

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.272

引用格式: 马孟科, 马蒙, 谷瑜, 等. 河南省黄河侧渗影响带地下水环境背景值分析[J]. 中国地质调查, 2025, 12(1): 109–119. (Ma M K, Ma M, Gu Y, et al. Analysis of groundwater environmental background values in the Yellow River lateral seepage impact zone in Henan Province[J]. Geological Survey of China, 2025, 12(1): 109–119.)

河南省黄河侧渗影响带地下水环境背景值分析

马孟科¹, 马蒙^{2*}, 谷瑜¹, 白雪³, 皇永辉¹, 陈蕾¹

(1. 河南省地质局地质灾害防治中心, 河南 郑州 450012; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 3. 北京市工程地质研究所, 北京 100048)

摘要: 地下水环境背景值是衡量地下水是否遭受污染的重要依据, 确定区域内地下水环境背景值是评价该地区地下水可持续发展的重要标尺。针对河南省黄河下游侧渗影响带水文地质与地下水化学特征, 划分5个地下水环境背景值单元分区, 运用数理统计方法计算各个分区8种地下水化学指标的地下水环境背景值和范围。研究结果表明: 黄河阶地IV区的地下水背景值最低, 地处黄河南岸的I区、II区地下水背景值较低, 黄河北岸的V区和位于黄河流向自EW向转为SW向凸岸处的III区地下水背景值较高; 研究区主要地下水类型为 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+} \cdot \text{Na}^+$ 型、 $\text{HCO}_3^- - \text{Mg}^{2+} \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Na}^+$ 型和 $\text{HCO}_3^- - \text{Mg}^{2+} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+}$ 型, 研究区内 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、溶解性总固体(total dissolved solids, TDS)值存在高背景值区, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的高背景值区可能是由于矿物溶解和阳离子交换作用所导致, 农业面源污染形成了 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的高背景值区, TDS值高背景值区是由于该区域蒸发浓缩作用强所导致; Gibbs图解显示研究区地下水主要受到原生地层中矿物风化溶解作用的影响, 也受到部分蒸发浓缩作用的影响。研究结果查明了河南省黄河下游侧渗影响带的水质分布规律, 提升对该区域的地下水水质形成演化机理的认识, 为维护区域地下水可持续发展提供了重要支撑。

关键词: 地下水背景值; 地下水化学; 数理统计方法; 黄河侧渗影响带

中图分类号: P681.7

文献标志码: A

文章编号: 2095–8706(2025)01–0109–11

0 引言

地下水作为地球上重要的水资源之一, 其质量和可持续性一直是研究的热点。地下水环境背景值是指在一定时间范围内, 不受人类活动影响或受人类活动影响较小的地下水天然化学组分和综合指标含量^[1]。查明地下水环境背景值有助于追溯地下水污染来源、评估地下水环境污染程度、研究污染物运移变化规律等, 对理解区域地下水系统现状、评估人类活动对地下水环境的影响具有重要意义。1975年, J. J. Connor率先提出了环境背景值的

概念^[2], 我国于20世纪90年代初也正式提出了地下水环境背景值的概念^[3–4]。2023年10月23日, 生态环境部组织制定印发了《地下水环境背景值统计表征技术指南(试行)》^[1], 为规范地下水环境背景值统计表征工作提供了技术指导。国内外学者通过大量的实地调查和样品分析, 对不同地区的地下水环境背景值进行了深入研究^[3, 5–9]。2008年, 欧洲科学家联盟在欧洲开展了地下水水质的详细调查, 明确含水层中地下水的天然背景值并研究其地球化学过程^[10]。我国华北平原区的地下水背景值研究表明^[11], 该地区的地下水普遍受到农业活动和工业排放的影响, 导致某些化学成分的浓度超

收稿日期: 2024–08–02; 修订日期: 2025–01–13。

基金项目: 河南省自然资源厅“卫河流域水土生态系统中污染物迁移转化机理与修复模式研究(编号: 豫自然资函[2021]157号–8)”、河南省地矿局“基于河床下切条件下黄河补给地下水强度变化对两岸生态环境影响研究——以夹河滩为例(编号: 豫地矿青科创[2021]10号)”“黄河下游中牟段水循环及其湿地生态系统保护与恢复研究(编号: 豫地环[2022]4号)”及郑州市自然资源局“郑州市城市地下水水资源调查评价(编号: 郑财招标采购–2021–217)”项目联合资助。

第一作者简介: 马孟科(1990—), 男, 工程师, 主要从事地下水数值模拟、水文地质调查方面的研究。Email: 812142281@qq.com。

通信作者简介: 马蒙(1993—), 男, 高级工程师, 主要从事地下水人工回补、地下水污染方面的研究。Email: mameng@iwhr.com。

出了自然背景水平。

确定地下水环境背景值的方法较为多样,国际上多使用的地下水背景值确定方法主要有概率图法^[4,12-13]、层次聚类分析法^[4,14]、预筛选法^[4,8,13]、次序统计量回归模型法^[4,15]等。国内一般使用数理统计法^[6,10,16-18]、类比法^[19]、历时曲线法^[4,19-20]等。数理统计法是应用最广泛的方法,涉及地下水单元划分、取样分析、异常值识别与剔除、数据的正态性检验、确定背景值等步骤^[6,10]。

黄河下游水位高于两岸地下水位,河水源源不断地渗漏进含水层补给地下水,黄河侧渗补给地下水的宽度被称为黄河侧渗影响带^[21]。前人针对黄河侧渗影响带开展了地下水数值模拟、同位素示踪等研究^[22-23],但少有关于黄河侧渗带地下水环境背景值的相关研究。本研究以河南省黄河侧渗影响带花园口断面—东坝头断面为研究区,旨在通过综合分析水文地质条件和水化学数据,依据研究区地下水化学特征,结合数理统计方法,计算区域浅层地下水的环境背景值,明确区域内各指标在时空

上的分布特征,为区域地下水资源的可持续利用和保护提供科学支持。

1 研究区概况

研究区位于河南省的东部,行政区划隶属于郑州市、新乡市、开封市,面积约 4 200 km²。研究区处黄河下游冲积平原,黄河自西向东从研究区中部流过,为温带大陆性季风气候,多年平均气温 13.1 ~ 14.5 ℃,多年平均降水量为 580 ~ 680 mm。

