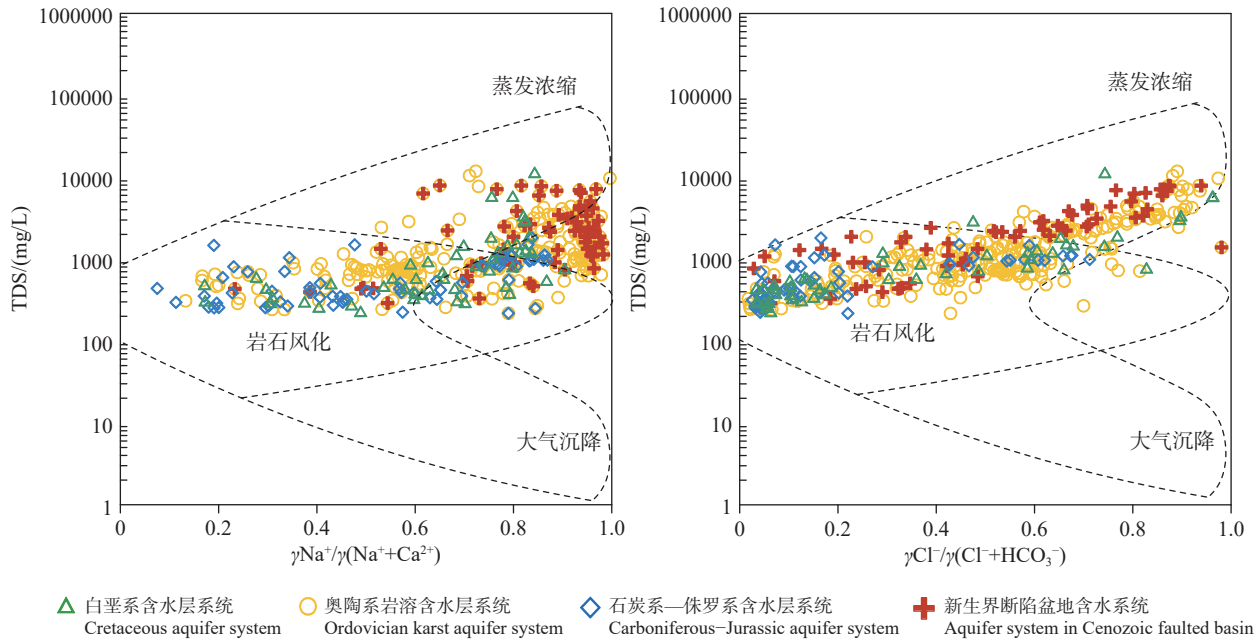


图 8 不同含水岩组地下水 Gibbs 图
Fig. 8 Gibbs diagram of groundwater in different aquifer groups

缩作用和岩石风化作用共同影响;此外,许多下游地下水取样点和少数上游地下水取样点位于三角区域外,说明这些地下水水化学组成可能还受到人类活动的影响(蒲俊兵等,2010)。中游地下水主要分布于岩石风化区,说明中游地下水水化学组分主要受岩石风化作用控制,且受人类活动影响的扰动相对较小。

不同含水岩组地下水 Gibbs 图(图 8)显示,奥陶系岩溶含水岩组和新生界断陷盆地含水岩组地下水水化学组成主要受蒸发盐岩影响,此外还受到人类活动的影响(主要为工矿活动影响)。白垩系和石炭系—侏罗系含水岩组地下水主要分布于岩石风化区,说明该地下水水化学组分主要受岩石风化作用控制,且主要受硅酸盐岩和蒸发盐岩风化影响,人类活动影响的扰动相对较小。

水体的离子比值关系常用于指示水体的溶滤作用,反映水化学形成及演化特征(Abhijit and Alan, 2008; Zhu et al., 2011; Xing et al., 2013)。 $\gamma\text{Ca}^{2+}/\gamma\text{Na}^+$ 、 $\gamma\text{Mg}^{2+}/\gamma\text{Na}^+$ 和 $\gamma\text{HCO}_3^-/\gamma\text{Na}^+$ 比值关系可用于定性判别研究区内不同岩石风化溶解作用对地下水溶质的影响(Gaillardet et al., 1999)。北洛河不同含水岩组地下水 $\gamma\text{Ca}^{2+}/\gamma\text{Na}^+$ 和 $\gamma\text{Mg}^{2+}/\gamma\text{Na}^+$ 、 $\gamma\text{HCO}_3^-/\gamma\text{Na}^+$ 关系结果(图 9)显示,地下水矿物组成分布以硅酸

