

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20220673

黄河下游大堤外侧地下水涌水机制研究

张学庆^{1,2}, 苏 晨¹, 刘 璐³, 孟素花^{1,2}, 崔向向^{1,2}

(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 050061)

摘要: 针对黄河下游艾山段秋汛期间大堤外侧水井涌水现象, 整理研究区内的地下水位动态监测资料与地下水位统测资料, 采集相关水样, 结合黄河径流与当地降雨情况, 综合分析研究区内第四系孔隙水井涌水机制。通过地下水位统测查明, 持续高强度的降雨造成区域水位平均抬升幅度达 3 m 以上, 减少了地下水的径流排泄量, 是水井涌水的基础原因; 黄河下游艾山段秋汛期间持续高水位运行, 导致黄河水强烈补给地下水, 是造成水井涌水的直接原因; 经分析, 黄河下游艾山段的水井涌水警戒水位为 39.5 m, 持续高水位(39.5 m 及以上)运行导致水头压力显著增加, 进而使大堤外侧水井涌水; 涌水范围在大堤外侧 500 m 内。该研究阐明了黄河大堤外侧地下水的涌水机制, 为预防黄河下游大堤外侧水井涌水, 汛期提前排查涌水隐患提供了依据, 有助于黄河下游大堤安全防护。

关键词: 黄河下游; 大堤外侧; 地下水涌水; 机制

中图分类号: TV213.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)02-0207-04

1 概况

东阿县位于黄河下游, 黄河自西南向东北穿越该区。黄河以北主要为黄河冲积平原区, 地势开阔, 微向东北缓倾, 地层上部主要分布孔隙含水岩组, 含水层厚度一般在 5 m 左右, 局部大于 10 m, 底板埋深一般在 20~120 m, 地下水具有潜水一微承压水性质, 流动方向主要以黄河为中心, 向北流动。孔隙含水层是北岸地下水的主要利用层位, 岩溶含水层隐伏在孔隙含水层下, 二者之间隔有 10 m 以上粘土层, 无显著水力联系(图 1)^[1]。黄河南岸由山前平原过渡为丘陵区, 主要分布碳酸盐岩类岩溶含水岩组, 广泛出露, 可接受大气降水的直接补给, 地下水的流动方向自西南向东北方向流动, 地下水在接受补给后流至北岸的隐伏区内。黄河作为研究区内最大的河流, 河床高出地面, 为地上河; 黄河大堤距离主河道 1 km, 将黄河束缚在大堤内, 防止发生洪水淹没周边的情况; 但汛期较高的水位增加了对两岸地下水的补给强

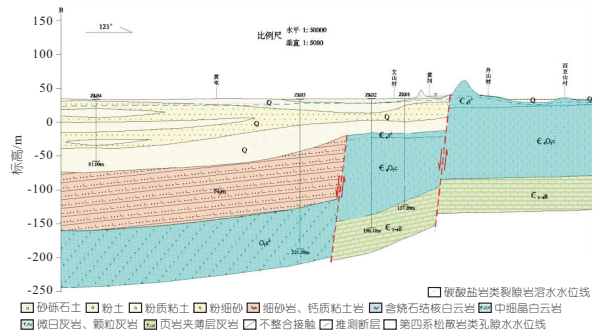


图 1 研究区剖面图
Fig. 1 Hydrogeological profile of study area

度, 在大堤外侧多处地下水井发生涌水自流现象, 给当地农业造成损失。因此, 亟需掌握地下水井的涌水机制, 为黄河下游区大堤安全、生态环境可持续发展 and 高质量发展提供基础依据。水井涌水是地下水循环的一个环节。目前广泛借助水化学和同位素信息, 并结合地下水动力场特征, 掌握区域和局部的地下水循环特征, 以及地下水一地表水一大气降水的转换过程等^[2]。因此, 本文以黄河下游艾山水文站的黄河水及水文站以西的孔隙水为研究载体, 分析研究区水文和气象条件, 借助

收稿日期: 2022-04-06, 修回日期: 2022-05-10

基金项目: 国家地质调查项目(DD20190335, DD20221773); 河北省自然科学基金项目(D2020504001); 中央级公益性科研院所基本科研业务项目(SK202112)

作者简介: 张学庆(1984-), 男, 博士、副研究员, 研究方向为水文地质与水资源调查, E-mail: zhangxueqing@mail. cgs. gov. cn