研究区分布有新近纪和第四纪松散堆积物,各类砂层构成主要含水层,赋存有较丰富的地下水资源。研究区含水层划分为浅层潜水、中层承压水、深层承压水三大含水层组。本文研究对象为研究区内开采量大、多用于农业灌溉的浅层潜水含水层。浅层潜水含水层由黄河冲积形成,包括全新统、上更新统、中更新统上段含水砂层。含水层底板埋深一般为 60 ~ 120 m,开封北最深可达 140 m。研究区地下水平均埋深 9.6 m(图 1)。

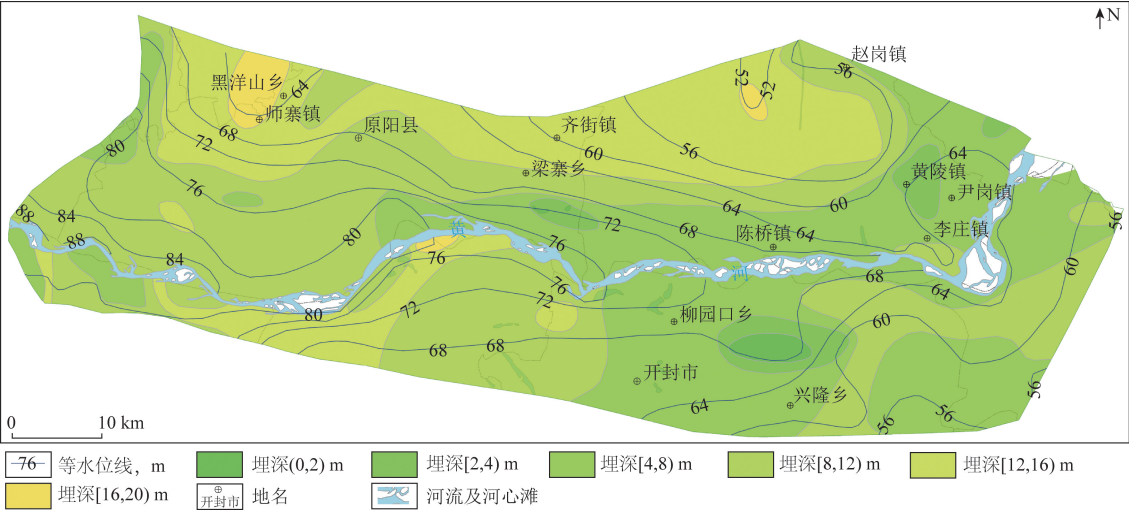


图 1 研究区地下水流程图(2019 年 11 月)

Fig. 1 Groundwater contour diagram of the study area (November 2019)

研究区所处黄河下游平原,地形平坦,地表水入渗、大气降水和灌溉回渗补给是浅层潜水的主要补给来源。黄河为高悬于平原的地上河,横贯研究区中部。黄河水位高出两侧高漫滩地下水位 3 ~ 5 m,河床砂层与岸边浅层含水层相连,水力联系密切,黄河水源源不断地补给两岸地下水。黄河是两岸地下水分水岭,黄河以南地下水自西北向东南方向径流,黄河以北地下水自西南向北方方向径流(图 1)。研究区整体水力坡度小,径流滞缓。浅层地

下水的排泄形式主要有人工开采、蒸发和径流排泄。在城镇和井灌区,地下水开采是其主要排泄形式,引黄灌区、黄河滩地、背河洼地等地下水开采量小的地区,水位埋深小,地下水的排泄形式以蒸发为主。

2 研究方法

本文采用国际上常见的数理统计方法确定研究区地下水背景值。

2.1 地下水环境背景值单元分区

地下水环境背景值单元分区是在一定时间、一定范围内水环境要素和元素一致的地区^[24]。本文根据研究区地形地貌、水文地质条件、地下水化学类型分区、地下水系统分区以及黄河大堤展布情况进行统一划分^[25-26],将研究区划分为黄河西南侧冲洪积平原(I区)、黄河东南侧冲洪积平原(II区)、黄河转向凸岸(III区)、黄河河漫滩(IV区)、黄河北侧冲洪积平原(V区)共计 5 个地下水环境背景值单元分区(图 2)。

进行统一划分^[25-26],将研究区划分为黄河西南侧冲洪积平原(I区)、黄河东南侧冲洪积平原(II区)、黄河转向凸岸(III区)、黄河河漫滩(IV区)、黄河北侧冲洪积平原(V区)共计 5 个地下水环境背景值单元分区(图 2)。

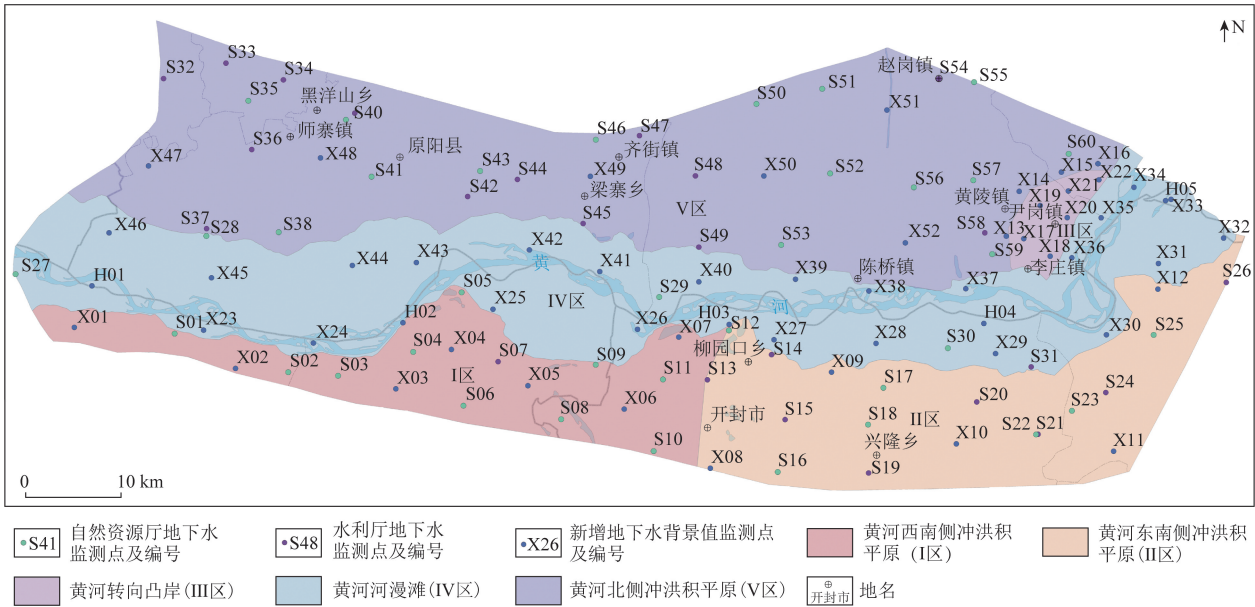


图 2 地下水环境背景值分区及采样点分布

Fig. 2 Groundwater environmental background value zoning and sampling points in the study area