盐岩为中心,分别向两端的蒸发盐岩和碳酸盐岩延伸。其中,上游和部分中游白垩系含水岩组地下水矿物组分多以硅酸盐岩为主,中游石炭系—侏罗系含水岩组和部分下游奥陶系岩溶含水岩组地下水矿物组分以硅酸盐岩—碳酸盐岩混合为主,而大部分下游的奥陶系岩溶含水岩组和新生界断陷盆地含水岩组地下水矿物组分多以蒸发盐岩和蒸发盐岩—硅酸盐岩混合为主,说明该区地下水水化学组成主要受硅酸盐岩和蒸发盐岩风化为,碳酸盐岩对此也有一定的贡献。

通过 $\gamma\text{SO}_4^{2-}/\gamma\text{Ca}^{2+}$ 比值与 $\gamma\text{NO}_3^-/\gamma\text{Ca}^{2+}$ 比值关系可分析工矿活动、农业活动以及生活排污对地下水水化学组成的影响(周巧丽等,2019;秦鹏一等,2020)。北洛河不同含水岩组地下水 $\gamma\text{SO}_4^{2-}/\gamma\text{Ca}^{2+}$ 与 $\gamma\text{NO}_3^-/\gamma\text{Ca}^{2+}$ 关系(图 10)显示,大部分下游地下水 $\gamma\text{SO}_4^{2-}/\gamma\text{Ca}^{2+}$ 比值较大,指示了较为强烈的工矿活动影响,部分下游地区位于关中高新技术产业开发带的煤炭开发区和火电工业区;部分上游地下水也有较大的 $\gamma\text{SO}_4^{2-}/\gamma\text{Ca}^{2+}$ 比值,大部分上游地区位于陕北能源化工基地规划区和陇东能源化工基地规划区的石油开采化工区之间,水化学组成一定程度上受到石油化工开采的影响。整体上,区内地下水受农业活动、生活污水影响较小。上、下游地区

