

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.303

引用格式: 张学庆,刘璐,孟素花,等. 1980—2023年黄河下游开封段浅层地下水水位演变趋势[J]. 中国地质调查, 2025, 12(4): 86–92. (Zhang X Q, Liu L, Meng S H, et al. Evolutionary trend of shallow groundwater level in Kaifeng section of the lower Yellow River from 1980 to 2023[J]. Geological Survey of China, 2025, 12(4): 86–92.)

# 1980—2023年黄河下游开封段浅层地下水水位演变趋势

张学庆<sup>1,2</sup>, 刘璐<sup>3</sup>, 孟素花<sup>1</sup>, 崔向向<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 河北省/中国地质调查局地下水污染机理与修复重点实验室, 河北 石家庄 050061; 3. 河北省地质环境监测院, 河北 石家庄 050021)

**摘要:** 黄河下游开封段悬河特征显著, 黄河侧渗与人类活动影响导致沿黄浅层地下水水位演变趋势不明, 影响因素复杂。系统梳理研究区内 1980—2023 年沿黄浅层地下水水位演变趋势, 并分析完整水文年内浅层地下水水位演变规律与主要影响因素。结果表明: 2010 年之前沿黄浅层地下水水位与降雨量呈显著正相关, 2010—2020 年浅层地下水水位明显下降, 主要受开采量大幅增加影响, 2020 年之后浅层地下水水位受强降雨与地下水压采影响, 水位呈波动上升趋势; 沿黄包气带岩性颗粒较粗, 雨水快速补给地下水, 导致雨季黄河大堤外侧浅层地下水水位回升显著, 而在灌溉期大堤外侧浅层地下水水位显著下降 3 m; 大堤内侧浅层地下水水位主要受黄河侧渗影响, 地下水水位波动与黄河水位波动大体一致; 基于  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$  稳定同位素, 自黄河河道至大堤外围, 黄河侧渗量从占地下水补给的 80% 以上逐渐减小到 50% 以下, 距离越远黄河侧渗影响越小。系统识别黄河下游浅层地下水水位演变趋势, 有助于提高地下水资源利用效率, 促进黄河下游生态保护与高质量发展。

**关键词:** 浅层地下水; 降雨; 侧渗; 地下水水位演变; 黄河下游

**中图分类号:** P345 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095–8706(2025)04–0086–07

## 0 引言

黄河进入华北平原后, 由于河床坡度变小, 流速急剧缓慢, 每年从中游输送下来的泥沙约 16 亿 t, 其中大约 25% 淤积在下游, 依靠人工大堤约束, 形成了地上悬河<sup>[1]</sup>。黄河下游游荡型河段河水位显著高于两岸的地下水位, 河水源源不断地侧渗补给两岸地下水<sup>[2–3]</sup>。黄河侧渗是黄河水对两岸地下水的持续作用力, 叠加降雨、开采等人类活动因素干扰, 导致沿黄浅层地下水水位演变趋势与影响机制不清, 是该区地下水研究的重点与难点<sup>[4–6]</sup>。

关于黄河下游沿黄地下水循环研究主要集中

在侧渗影响范围内, 小浪底水库建成初期, 赵云章等<sup>[7]</sup>、平建华等<sup>[8]</sup>基于地下水流场、氢氧同位素等手段, 针对沿黄地下水循环开展研究, 划定了黄河侧渗影响带, 刻画出小浪底水库运行初期黄河侧渗与地下水的关系, 为沿黄地下水循环研究提供了基础依据。近年来, 有关研究表明, 在小浪底水库长期运行造成主河道显著下切与沿黄浅层地下水水位持续下降的情况下, 现阶段黄河侧渗影响在典型悬河段有扩大趋势, 典型悬河段最大扩大大约 3 km<sup>[9–11]</sup>。

黄河下游开封段作为典型悬河段, 在小浪底水库于 2002 年运行后, 河道下切、地下水超采、地下水压采与人类活动导致本区域下垫面发生显著变

收稿日期: 2024–09–01; 修订日期: 2025–05–31。

基金项目: 中国地质调查局“黄河下游重要滩区湿地生态地质调查(编号: DD20221773–3)”及中国地质科学院“黄河下游浅层地下水位波动上升对水环境演变影响机制研究(编号: JKYZD202411)”项目联合资助。