2.2 采样点布设及样品采集分析

研究区现有地下水监测点 60 个,均位于浅层潜水含水层,其中自然资源厅地下水监测点 36 个,水利厅地下水监测点 24 个,密度约 70 km²/点,在此基础上新布设 52 个地下水背景值监测点,来源于现有民用井(图 2)。按照《HJ 164—2020 地下水环境监测技术规范》^[27]取样要求采取水样,共获取地下水样品数据 112 组。样品送至河南省自然资源监测院实验测试中心、河南省水环境监测中心等单位按照《GB/T 14848—2017 地下水质量标准》^[28]、《HJ 164—2020 地下水环境监测技术规范》^[27]进行检测分析,用于本研究的水样指标包括: pH 值、HCO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻、K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、溶解性总固体(total dissolved solids, TDS)。

2.3 异常值剔除

为获取合理的水环境背景值,必须对测定数据进行检验。首先需要对监测数据进行预筛选,运用电荷平衡、碳酸平衡剔除不合理数据,将 CBE > 10%、pH 值 < 8.34、检测出 CO₃²⁻ 的样品剔除,计算公式为

$$CBE = \frac{\sum z m_c - \sum z m_a}{\sum z m_c + \sum z m_a} \times 100\% \quad (1)$$

式中: z 为离子电荷数; m_c 为阳离子 (Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺) 的摩尔浓度, mol/L; m_a 为阴离子 (HCO⁻、CO₃²⁻、SO₄²⁺、Cl⁻) 的摩尔浓度, mol/L。

利用地下水中 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、HCO⁻、SO₄²⁻、Cl⁻ 共 8 项指标的浓度数据绘制各个单元分区的 Piper 三线图。将 Piper 三线图转换为二维坐标图,利用马氏距离对各水化学图进行相似程度的计算,通过其相似程度来判断各样品点的水化学异常。采用 Grubbs 检验法 ($\alpha = 0.05$),对统计单元内数据进行检验,若计算的统计量 G 大于 Grubbs 检验法的临界值表中显著性水平 α 下的临界值,将 x_d 视为异常值,对异常数据予以剔除,计算公式为

$$G = |x_d - \bar{x}_n| / S_n \quad (2)$$

式中: G 为统计量; x_d 为待检验的可疑值; $\bar{x}_n$ 、 S_n^2 为由包括可疑值在内的全部 n 个值计算的均值与方差。

2.4 背景值计算

对数据进行预筛选和异常值剔除后,使用

续表

分区	指标	$\omega(\text{HCO}_3^-)/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\omega(\text{Cl}^-)/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\omega(\text{SO}_4^{2-})/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\omega(\text{K}^+)/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\omega(\text{Ca}^{2+})/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\omega(\text{Na}^+)/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\omega(\text{Mg}^{2+})/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	pH 值	TDS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
Ⅲ区	中位数	553.02	140.03	162.01	0.22	72.60	126.04	46.80	7.55	886.50
	背景值	532.89	150.42	195.19	0.84	76.63	138.39	50.34	7.67	928.80
	背景值下限(5%)	303.03	34.94	26.46	0.022	24.20	48.22	20.58	7.32	409.60
	背景值上限(95%)	791.20	288.80	394.80	2.12	130.60	259.60	90.12	8.07	1348.40
	分布类型	正态	正态	正态	正态	正态	正态	正态	正态	正态
	样本数/个	9	9	9	9	9	9	9	10	10
Ⅳ区	中位数	415.02	54.59	54.80	2.01	78.20	66.30	46.90	7.54	567.50
	背景值	472.86	70.89	60.54	1.85	84.11	68.75	47.93	7.55	614.11
	背景值下限(5%)	258.60	10.86	5.56	0.55	44.58	20.55	19.80	7.23	310.00
	背景值上限(95%)	752.40	168.8	121.6	7.92	120.04	131.6	82.38	7.73	920.79
	分布类型	正态	正态	正态	对数正态	正态	正态	正态	正态	正态
	样本数/个	25	25	25	25	25	25	25	29	29
Ⅴ区	中位数	543.08	109.19	130.00	1.83	79.83	139.10	64.52	7.50	854.50
	背景值	573.28	123.84	142.77	2.46	96.60	144.57	65.87	7.50	855.33
	背景值下限(5%)	477.06	44.84	39.46	0.54	56.13	86.60	39.16	7.08	563.16
	背景值上限(95%)	721.10	230.10	284.60	5.43	167.60	235.60	96.89	7.96	1376.05
	分布类型	正态	正态	正态	正态	正态	正态	正态	正态	正态
	样本数/个	19	19	19	19	19	19	19	35	34

I 区地下水中 TDS 值背景值范围为 369.20 ~ 1 142.00 mg/L,在五个分区中背景值较低。pH 值背景值范围为 7.21 ~ 7.88,中性水。I 区地下水环境背景值整体属于研究区较低水平, HCO_3^- 、 Mg^{2+} 等指标背景值均为研究区中最低。I 区样品全部位于菱形分区中的 Pipper 三线图菱形 5 区^[29],碳酸硬度超过 50%。阴离子类型为 HCO_3^- 型,阳离子集中在三角形中部, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 含量较为接近,阳离子主要类型为 $\text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+} \cdot \text{Na}^+$ 型、 $\text{Mg}^{2+} \cdot \text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+} \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Na}^+$ 型和 $\text{Mg}^{2+} \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Na}^+$ 型等(图 4(a))。