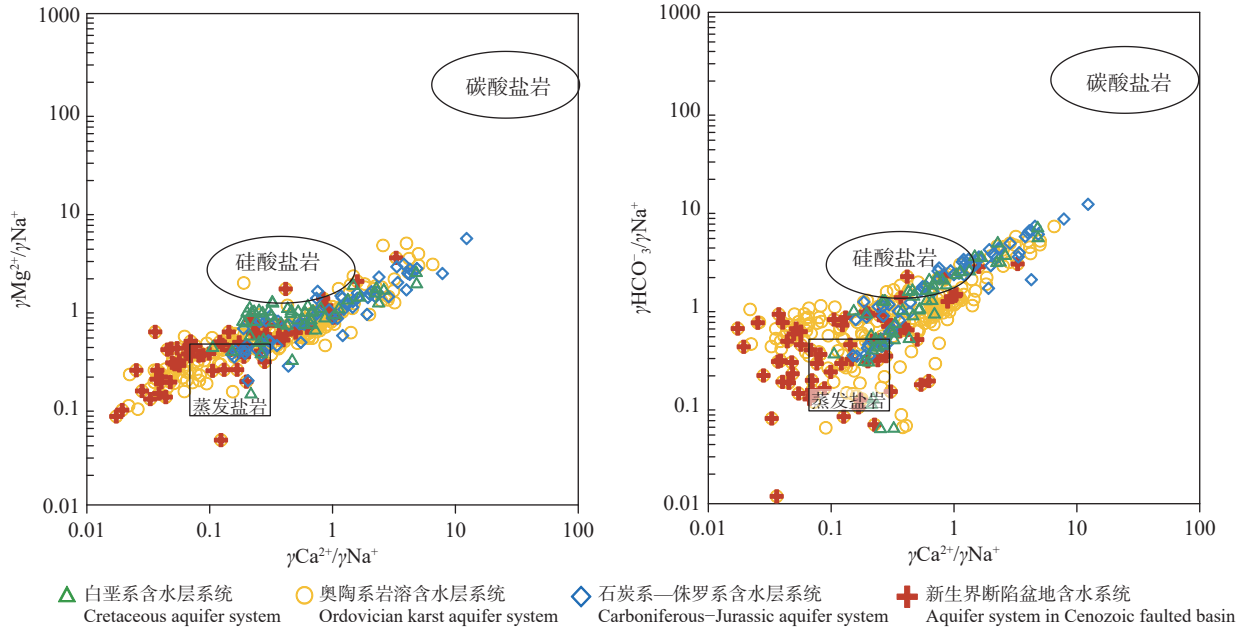


图 9 不同含水岩组地下水 $\gamma\text{Ca}^{2+}/\gamma\text{Na}^{+}$ 和 $\gamma\text{Mg}^{2+}/\gamma\text{Na}^{+}$ 、 $\gamma\text{HCO}_3^{-}/\gamma\text{Na}^{+}$ 关系
 Fig.9 Correlation between $\gamma\text{Ca}^{2+}/\gamma\text{Na}^{+}$, $\gamma\text{Mg}^{2+}/\gamma\text{Na}^{+}$ and $\gamma\text{HCO}_3^{-}/\gamma\text{Na}^{+}$ of groundwater in different aquifer groups

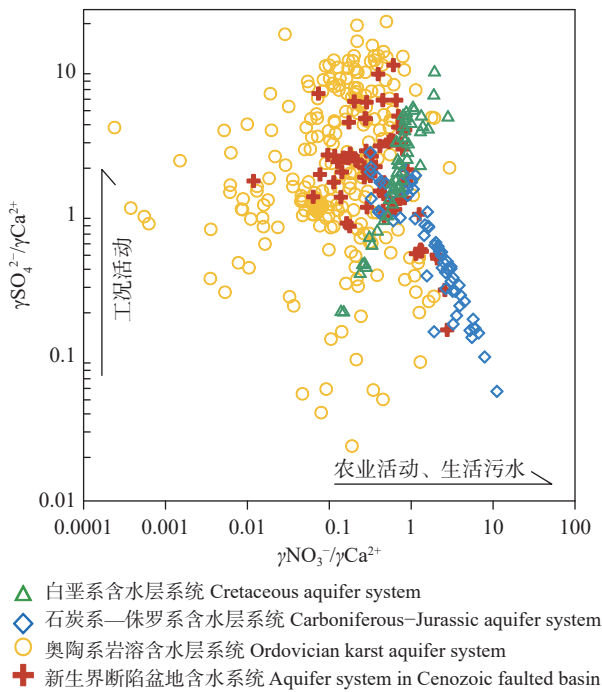


图 10 不同含水岩组地下水 $\gamma\text{SO}_4^{2-}/\gamma\text{Ca}^{2+}$ 与 $\gamma\text{NO}_3^{-}/\gamma\text{Ca}^{2+}$ 关系
 Fig.10 Correlation between $\gamma\text{SO}_4^{2-}/\gamma\text{Ca}^{2+}$ and $\gamma\text{NO}_3^{-}/\gamma\text{Ca}^{2+}$ of groundwater in different aquifer groups

地下水受工矿活动影响较严重, 水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4$ 型和 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Cl}$ 型, 中游地下水受工矿活动、农业活动、生活污水影响均较小, 水质整体较好, 水化学类型主要为 HCO_3 型。

5 结 论

基于 2019 年 8 月至 2021 年 9 月的地下水和地表水水化学和同位素数据, 查明陕西北洛河流域地下水水质现状并分析地下水水化学特征及演化机制, 得出以下结论:

(1) 地下水整体均呈弱碱性和还原-亚氧化环境。地下水 TDS 平均值为 1403 mg/L, 高于 III 类地下水水质标准。沿水文地质剖面自上游至下游, 地下水 TDS 呈现先降低后显著升高的趋势, 上游碎屑岩中的石膏、盐岩等易溶矿物经溶滤进入地下水, 下游松散孔隙水在蒸发浓缩的作用下积聚盐分。下游奥陶系岩溶含水岩组和新生界断陷盆地含水岩组地下水中各水化学组分浓度均较高。

(2) 地下水受到不同程度的大气降水淋滤作用影响。白垩系、石炭系—侏罗系和新生界断陷盆地含水岩组地下水整体处于封闭或半封闭的水文地球化学环境, 脱硫酸作用程度相对较强; 奥陶系岩溶含水岩组地下水脱硫酸作用程度相对较弱。上游白垩系含水岩组地下水水岩相互作用强烈, 地下水变质程度相对较高。