第一作者简介: 张学庆(1984—), 男, 副研究员, 主要从事生态修复与生态地质研究工作。Email: zhangxueqing@mail.cgs.gov.cn。

通信作者简介: 崔向向(1986—), 女, 助理研究员, 主要从事生态修复与生态地质研究工作。Email: cuixiangxiang@mail.cgs.gov.cn。

化,需重新认识沿黄浅层地下水水位演变特征及主要影响因素。浅层地下水水位演变对水环境与水资源利用有着显著影响<sup>[12]</sup>,本研究基于在黄河开封段大堤内外布设的黄河水位—地下水位动态监测剖面,地下水统测成果与历史数据的总结,结合稳定同位素( $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ ),揭示典型悬河黄河下游开封段浅层地下水水位演变规律及主控因素,旨在为黄河下游沿黄地区合理供水提供科学依据,促进黄河下游生态环境保护和高质量发展。

## 1 研究区概况

研究区位于黄河下游开封段柳园口省级湿地保护区沿黄两岸,包含地下水长观孔与由 zk01—zk13 多个地下水水位动态监测孔构成的动态监测剖面 AA'(图 1)。整个地质历史发展过程中,研究区经历了一系列地质构造作用,特别是燕山期的构造运动,形成了较为复杂的断裂和褶皱构造基底。喜山后期,研究区一直处于长期的沉降运动中,因而堆积了巨厚的第四系松散岩类,为地下水赋存提供了先决条件。由于古黄河强烈的淤积和多次改道,致使研究区砂层分布面积广、颗粒较粗、厚度较大、结构松散,十分有利于地下水的分布和富集,地下水赋存条件较好。集中降雨的气象条件和研究区特有的地上悬河(黄河)都直接影响着地下水的运动规律。受到上游小浪底水库调水调沙的影响,河漫滩在每年 6—11 月会经历 2~3 次季节性水淹,每次持续 10~20 d。

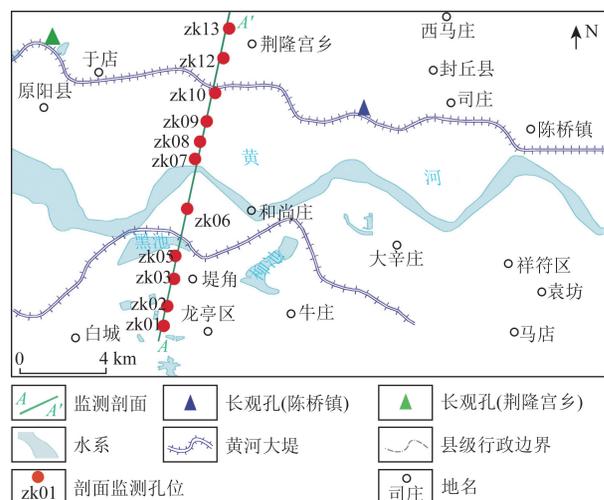


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

## 2 研究方法及样品分析

(1) 监测方法与数据来源。在黄河下游柳园口湿地滩区建立垂直于黄河的浅层地下水动态监测剖面 AA', 监测井深 20 m, 以第一砂层内的浅层地下水为监测目标, 布设在沿黄两岸大堤内外(图 1), 利用地下水水位自动监测仪(Diver)动态监测地下水水位变幅, 监测频率 1 d/次。黄河水位动态监测数据来源于黄河水利委员会(<http://www.yrcc.gov.cn/>), 监测频率 1 d/次。在包气带监测点附近设立小型雨量监测站监测降雨量。气象历史资料搜集于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。针对区内浅层地下水开展统测, 统测密度平均不低于 1 点/km<sup>2</sup>。