II 区地下水中 TDS 值背景值范围为 488.20 ~ 1 480.00 mg/L,pH 值背景值范围为 7.19 ~ 7.96,中性水。II 区各指标地下水环境背景值普遍低于 III 区与 V 区,略低于 I 区与 IV 区,处于研究区中间水平。阴离子主要为 HCO_3^- 型和 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^-$ 型,阳离子中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 含量同样较为接近,类型包含 $\text{Mg}^{2+} \cdot \text{Ca}^{2+}$ 型、 $\text{Mg}^{2+} \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Na}^+$ 型、 $\text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ 型、 $\text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+} \cdot \text{Na}^+$ 型、 $\text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+}$ 型和 $\text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+} \cdot \text{Na}^+$ 型等。多数样品点集中在菱形 5 区中,与同在黄河南岸的 I 区一致(图 4(b))。

III 区地下水中 TDS 值背景值范围为 409.60 ~ 1 348.40 mg/L,pH 值背景值范围为 7.32 ~ 8.07,整体为中性水,个别点位呈弱碱性水。III 区各指标地下水环境背景值在研究区内较高, SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Na^+ 等指标背景值均为研究区内最高。地下水化学类型较为多样,阴离子以 HCO_3^- 型和 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ 型为主,阳离子以 $\text{Na}^+ \cdot \text{Mg}^{2+} \cdot \text{Ca}^{2+}$ 型为主(图 4(c))。

IV 区地下水中 TDS 值背景值范围为 310.00 ~ 920.79 mg/L,均小于 1 000.00 mg/L,为 5 个分区中背景值最低,该区地下水以淡水为主,矿化度较低。pH 值背景值范围为 7.23 ~ 7.73,中性水。IV 区地下水中, SO_4^{2-} 、 Cl^- 等指标背景值为研究区内最低。主要为 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ 型、 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+} \cdot \text{Na}^+$ 型和 $\text{HCO}_3^- - \text{Mg}^{2+} \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Na}^+$ 型。 HCO_3^- 型占绝对优势,占全部的 80%,包含少量 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^-$ 型,阳离子中 $\text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ 型、 $\text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+} \cdot \text{Na}^+$ 型和 $\text{Mg}^{2+} \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Na}^+$ 型最为普遍。样品点集中在 Pipper 三线图菱形 5 区中,I 区、II 区较为类似,表明研究区黄河河漫滩处地下水与南岸地下水水质较为接近(图 4(d))。

V 区地下水中 TDS 背景值范围为 563.16 ~ 1 376.00 mg/L,背景值高于其他分区。pH 值背景值范围为 7.08 ~ 7.96,中性水。V 区地下水中, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等指标背景值均为研究区内最高。阳离子主要为 HCO_3^- 型,零星分布有 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^-$ 型和 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ 型, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 三种阳离子的含量较为接近,主要类型为 $\text{Mg}^{2+} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+}$ 型、 $\text{Na}^+ \cdot \text{Mg}^{2+}$ 型等(图 4(e))。

研究区内,除 IV 区 K^+ 离子分布类型为对数正态分布外,其余均为正态分布(表 1),地下水指标分布具有一定的规律性^[6]。总体来看,研究区主要地下水类型为 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+} \cdot \text{Na}^+$ 型、 $\text{HCO}_3^- - \text{Mg}^{2+} \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Na}^+$ 型和 $\text{HCO}_3^- - \text{Mg}^{2+} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+}$ 型。研究区内,IV 区的地下水各指标环

境背景值最低。这是由于 IV 区位于黄河阶地,受到强烈的地表水入渗补给,且降水较多,所以地下水径流强度大、循环周期短、溶滤作用弱,地下水 TDS 值低。相较黄河北岸的 V 区,地处黄河南岸的 I 区、II 区,与地表水力联系更为紧密,地下水各指标

环境背景值高于 V 区。而 V 区则为地下水排泄区,地下水径流弱,溶滤作用强,各种地下水指标环境背景值高。III 区位于黄河流向自 EW 向转为 SN 向凸岸处,潜水埋深浅,水流交替缓慢,溶滤作用不发育,蒸发浓缩作用强烈,因此地下水环境背景值高。