(3) 同位素特征显示, 地下水主要受大气降水补给, 且在水循环过程中受到了蒸发分馏作用的影响。石炭系—侏罗系含水岩组和新生界断陷盆地

含水岩组中地下水受蒸发浓缩作用影响相对较强。白垩系含水岩组和奥陶系岩溶含水岩组中大部分地下水被第四系黄土和新近系泥岩所覆盖,蒸发浓缩作用影响相对较弱。

(4)整体上,北洛河流域中游地下水水质相对较好,可作为饮用水;上游水质次之,下游平原区水质较差,以Ⅳ类和Ⅴ类为主,地下水水质一定程度上受到工矿活动的影响,部分地下水经适当处理后可饮用,而部分不宜饮用。作为主要饮用水水源的深层地下水水质优于浅层地下水水质。

(5)研究区地下水水化学成分受岩石风化和蒸发浓缩作用的共同控制,奥陶系岩溶含水岩组和新生界断陷盆地含水岩组地下水水化学组成主要受蒸发盐岩影响,此外还受到人类活动的影响。白垩系和石炭系—侏罗系含水岩组地下水水化学组分主要受岩石风化作用控制,且主要受硅酸盐岩和蒸发盐岩风化影响,人类活动影响的扰动相对较小。上、下游地区地下水受工矿活动影响较严重,中游地下水受工矿活动、农业活动、生活污水影响均较小,水质整体较好。

References

- Abhijit M, Alan E F. 2008. Deeper groundwater chemistry and geochemical modeling of the arsenic affected western Bengal basin, West Bengal, India[J]. *Applied Geochemistry*, 23(4): 863–894.
- Dong Ying, Song Yougui, Zhang Maosheng, Lan Minwen, Fu Xiaofen, Liu Huifang, Ning Qiangqiang. 2019. Several key basic geological problems on the development of the Guanzhong urban agglomeration[J]. *Northwestern Geology*, 52(2): 12–26 (in Chinese with English abstract).
- Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, Allègre C. J. 1999. Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers[J]. *Chemical Geology*, 159(1/4): 3–30.
- Ge Fenli. 2013. Analysis of feature variation of water sediment and probing of reasons in upstream area of Beiluo River[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 4: 145–150 (in Chinese with English abstract).
- Gibbs R J. 1970. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. *Science*, 170(3962): 1088–1090.
- Han Shuangbao. 2021. Introduction of China Geological Survey project 'Hydrogeological Survey of the Yellow River Basin'[J]. *Geology in China*, 48(6): 1664 (in Chinese).
- Han Shuangbao, Li Fucheng, Wang Sai, Li Haixue, Yuan Lei, Liu Jingtao, Shen Haoyong, Zhang Xueqing, Li Changqing, Wu Xi, Ma Tao, Wei Shibo, Zhao Minmin. 2021. Groundwater resource and eco-environmental problem of the Yellow River Basin[J]. *Geology in China*, 48(4): 1001–1019 (in Chinese with English abstract).
- Han Shuangbao, Wang Sai, Zhao Minmin, Wu Xi, Yuan Lei, Li Haixue, Li Fucheng, Ma Tao, Li Wenpeng, Zheng Yan. 2023. Ecological environmental changes and its impact on water resources and water-sediments relationship in Beiluo River Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 50(6): 14–24 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Guantao. 2016. Responses of Runoff and Sediment to Land Use Cover Changes in the Upper Reaches of Beiluo River Based on SWAT Model [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 1–82 (in Chinese with English abstract).
- Jing Yong, Chen Fangli, Ge Fenli, Gu Mingxing. 2010. Characteristics of water and sediment in source area of Beiluohe River[J]. *Hydrology*, 4: 92–96 (in Chinese with English abstract).
- Kang Yuan. 2008. Environmental Issue and Information System Construction of Oil Exploration and Exploitation in the Upper Stream of Beiluohe River in Northern Shaanxi Province [D]. Xi'an: Northwest University, 1–76 (in Chinese with English abstract).
- Liang Xing, Zhang Jingwei, Lan Kun, Shen Shuai, Ma Teng. 2020. Hydrochemical characteristics of groundwater and analysis of groundwater flow systems in Jiangnan Plain[J]. *Geological Science and Technology Information*, 39(1): 21–33 (in Chinese with English abstract).
- Luo Xinyan. 2021. Analysis on the transformation relationship between surface water and groundwater in the Yellow River Basin[J]. *Mineral Resources and Geology*, 35(3): 517–522 (in Chinese with English abstract).
- Ma Tao, Li Wenli, Han Shuangbao, Zhang Hongqiang, Wang Wenke, Li Fucheng, Li Haixue, He Xubo, Zhao Meimei. 2023. Distribution characteristics, influencing factors and development potential of groundwater resources in Shaanxi Province of the Yellow River Basin[J]. *Geology in China*, 50(5): 1432–1445 (in Chinese with English abstract).
- Ma Yukun. 2017. Analysis of water resources situation in the lower reaches of Beiluo River [J]. *Shaanxi Water Resources*, 6: 3, 15 (in Chinese with English abstract).
- Pu Junbing, Yuan Daoxian, Jiang Yongjun, Gou Pengfei, Yin Jianjun. 2010. Hydrogeochemistry and environmental meaning of Chongqing subterranean karst streams in China[J]. *Advances in Water Science*, 21(5): 628–636 (in Chinese with English abstract).
- Qiao Wen, Cao Wengeng, Gao Zhipeng, Pan Deng, Ren Yu, Li Zeyan, Zhang Zhuo. 2022. Contrasting behaviors of groundwater arsenic and fluoride in the lower reaches of the Yellow River basin, China: Geochemical and modeling evidences [J]. *Science of the Total Environment*, 851(Pt 1): 158134.
- Qin Pengyi, Xu Xianfeng, Cai Wutian, Li Guiheng, Wei Shenghui. 2020. Analysis on aquifers hydrochemical distribution characteristics and genesis of the alluvial fan in Anyang, Henan Province[J]. *Hydrology*, 40(6): 89–96 (in Chinese with English abstract).
- Qin Wei, Zhu Qingke, Liu Guangquan, Zhang Yan. 2010. Regulation effects of runoff and sediment of ecological conservation in the upper reaches of Beiluo River[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,