(2) 样品采集与测试。2022 年 9 月采集监测剖面 AA' 地下水样品与黄河水样品, 在降雨量较大的 7 月份采集降雨样品, 对比分析降雨与小浪底水库调水调沙对地下水的影响。浅层地下水采样前抽水洗井 180 min, 采集的所有样品均需用原水样清洗采样瓶 3 次, 采集 0.5 L 水样用于分析氘( $\delta^2\text{H}$ )、氧( $\delta^{18}\text{O}$ )及氚( $\delta^3\text{H}$ )同位素。样品测试在中国地质科学院水文地质环境地质研究所完成, 样品的采集、处理、分析测试均符合国家质量认证标准, 误差在允许范围内。

(3) 研究方法。采用 SPSS 25.0 软件进行相关性分析, 研究降雨量和开采量对地下水位埋深的影响程度。通过原位包气带三参数水分运移监测系统, 分析包气带水分在空间上的分布特征, 进一步研究降雨和包气带岩性结构对地下水补给和蒸发的影响。由于不同水体氢氧同位素存在差异, 通过二端元模型揭示黄河水以及大气降水对沿黄地下水的贡献率。

## 3 结果与讨论

### 3.1 浅层地下水水位演化趋势分析

对比分析区内 1980—2023 年两个地下水长观孔(位置如图 1 所示)的水位埋深、降雨量和 1999—2023 年地下水开采量统计数据(图 2)。并对两个阶段降雨、地下水开采与浅层地下水水位埋深的相关性进行分析, 结果如表 1 所示。

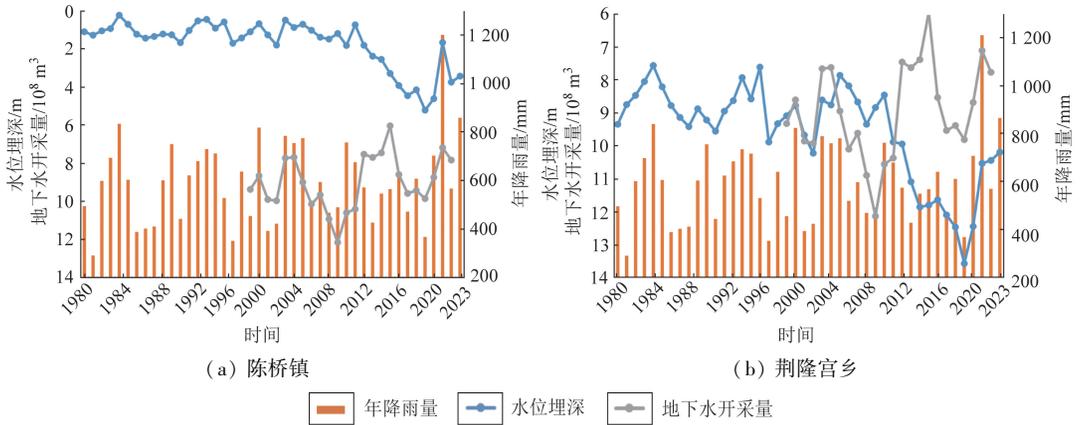


图 2 1980—2023 年研究区长观孔地下水水位埋深、年降雨量及地下水开采量变化

Fig. 2 Changes of the groundwater level depth, annual rainfall and quantity of groundwater withdrawal from 1980 to 2023 in the study area

表 1 研究区 1980—2023 年地下水水位埋深与年降雨量相关性分析

Tab. 1 Correlation analysis of groundwater level depth and annual rainfall from 1980 to 2023 in the study area

类型	1980—2010 年				2011—2023 年			
	年降雨量	荆隆宫乡埋深	陈桥镇埋深	地下水开采量	年降雨量	荆隆宫乡埋深	陈桥镇埋深	地下水开采量
年降雨量	1				1			
荆隆宫埋深	-0.57**	1			-0.39	1		
陈桥埋深	-0.60**	0.75**	1		-0.38	0.93**	1	
地下水开采量	-0.604*	0.20	0.65	1	-0.25	0.89*	0.92**	1

注：\* 在 0.05 级别相关性显著；\*\* 在 0.01 级别相关性显著。

总体上,1980—2010 年浅层地下水水位呈波动状态,2011—2019 年浅层地下水水位持续下降,2020—2023 年浅层地下水水位呈回升状态(图 2)。1980—2010 年,2 个长观孔地下水埋深与年降雨量均呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),地下水水位主要受降雨影响,陈桥镇长观孔地下水水位埋深与地下水开采量相关性大于荆隆宫乡长观孔,受开采影响相对较大。2011—2019 年,两个长观孔地下水水位急剧下降,与降雨量相关性不显著,均与地下水开采量成显著相关性,由于长期粗放式开采,破坏了地下水采补