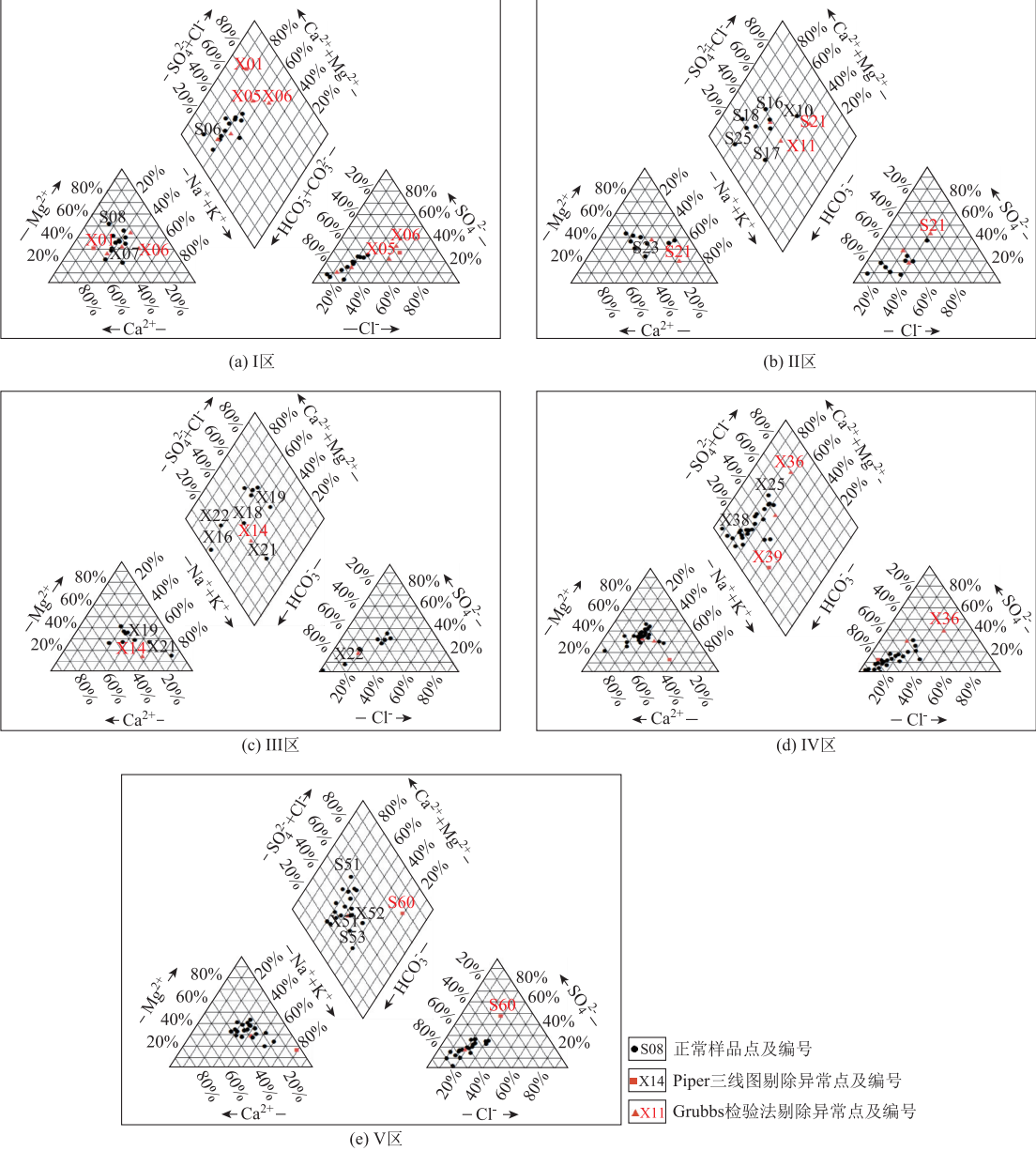


图 4 研究区 Piper 三线图

Fig.4 Piper diagrams of the study area

3.2 地下水化学空间分布特征及现状分析

对研究区典型地下水化学指标背景值进行空间插值,绘制出各指标空间分布等值线(图 5)。研究区 Ca^{2+} 背景值范围为 21.40 ~ 163.00 mg/L,高背景值区主要位于研究区西北部、东南部及中部梁寨乡附近(图 5(a))。地层中含钙质结核和

少量铁锰质结核,在淋滤作用和阳离子交换作用下,岩石中的钙质成分溶解并进入地下水中,导致地下水中 Ca^{2+} 含量升高^[30]。研究区 Mg^{2+} 背景值范围为 11.20 ~ 191.00 mg/L,高背景值区主要分布在研究区北部、东部和开封市柳园口乡—兴隆乡一带,低背景值区主要分布在黄河阶地一带

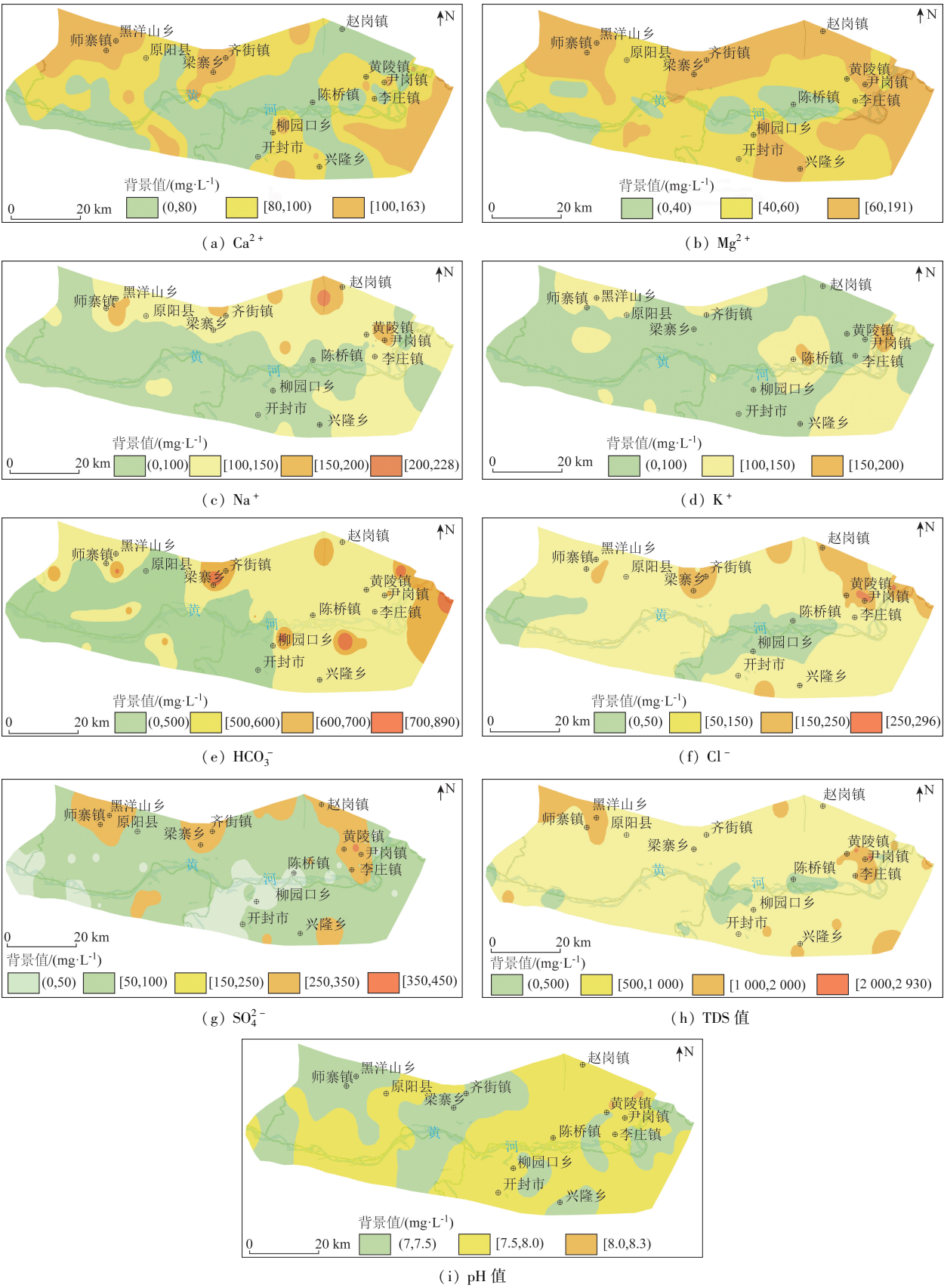


图 5 研究区典型指标地下水环境背景值等值线

Fig. 5 Contour for typical indicators of groundwater environmental background values in the study area