- 11: 1325–1332 (in Chinese with English abstract).
- Tan Kaijun, Zhang Fan, Yin Lu, Dai Dongdong, Qi Wen. 2012. Preservation conditions for formation water and hydrocarbon in Wuxia area, Junggar Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 1: 36–39.
- Tong Xiaoxia, Tang Hui, Gan Rong, Li Zitao, He Xinlin, Gu Shuqian. 2022. Characteristics and causes of changing groundwater quality in the boundary line of the middle and lower Yellow River (right bank)[J]. *Water*, 14(12): 1846.
- Wang Xueping, Li Wenzhe. 2010. Geological tectonics control on the karstic water in the south margin of the Ordos Basin[J]. *Northwestern Geology*, 43(3): 106–112 (in Chinese with English abstract).
- Xing Lina, Guo Huaming, Zhan Yanhong. 2013. Groundwater hydrochemical characteristics and processes along flow paths in the North China Plain[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 70–71: 250–264.
- Xu Wenmei, Lian Zhenmin. 2007. Factors of vegetation change in Beiluo River Valley[J]. *Journal of Yanan University (Social Science)*, 29(2): 79–81 (in Chinese with English abstract).
- Yu Songyan, Xu Zongxue, Wu Wei, Li Yanli. 2014. Spatial variation of water quality and its response to landuse in the Beiluo River Basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 34(5): 1309–1315 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Fan, Wang Guangcai, Zhang Maosheng, Sun Pingping, Han Xu, Guo Jiangbo. 2023. Identification of produced water and characteristics of hydrochemistry and stable hydrogen–oxygen isotopes of contaminated groundwater[J]. *Northwestern Geology*, 56(3): 98–108 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Ming, Huang Chunchang, Pang Jiangli, ZhaXiaochun, Yao Ping. 2011. Palaeo-flood hydrological studies in the middle reaches of Beiluo River[J]. *Journal of Natural Disasters*, 20(5): 155–161 (in Chinese with English abstract).
- Zhi Chuanshun, Cao Wengeng, Wang Zhen, Li Zeyan. 2021. High-arsenic groundwater in paleochannels of the lower Yellow River, China: Distribution and genesis mechanisms[J]. *Water*, 13(3): 338.