平衡,地下水可持续开采利用受到威胁。2021 年降雨量为 1 215.4 mm,为研究区多年平均降雨量(1980—2023 年)的 2 倍,增加了地下水补给,同时地下水开采量减少,2 个长观孔水位分别回升 3.39 m 和 1.81 m。区内地下水水位受降雨及开采在内的多因素影响,研究区内浅层地下水水位止降回升,对当地生态环境有显著影响<sup>[13-14]</sup>。

利用区内 2020—2022 年低水位期浅层地下水水位统测数据与 1980—2020 年低水位期浅层地下水流场对比分析(图 3)。1980—2020 年区内浅层

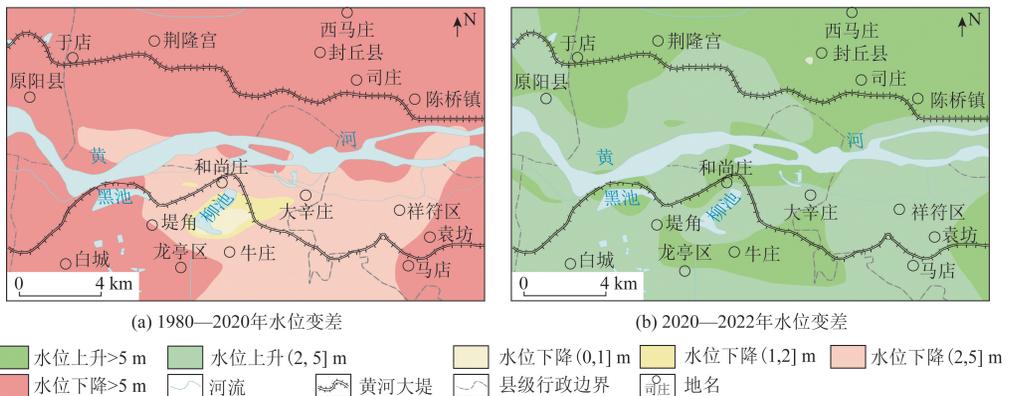


图 3 研究区 1980—2022 年浅层地下水水位变差

Fig. 3 Shallow groundwater level variation from 1980 to 2022 in the study area

地下水水位呈下降趋势,研究区内地下水水位普遍下降5 m以上,部分区域地下水水位下降2~5 m,农业灌溉的地下水超采是导致浅层地下水水位显著下降的主导因素。2020—2023年研究区内浅层地下水水位普遍回升,主要受2021年强降雨与地下水压采影响,浅层地下水水位有效止降回升有助于沿黄湿地(背河洼地型湿地)恢复、抑制土壤沙化,改善沿黄生态环境,但也需注意水位回升导致的土壤盐渍化与地下水水质问题<sup>[15-16]</sup>。

### 3.2 沿黄地下水水位周期变幅及影响因素

在地下水动态监测剖面AA'上,选取2022年的6期监测数据,分析剖面浅层地下水水位随时间、空间变化的特征,研究不同时间浅层地下水水位变化的主要影响因素(图4)。



图4 不同时期监测剖面AA'浅层地下水水位分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of shallow groundwater level in profile AA' in different periods

雨季(7月29日),监测剖面AA'显示,大堤外侧监测孔(zk01、zk02、zk03、zk10、zk12、zk13)地下水水位大幅度升高,大堤内侧监测孔(zk05、zk06、zk07、zk08)地下水水位无显著变化。其余日期地下水水位呈现距离黄河越远,地下水水位越低的特征,黄河水持续侧渗补给沿岸地下水。6月20日与11月30日为农灌期,集中大量抽取浅层地下水导致水位显著下降。距离黄河较近的zk05、zk06地下水水位一直维持在较高水平、变幅较小,主要受黄河侧渗影响。