(图 5(b))。研究区 Na^+ 背景值范围为 19.34 ~ 228.00 mg/L,高背景值区要位于研究区北部和东部,研究区西南一带背景值浓度较低,小于 100.00 mg/L(图 5(c))。研究区大部分区域土地使用性质为农田,化肥农药的使用随淋溶、渗透进入土壤内部,从土壤中交换出 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等离子并进入地下水,导致离子浓度升高。研究区 K^+ 背景值范围为 0.02 ~ 59.00 mg/L,整体背景值较低,相对高背景区位于东部尹岗镇附近和陈桥镇附近(图 5(d))。

研究区 HCO_3^- 背景值范围为 183.00 ~ 890.00 mg/L,低背景值区主要位于黄河沿岸和研究区西南部,其余区域较高(图 5(e))。研究区 Cl^- 背景值范围为 9.15 ~ 296.00 mg/L,高背景值区主要位于研究区北部赵港镇—尹岗镇、齐街镇—梁寨乡、黑羊山乡—师寨镇等区域(图 5(f))。研究区 SO_4^{2-} 背景值含量范围为 1.30 ~ 450.00 mg/L,高背景值区主要位于研究区北部(图 5(g)),与 Cl^- 高背景值区相近,可能来源于周边农业生产中的面源污染。

研究区 TDS 背景范围为 260.00 ~ 2 930.00 mg/L(图 5(h)),高背景值区主要集中在 III 区的河道左岸黄陵镇、尹岗镇和李庄镇一带(图 1),该区域因为地下水埋深较浅,水力坡度小,水交替缓慢,潜水蒸发浓缩作用强烈,为潜水化学组分浓缩累积区,导致 TDS 值偏高^[31]。研究区 pH 值背景值为 7.00 ~ 8.30(图 5(i)),属中性水,均未有超标现象^[32]。

3.3 基于 Gibbs 图解的地下水化学成因分析

Gibbs 图解通过地下水的 $\gamma\text{Na}^+ / (\gamma\text{Na}^+ + \gamma\text{Ca}^{2+}) - \text{TDS}$ 和 $\gamma\text{Cl}^- / (\gamma\text{Cl}^- + \gamma\text{HCO}_3^-) - \text{TDS}$ 关系判断其分布成因^[33]。通过不同计算单元的数据点在 Gibbs 图解上的分布可以明显看出,研究区地下水在 Gibbs 图解中大部分数据点更靠近于岩石风化区(图 6),表明该地区中地下水主要受到原生地层中矿物风化溶解作用影响,部分点位投点偏向于蒸发浓缩区,表明同时也会受到部分蒸发浓缩作用的影响^[34]。有少数投点的 $\gamma\text{Na}^+ / (\gamma\text{Na}^+ + \gamma\text{Ca}^{2+})$ 值大于 0.8,且 TDS 值小于 1 000.00 mg/L,不在 Gibbs 图解归类中,推测该区域地下水可能受到其他地下水化学影响机制的影响。

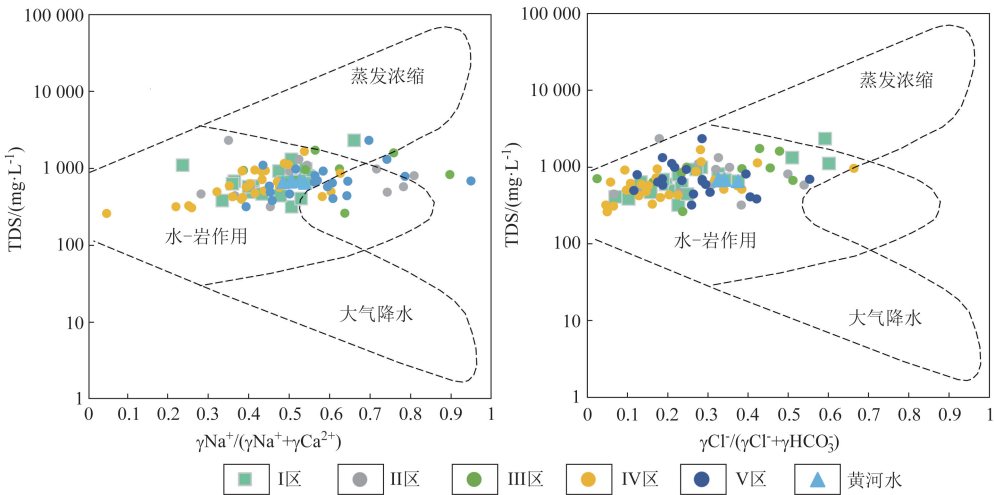


图 6 研究区各计算单元和黄河水 Gibbs 图解

Fig. 6 Gibbs diagrams for each computing unit of the study area and the Yellow River water

4 结论

本研究将黄河下游侧渗影响带分成了 5 个地下水环境背景值单元区,计算了各个分区 8 种地下水化学指标的地下水环境背景值和范围,为区域地下水管理提供了重要参数支撑。主要结论如下。

(1)研究区主要地下水类型为 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+} \cdot \text{Na}^+$ 型、 $\text{HCO}_3^- - \text{Mg}^{2+} \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Na}^+$ 型和 $\text{HCO}_3^- - \text{Mg}^{2+} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+}$ 型水,黄河阶地 IV 区的地下水环境背景值最低,地处黄河南岸的 I 区、II 区地下水环境背景值较低,黄河北岸的 V 区和位于黄河自 EW 向转为 SN 向凸岸处的 III 区地下水环境背景值较高。

(2) 根据地下水化学各指标空间分布情况, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的高背景值区可能是由于矿物溶解和阳离子交换作用所导致, 农业面源污染造成了 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的高背景值区域, TDS 值高背景值区是由于该区域蒸发浓缩作用强所导致。

(3) 利用 Gibbs 图解对地下水化学成因进行分析, 分析结果显示该地区地下水主要受到原生地层中矿物风化溶解作用影响; 部分点位投点偏向于蒸发浓缩区, 表明同时也会受到部分蒸发浓缩作用的影响; 有少数投点不在 Gibbs 图解归类中, 推测该区域地下水可能受到其他地下水化学影响机制的影响。

参考文献 (References):

[1] 中华人民共和国生态环境部. 关于印发《地下水环境背景值统计表征技术指南 (试行)》的通知 [EB/OL]. (2023 - 10 - 23).
Ministry of Ecology and Environment, PRC. Guidelines for statistical characterization of groundwater environmental background values (Trial version) [EB/OL]. (2023 - 10 - 23).