- Zhou Qiaoli, Song Yumei, Zhou Yibo, Zhang Tuxiu, SuLiukun. 2019. Analysis of air and groundwater pollution in a municipal solid waste landfill site in Guangzhou[J]. *Environmental Chemistry*, 38(4): 761–767 (in Chinese with English abstract).
- Zhu B Q, Yang X P, Rioual P, Qin X G, Liu Z T, Xiong Heigang, Yu Jingjie. 2011. Hydrogeochemistry of three watersheds (the Erlqis, Zhungarar and Yili) in northern Xinjiang, NW China[J]. *Applied Geochemistry*, 26(8): 1535–1548.
- 盆地城市群发展中几个关键基础地质问题[J]. *西北地质*, 52(2): 12–26.
- 葛芬莉. 2013. 北洛河上游区水沙特性变化分析研究[J]. *水资源与水工程学报*, 4: 145–150.
- 韩双宝. 2021. 中国地质调查局黄河流域水文地质调查工程简介[J]. *中国地质*, 48(6): 1664.
- 韩双宝, 李甫成, 王赛, 李海学, 袁磊, 刘景涛, 申豪勇, 张学庆, 李长青, 吴玺, 马涛, 魏世博, 赵敏敏. 2021. 黄河流域地下水资源状况及其生态环境问题[J]. *中国地质*, 48(4): 1001–1019.
- 韩双宝, 王赛, 赵敏敏, 吴玺, 袁磊, 李海学, 李甫成, 马涛, 李文鹏, 郑焰. 2023. 北洛河流域生态环境变迁及对水资源和水沙关系的影响[J]. *水文地质工程地质*, 50(6): 14–24.
- 蒋观滔. 2016. 基于 SWAT 模型的北洛河上游土地利用/覆被变化水沙响应研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 1–82.
- 井涌, 陈芳莉, 葛芬莉, 古明兴. 2010. 北洛河源头区水沙特性变化分析[J]. *水文*, 4: 92–96.
- 康媛. 2008. 陕北洛河上游石油勘探开发的环境问题及信息系统建设 [D]. 西安: 西北大学, 1–76.
- 梁杏, 张婧玮, 蓝坤, 沈帅, 马腾. 2020. 江汉平原地下水化学特征及水流系统分析[J]. *地质科技情报*, 39(1): 21–33.
- 罗新燕. 2021. 黄河流域内地表水与地下水转化关系分析[J]. *矿产与地质*, 35(3): 517–522.
- 马涛, 李文莉, 韩双宝, 张红强, 王文科, 李甫成, 李海学, 贺旭波, 赵梅梅. 2023. 黄河流域陕西省地下水资源分布特征、影响因素及开发潜力[J]. *中国地质*, 50(5): 1432–1445.
- 马禹钡. 2017. 北洛河下游水资源情况及分析[J]. *陕西水利*, 6: 3, 15.
- 蒲俊兵, 袁道先, 蒋勇军, 苟鹏飞, 殷建军. 2010. 重庆岩溶地下水水文地球化学特征及环境意义[J]. *水科学进展*, 21(5): 628–636.
- 秦鹏一, 徐先锋, 蔡五田, 李贵恒, 魏盛辉. 2020. 河南安阳冲洪积扇含水层水化学分布特征及成因分析[J]. *水文*, 40(6): 89–96.
- 秦伟, 朱清科, 刘广全, 张岩. 2010. 北洛河上游生态建设的水沙调控效应[J]. *水利学报*, 11: 1325–1332.
- 谭开俊, 张帆, 尹路, 代冬冬, 齐雯. 2012. 准噶尔盆地乌夏地区地层水与油气保存条件[J]. *石油实验地质*, 1: 36–39.
- 王学平, 李稳哲. 2010. 地质构造对鄂尔多斯盆地南缘岩溶地下水的控制作用[J]. *西北地质*, 43(3): 106–112.
- 徐文梅, 廉振民. 2007. 试析北洛河流域植被变迁的原因[J]. *延安大学学报*, 29(2): 79–81.
- 于松延, 徐宗学, 武玮, 李艳利. 2014. 北洛河流域水质空间异质性及其对土地利用结构的响应[J]. *环境科学学报*, 34(5): 1309–1315.
- 张帆, 王广才, 张茂省, 孙萍萍, 韩绪, 郭江波. 2023. 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*, 56(3): 98–108.
- 赵明, 黄春长, 庞奖励, 查小春, 姚平. 2011. 北洛河中游白水段峡谷全新世特大洪水水文学研究[J]. *自然灾害学报*, 20(5): 155–161.
- 周巧丽, 宋玉梅, 周漪波, 张土秀, 苏流坤. 2019. 广州市某生活垃圾填埋场空气及地下水污染状况分析[J]. *环境化学*, 38(4): 761–767.

附中文参考文献

董英, 宋友桂, 张茂省, 兰敏文, 付晓芬, 刘慧芳, 宁强强. 2019. 关中