整理监测剖面AA'相关的降雨、黄河水位等动态监测资料,选取黄河南岸监测孔,分析6—12月长时间序列条件下降雨、黄河水与浅层地下水演化特征(图5)。距离河道越近浅层地下水水位越高,监测孔zk06水位主要受黄河侧渗影响,随黄河水位变化,当黄河水位急剧下降后,浅层地下水水位高

于黄河水位,地下水短时间补给黄河水。其余监测孔7—8月受降雨与汛期黄河侧渗共同影响,浅层地下水水位升高;9—10月主要受黄河侧渗影响,浅层地下水水位比较平稳;11月冬小麦灌溉期间,大堤外侧监测孔zk01地下水水位下降3 m,停止灌溉后快速恢复。总体上,黄河侧渗持续补给沿岸浅层地下水。雨季,大堤外侧主要受降雨影响,灌溉期,沿黄两岸浅层地下水水位普遍显著下降,因此沿黄浅层地下水水位在不同时期主要影响因素贡献率不同<sup>[17-18]</sup>。

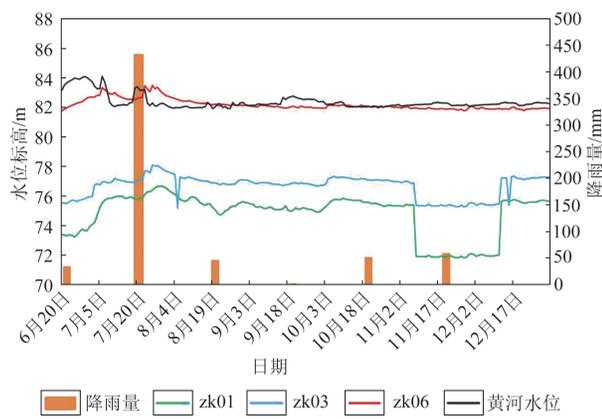


图5 黄河南岸降雨-黄河水-浅层地下水响应关系

Fig. 5 Rainfall - Yellow River water - shallow groundwater response relationship in the south shore of Yellow River

### 3.3 同位素水化学特征分析

同位素能反应沿黄浅层地下水的补给来源,掌握浅层地下水、黄河水、降雨的影响关系<sup>[19]</sup>。本文基于同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 质量守恒方程,利用采集的地下水水样、黄河水以及降雨的同位素数据,采用二端元模型进行地下水组成的判定(图6)。自黄河河道至大堤外围,黄河侧渗量从占浅层地下水补给的80%以上逐渐减小到50%以下,黄河水对浅层地下水补给的贡献逐渐减小,降雨贡献增加。在黄河两岸大堤内,浅层地下水中黄河水的占比大于60%,在大堤外侧的引黄区域,部分区域受引黄水体入渗影响,浅层地下水中黄河水的比重也较大。在远离黄河的浅层地下水中,黄河水的占比逐步小于50%,降雨的比重逐渐增大。

浅层地下水水位的变动是降雨和黄河水的综合影响效果。在离黄河较近的地区,黄河水位的变化对浅层地下水水位的变化直接影响较大,在离黄河较远的地方,降雨对地下水水位的影响增大<sup>[20-21]</sup>。