[2] 寇文杰, 谢振华, 赵立新, 等. 探讨地下水背景值确定方法及其容易忽视的几个问题 [J]. 安徽农业科学, 2013, 41 (8): 3603 - 3605.
Kou W J, Xie Z H, Zhao L X, et al. On several methods for determining the groundwater background value and some easily neglected problems [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41 (8): 3603 - 3605.

[3] 江西省地矿局环境地质大队. 长江中下游重点地区地下水环境背景值调查研究 [R]. 南昌: 江西省地矿局环境地质大队, 1991.
Environmental Geology Research Institute of Jiangxi Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. Investigation and Study on Groundwater Environmental Background Values in Key Areas of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River [R]. 1991.

[4] 何宝南, 何江涛, 孙继朝, 等. 区域地下水污染综合评价研究现状与建议 [J]. 地学前缘, 2022, 29 (3): 51 - 63.
He B N, He J T, Sun J C, et al. Comprehensive evaluation of regional groundwater pollution: research status and suggestions [J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29 (3): 51 - 63.

[5] 高迪, 潘国营, 钟福平, 等. 新乡市地下水化学背景值研究 [J]. 露天采矿技术, 2006 (4): 51 - 54.
Gao D, Pan G Y, Zhong F P, et al. Study of groundwater chemical background value in Xinxiang city [J]. Opencast Mining Technology, 2006 (4): 51 - 54.

[6] 刘左, 潘欢迎. 湖北省平原岗区地下水环境背景值初步研究 [J]. 安全与环境工程, 2023, 30 (3): 208 - 221.

Liu Z, Pan H Y. Preliminary study on groundwater environmental background value in plain area of Hubei Province [J]. Safety and Environmental Engineering, 2023, 30 (3): 208 - 221.

[7] 齐万秋, 周金龙. 石河子市地下水环境背景值 [J]. 干旱环境监测, 1994, 8 (1): 14 - 16.
Qiu W Q, Zhou J L. Environmental background values of the groundwater of Shihezi city [J]. Arid Environmental Monitoring, 1994, 8 (1): 14 - 16.

[8] 张英, 孙继朝, 黄冠星, 等. 珠江三角洲地区地下水环境背景值初步研究 [J]. 中国地质, 2011, 38 (1): 190 - 196.
Zhang Y, Sun J C, Huang G X, et al. A preliminary study of natural background levels of groundwater in the Zhujiang River Delta [J]. Geology in China, 2011, 38 (1): 190 - 196.

[9] 朱晓星. 泉州市沿海地区地下水锰环境背景值研究 [J]. 黑龙江环境通报, 2022, 35 (3): 17 - 22.
Zhu X X. Study on environmental background value of manganese in groundwater in Quanzhou coastal area [J]. Heilongjiang Huanjing Tongbao, 2022, 35 (3): 17 - 22.

[10] 曾颖. 秦皇岛柳江盆地浅层地下水常规组分背景值研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2015.
Zeng Y. Study on Natural Background Levels of Conventional Components in Shallow Groundwater of the Liujiang River Basin in Qinhuangdao [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.

[11] 张兆吉, 费宇红, 郭春艳, 等. 华北平原区域地下水污染评价 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42 (5): 1456 - 1461.
Zhang Z J, Fei Y H, Guo C Y, et al. Regional groundwater contamination assessment in the North China Plain [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42 (5): 1456 - 1461.

[12] Kim K H, Yun S T, Kim H K, et al. Determination of natural backgrounds and thresholds of nitrate in South Korean groundwater using model - based statistical approaches [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015, 148: 196 - 205.

[13] Preziosi E, Parrone D, Del Bon A, et al. Natural background level assessment in groundwaters: probability plot versus pre - selection method [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, 143: 43 - 53.

[14] Parrone D, Ghergo S, Preziosi E. A multi - method approach for the assessment of natural background levels in groundwater [J]. Science of the Total Environment, 2019, 659: 884 - 894.

[15] Lee L, Helsel D. Baseline models of trace elements in major aquifers of the United States [J]. Applied Geochemistry, 2005, 20 (8): 1560 - 1570.

[16] 方媛, 吴昊, 霍晨琛, 等. 石嘴山市浅层地下水的环境背景值 [J]. 环境化学, 2016, 35 (7): 1361 - 1371.
Fang Y, Wu H, Huo C C, et al. Environment background levels of phreatic water in Shizuishan [J]. Environmental Chemistry, 2016, 35 (7): 1361 - 1371.

- [17] 刘文波,冯翠娥,高存荣.河套平原地下水环境背景值[J].地质前缘,2014,21(4):147-157.
Liu W B, Feng C E, Gao C R. Background value of groundwater environment in Hetao Plain[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(4):147-157.
- [18] 耿婷婷,李颖智,张涛,等.西藏“一江三河”地区地下水环境背景值初步研究[J].地质与资源,2018,27(5):480-487.
Geng T T, Li Y Z, Zhang T, et al. Preliminary study on the environmental background values of groundwater in middle Yarlung Zangbo River Basin, Tibet[J]. Geology and Resources, 2018, 27(5):480-487.
- [19] 郭高轩,辛宝东,刘文臣,等.我国地下水环境背景值研究综述[J].水文地质工程地质,2010,37(2):95-98.
Guo G X, Xin B D, Liu W C, et al. Review on the study of the environment background values of groundwater in China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(2):95-98.
- [20] 邱汉学,黄巧珍.地下水环境背景值及其确定方法[J].青岛海洋大学学报,1994(S3):16-20.
Qiu H X, Huang Q Z. The concept of groundwater environment background and its determination[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1994(S3):16-20.
- [21] 赵云章,邵景力,崔亚莉,等.黄河悬河段影响带远景水源地可采资源评价[J].人民黄河,2003,25(5):22-24.
Zhao Y Z, Shao J L, Cui Y L, et al. Evaluation on long-term exploitable water resources of effected zone in suspended section of the Yellow River[J]. Yellow River, 2003, 25(5):22-24.
- [22] 孙跃.河南省沿黄地下水数值模拟及地下水资源评价[D].北京:中国地质大学(北京),2011.
Sun Y. The Study on Groundwater Numerical Simulation and Groundwater Resources Evaluation of the Area along the Yellow River in Henan Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.
- [23] 平建华,曹剑峰,苏小四,等.同位素技术在黄河下游河水侧渗影响范围研究中的应用[J].吉林大学学报:地球科学版,2004,34(3):399-404.
Ping J H, Cao J F, Su X S, et al. Application of isotopic technique in the research of the affected range of lateral seepage of the down-Yellow River water[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2004, 34(3):399-404.
- [24] 高燕燕.关中平原地下水化学成分时空演化规律及人体健康风险评价[D].西安:长安大学,2020.
Gao Y Y. Spatio-temporal Evolution of Hydrochemical Components and Human Health Risk Assessment of Groundwater in Guanzhong Plain[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [25] 河南省地质调查院.黄河下游河南段环境地质调查评价报告[R].2005.
Henan Geological Survey Institute. Environmental Geological Survey and Evaluation Report of the Lower Yellow River in Henan[R]. 2005.
- [26] 河南省地质调查院.黄河下游河南段地下水资源潜力调查评价报告[R].郑州:河南省地质调查院,2003.
Henan Institute of Geological Survey. Assessment of Groundwater Resource Potential of Downstream of the Yellow River in Henan[R]. Zhengzhou: Henan Institute of Geological Survey, 2003.
- [27] 中华人民共和国生态环境部. HJ 164—2020 地下水环境监测技术规范[S].北京:中国环境科学出版社,2021.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. HJ 164—2020 Technical Specifications for Environmental Monitoring of Groundwater[S]. Beijing: China Environment Press, 2021.
- [28] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 14848—2017 地下水质量标准[S].2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of PRC, Standardization Administration of PRC. GB/T 14848—2017 Standard for Groundwater Quality[S]. 2017.
- [29] 王瑞久.三线图解及其水文地质解释[J].工程勘察,1983(6):6-11.
Wang R J. Piper diagrams and its hydrogeological interpretation[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1983(6):6-11.
- [30] 沈照理,朱宛华,钟佐荣.水文地球化学基础[M].北京:地质出版社,1993.
Shen Z L, Zhu W H, Zhong Z S. Hydrogeochemical Fundamentals[M]. Beijing: Geological Press, 1993.
- [31] 王帅,任宇,郭红,等.河南黄河改道区浅层地下水化学特征与主控污染源解析[J].环境科学,2024,45(2):792-801.
Wang S, Ren Y, Guo H, et al. Chemical characteristics of shallow groundwater in the Yellow River diversion area of Henan Province and identification of main control pollution sources[J]. Environmental Science, 2024, 45(2):792-801.
- [32] 金银龙,陈昌杰,陈西平,等. GB 5749—2006 生活饮用水卫生标准[S].北京:中国标准出版社,2007.
Jin Y L, Chen C J, Chen X P, et al. GB 5749—2006 Standards for Drinking Water Quality[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [33] 王亚平,王岚,许春雪,等.长江水系水文地球化学特征及主要离子的化学成因[J].地质通报,2010,29(2/3):446-456.
Wang Y P, Wang L, Xu C X, et al. Hydro-geochemistry and genesis of major ions in the Yangtze River, China[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(2/3):446-456.
- [34] 孙龙,王莉莉,曹文庚.黄河下游影响带(河南段)水化学演化规律研究[J].人民黄河,2021,43(12):91-99.
Sun L, Wang L L, Cao W G. Evolution of groundwater hydrochemical characteristics in the influence zone of the lower Yellow River in Henan[J]. Yellow River, 2021, 43(12):91-99.

Analysis of groundwater environmental background values in the Yellow River lateral seepage impact zone in Henan Province

MA Mengke¹, MA Meng², GU Yu¹, BAI Xue³, HUANG Yonghui¹, CHEN Lei¹

(1. Prevention and Control Center for the Geological Disaster of Henan Geological Bureau, Zhengzhou Henan 450012, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Beijing Institute of Geo-Engineering, Beijing 100048, China)

Abstract: The groundwater environmental background value is an important basis for measuring whether the groundwater is polluted, and the groundwater environmental background value is an important yardstick for evaluating the sustainable development level of groundwater in this region. Five groundwater background value unit zonings were divided in this paper based on the hydrogeological and groundwater chemical characteristics of lateral seepage impact zone in the lower reaches of the Yellow River in Henan Province. The groundwater environmental background values and ranges of 8 groundwater chemical indicators in each zoning were calculated using mathematical and statistical methods. The results show that the groundwater background value of Zone IV in the Yellow River terrace is the lowest, while that of Zone I and Zone II on the southern bank of the Yellow River is lower. The background values of Zone V on the northern bank of the Yellow River and Zone III, where the Yellow River turns from east-west to south-west, are higher. The main groundwater types in the study area are $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+} \cdot \text{Na}^+$, $\text{HCO}_3^- - \text{Mg}^{2+} \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Na}^+$ and $\text{HCO}_3^- - \text{Mg}^{2+} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+}$ water. There are high background value areas for Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- , TDS and other indicators in the study area. The high background value area of Ca^{2+} and Mg^{2+} may be caused by mineral dissolution and cation exchange, and that of SO_4^{2-} and Cl^- may be caused by agricultural non-point source pollution. The high background value area of TDS is caused by strong evaporation and concentration in this area. The Gibbs diagram shows that the groundwater in this area is mainly affected by the weathering and dissolution of minerals in the original strata, and is also affected by partial evaporation and concentration. The water quality distribution law of the lateral seepage impact zone in the lower reaches of the Yellow River in Henan Province was identified, and the understanding of the formation and evolution mechanism of groundwater quality in this region was improved. The research results could provide important support for maintaining the sustainable development of regional groundwater.

Keywords: background value of groundwater; groundwater chemistry; mathematical and statistical methods; the Yellow River lateral seepage impact zone

(责任编辑: 王晗)