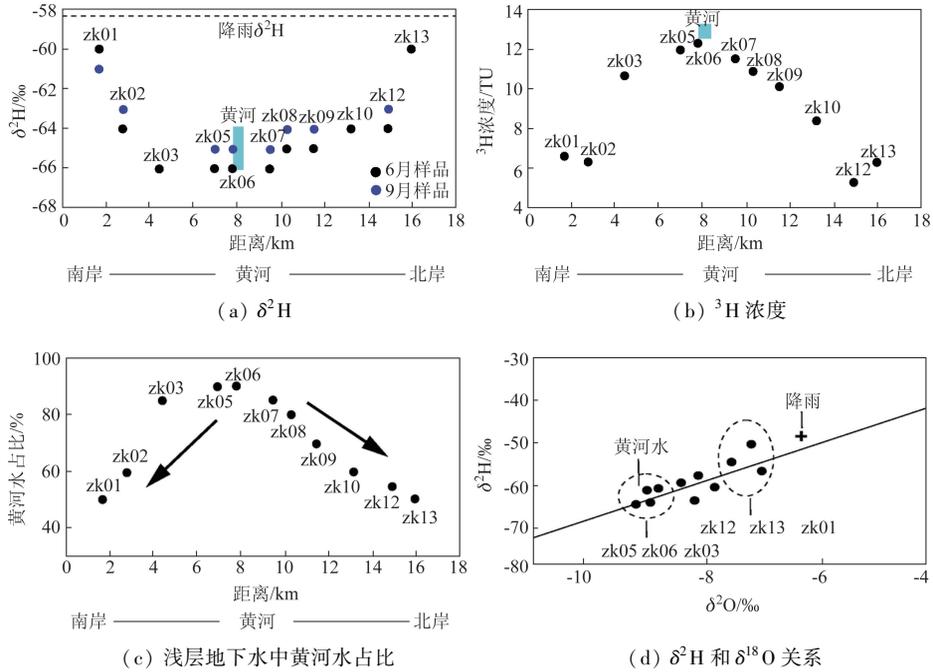


图 6 研究区降雨、黄河水与浅层地下水同位素变化特征解析

Fig. 6 Isotopic characteristics of rainfall, Yellow River water and shallow groundwater in the study area

黄河水位和流量主要受流域上降雨的影响<sup>[22]</sup>,尽管黄河下游水位主要受上级水库的控制,但水库的调水和降雨关系密切,因此,黄河下游区地下水水位变化的决定因素仍然是降雨,黄河水位只是降雨的衍生影响方式之一。

### 4 结论

(1)系统梳理研究区内 1980—2023 年来浅层地下水水位与降雨关系; 2010 年之前浅层地下水自然波动,主要受降雨影响; 2010—2020 年受地下水超采影响浅层地下水水位显著下降; 2020—2023 年研究区内浅层地下水水位普遍回升,主要受强降雨与地下水压采影响。

(2)沿黄浅层地下水持续受黄河侧渗补给,距离黄河较近的浅层地下水水位变幅较小; 雨季大堤外侧浅层地下水水位受降雨影响普遍回升,农业灌溉导致浅层地下水水位阶段性下降 3 m。因此,沿黄浅层地下水不同时期、距离黄河不同距离水位变化的主控因素不同,浅层地下水水位呈周期波动。

(3)稳定同位素  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^2\text{H}$  分析结果显示,自黄河河道至大堤外围,黄河侧渗量从占浅层地下水补给的 80% 以上逐渐减小到 50% 以下,距离越远,黄河侧渗影响越小。

### 参考文献 (References):

[1] 魏常兴, 刘海龄, 黄鼎成, 等. 黄河悬河的形成演化研究[J]. 水文地质工程地质, 2002, 29(1): 42-45.  
Wei C X, Liu H L, Huang D C, et al. Study on the formation and evolution of the hanging river of the Yellow River[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2002, 29(1): 42-45.

[2] 赵云章, 邵景力, 闫震鹏, 等. 黄河水对两侧地下水补给范围的初步研究[J]. 人民黄河, 2003, 25(1): 3-5.  
Zhao Y Z, Shao J L, Yan Z P, et al. Preliminary study on groundwater supply range on both sides of the Yellow River[J]. Yellow River, 2003, 25(1): 3-5.

[3] 张金良. 基于悬河特性的黄河下游生态水量探讨——“黄河下游滩区生态再造与治理研究”之三[J]. 人民黄河, 2018, 40(9): 1-4.  
Zhang J L. Study on ecological water volume of the Lower Yellow River based on perched-river characteristics: “Study on ecological reconstruction and management of the floodplains in the Lower Yellow River” (III)[J]. Yellow River, 2018, 40(9): 1-4.

[4] 刘昌明, 刘小莽, 田巍, 等. 黄河流域生态保护和高质量发展亟待解决缺水问题[J]. 人民黄河, 2020, 42(9): 6-9.  
Liu C M, Liu X M, Tian W, et al. Ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin urgently need to solve the water shortage problem[J]. Yellow River, 2020, 42(9): 6-9.

[5] 董战峰, 璩爱玉, 冀云卿. 高质量发展战略下黄河下游生态环境保护[J]. 科技导报, 2020, 38(14): 109-115.  
Dong Z F, Qu A Y, Ji Y Q. On ecological environment protection of Lower reaches of Yellow River with high-quality development

- strategy[J]. *Science & Technology Review*, 2020, 38(14): 109 – 115.
- [6] 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.
- [7] 赵云章, 邵景力, 焦红军, 等. 黄河下游影响带地下水库的基本特征[J]. *水利学报*, 2003, (4): 90 – 93, 100.  
Zhao Y Z, Shao J L, Jiao H J, et al. Basic characteristics of groundwater reservoirs of the affected zone along the Lower Yellow River in Henan province[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, (4): 90 – 93, 100.
- [8] 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, (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, (3): 399 – 404.
- [9] 苏晨, 张学庆, 费宇红, 等. 小浪底水库运行后黄河下游侧渗影响范围及对地下水环境的影响[J]. *中国地质*, 2021, 48(6): 1669 – 1680.  
Su C, Zhang X Q, Fei Y H, et al. Lateral seepage scope of downstream of Yellow River after the operation of Xiaolangdi reservoir and its impact on groundwater environment[J]. *Geology in China*, 2021, 48(6): 1669 – 1680.
- [10] 河南省水利厅. 1999—2023 河南省水资源公报[R]. 河南省水利厅, 1999 – 2023.  
Department of Water Resources of Henan Province. Henan water resource bulletin[R]. Department of Water Resources of Henan Province, 1999 – 2023.
- [11] 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.
- [12] 刘鑫, 左锐, 王金生, 等. 地下水位波动带三氮迁移转化过程研究进展[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(2): 27 – 36.  
Liu X, Zuo R, Wang J S, et al. Advances in researches on ammonia, nitrite and nitrate on migration and transformation in the groundwater level fluctuation zone[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(2): 27 – 36.
- [13] 刘鹏飞, 张光辉, 崔尚进, 等. 旱区湿地周边盐渍化农田生态水位阈值与“水位 – 水量”双控技术[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(5): 42 – 51.  
Liu P F, Zhang G H, Cui S J, et al. Threshold value of ecological water table and dual control technology of the water table and its quantity in the salinized farmland around wetland in arid areas[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(5): 42 – 51.
- [14] 聂洪峰, 肖春蕾, 戴蒙, 等. 生态地质调查工程进展与主要成果[J]. *中国地质调查*, 2021, 8(1): 1 – 12.  
Nie H F, Xiao C L, Dai M, et al. Progresses and main achievements of ecogeological survey project[J]. *Geological Survey of China*, 2021, 8(1): 1 – 12.
- [15] 刘建宇, 聂洪峰, 肖春蕾, 等. 2010—2018 年中国北方沙质荒漠化变化分析[J]. *中国地质调查*, 2021, 8(6): 25 – 34.  
Liu J Y, Nie H F, Xiao C L, et al. Evolution of sandy desertification in North China from 2010 to 2018[J]. *Geological Survey of China*, 2021, 8(6): 25 – 34.
- [16] 赵作章, 陈劲松, 彭尔瑞, 等. 土壤盐渍化及治理研究进展[J]. *中国农村水利水电*, 2023(6): 202 – 208.  
Zhao Z Z, Chen J S, Peng E R, et al. Research progress on soil salinization and management[J]. *China Rural Water and Hydro-power*, 2023(6): 202 – 208.
- [17] 万军伟, 王明珠, 刘志涛, 等. 引水补源工程对黛溪河流域地下水补给效果浅析[J]. *中国地质调查*, 2020, 7(6): 86 – 95.  
Wan J W, Wang M Z, Liu Z T, et al. Analysis of the effect of water diversion and source supplement project on groundwater recharge in Daixi River Basin[J]. *Geological Survey of China*, 2020, 7(6): 86 – 95.
- [18] 崔向向, 张学庆, 田夏, 等. 黄河下游典型悬河段地表水 – 地下水对湿地形成条件影响[J]. *水文*, 2024, 44(3): 30 – 35.  
Cui X X, Zhang X Q, Tian X, et al. The influence of surface water and groundwater on wetland conditions in the typical suspended river reach of the Lower Yellow River[J]. *Journal of China Hydrology*, 2024, 44(3): 30 – 35.
- [19] 何军, 肖攀, 彭轲, 等. 江汉平原西部浅层孔隙水水文地球化学特征[J]. *中国地质调查*, 2019, 6(5): 36 – 42.  
He J, Xiao P, Peng K, et al. Hydrogeochemical characteristics of the shallow pore water in western Jiangnan Plain[J]. *Geological Survey of China*, 2019, 6(5): 36 – 42.
- [20] 刘久潭, 李颖智, 高宗军, 等. 拉萨河流域中下游地区水化学及地表水 – 地下水转化关系研究[J]. *山东科技大学学报: 自然科学版*, 2020, 39(5): 10 – 20.  
Liu J T, Li Y Z, Gao Z J, et al. Hydrochemistry and relationship between groundwater and surface water in the Middle and Lower reaches of Lhasa river Basin[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2020, 39(5): 10 – 20.
- [21] 李刚, 马佰衡, 周仰效, 等. 白洋淀湖岸带地表水与地下水垂向交换研究[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(4): 48 – 54.  
Li G, Ma B H, Zhou Y X, et al. A study of vertical exchange between surface water and groundwater around the banks of Baiyangdian Lake[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(4): 48 – 54.
- [22] 鲍怡, 胡春春, 王喆, 等. 近十年黄河流域地表水面积时空变化与影响因素分析[J]. *水文*, 2024, 44(5): 92 – 98.  
Bao Y, Hu C C, Wang Z, et al. Spatial – temporal changes and influencing factors of surface water in the Yellow River Basin in recent 10 years[J]. *Journal of China Hydrology*, 2024, 44(5): 92 – 98.

## Evolutionary trend of shallow groundwater level in Kaifeng section of the lower Yellow River from 1980 to 2023

ZHANG Xueqing<sup>1,2</sup>, LIU Lu<sup>3</sup>, MENG Suhua<sup>1</sup>, CUI Xiangxiang<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang Hebei 050061, China*; 2. *Key Laboratory of Groundwater Contamination and Remediation, Hebei Province & China Geological Survey, Shijiazhuang Hebei 050061, China*; 3. *Geo-Environmental Monitoring Institute of Hebei Province, Shijiazhuang Hebei 050021, China*)

**Abstract:** Kaifeng section in the lower Yellow River exhibits obvious characteristics of a suspended river. The Yellow River lateral seepage and anthropogenic activities have contributed to ambiguous groundwater level trends and complex influencing factors. The 40-year evolution patterns of shallow groundwater levels along the Yellow River in the study area were systematically examined, and intra-annual hydrological dynamics and primary driving mechanisms were analyzed. The results showed that shallow groundwater level along the Yellow River was significantly positively correlated with rainfall before 2010, and the groundwater level decreased significantly from 2010 to 2020, mainly due to a significant increase in extraction. And the shallow groundwater level showed a fluctuating upward trend after 2020, due to the influence of heavy rainfall and groundwater exploitation reduction. The lithology of the vadose zone along the Yellow River is coarse, and rainwater quickly replenishes the groundwater, resulting in a significant rise in shallow groundwater level outside the Yellow River embankment during the rainy season. While shallow groundwater level outside the Yellow River embankment drops significantly by 3 m during the irrigation period. Shallow groundwater level on the inner side of the embankment is mainly affected by the lateral seepage of the Yellow River, and the fluctuation of the groundwater level is generally consistent with the fluctuation of the Yellow River water level. Based on the stable isotopes of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^2\text{H}$ , the lateral seepage of the Yellow River from the river channel to the outer edge of the embankment gradually decreases from more than 80% to less than 50% of the groundwater recharge, and the influence of the lateral seepage of the Yellow River decreases with distance. This paper systematically identifies the evolutionary trend of shallow groundwater level in the lower reaches of the Yellow River, which is helpful to improve the utilization efficiency of groundwater resources, and promote the ecological protection and high-quality development of the lower reaches of the Yellow River.

**Keywords:** shallow groundwater; rainfall; lateral seepage; evolutionary trend of groundwater level; lower Yellow River

(责任编辑: 王晗)