通讯作者: 苏晨(1985-), 男, 博士、副研究员, 研究方向为地下水同位素, E-mail: sc. 1219@163. com

地下水动力学、黄河水和沿岸地下水的同位素和水化学信息,揭示黄河下游艾山段大堤外侧地下水涌水机制与主控因素,旨在为治理黄河下游沿岸水井涌水提供依据。

2 研究方法及样品分析

搜集研究区内艾山水文站近年来黄河水位资料,地下水位数据源于项目设置的 3 眼孔隙水井的长期动态监测数据。所有数据均进行了识别和验证,排除了个别异常点。统测 2021 年 6 月 1~13 日、10 月 8~15 日研究区的地下水位;针对水井涌水现象,2021 年 10 月 10 日在东阿县沿黄区共采集黄河水样品 5 组,所有样品均进行了水体的²H、¹⁸O、³H 同位素测试,在中国地质科学院水文地质环境地质研究所完成测试。统测点、动态观测点与样品采集点分布见图 2。

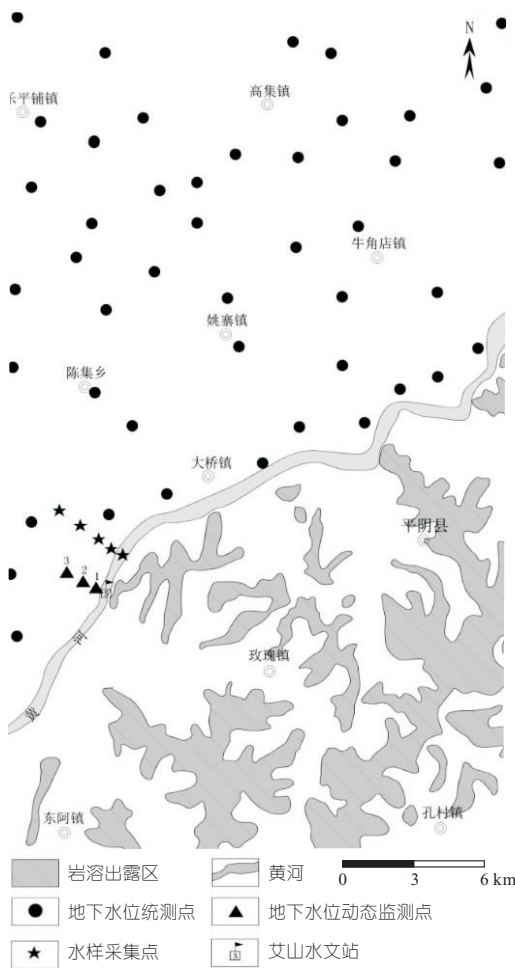


图 2 地下水统测点位置及采样点分布
Fig. 2 Study area and sampled sites

2.1 地下水动力场分析

两期地下水位统测时间分别为 2021 年 6、10 月,均在 15 d 内完成,地下水位点的测量均源于

浅层井,能够较准确地刻画黄河侧渗对地下水流场的影响特征。同时在艾山水文站大堤外侧建立针对第四系孔隙水位的监测点,结合艾山水文站的黄河水位监测数据,建立地表水位与孔隙水位的动态监测体系,同时搜集区内逐月降雨量数据,以分析地表水与地下水的联系。

2.2 水化学同位素样品的采集和分析

样品采集主要原则为:①孔隙水样主要沿地下水的流动方向采集,以便真实地反映黄河的影响特征;②样品涵盖黄河地表水样品。

3 结果与分析

3.1 黄河水位与降雨量的关系

1989~2020 年 1~10 月平均累计降雨量、2020 年与 2021 年 1~10 月累计降雨量分布特征见图 3。2021 年 6 月东阿县降雨量显著高于 2020 年与历史同期平均数据,其中 2021 年 9 月降雨量尤其偏大。

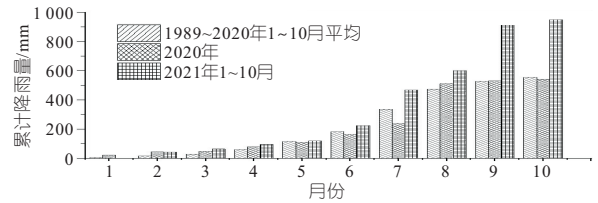


图 3 不同年份东阿累计月降雨量

Fig. 3 Accumulated monthly rainfall of different years at Donge

图 4 为 2008~2021 年 8~10 月黄河水位。由图 4 可看出,2021 年黄河下游艾山段伏汛(7~8 月)水位总体低于历史同期水平,但进入秋汛(9~10 月)后水位迅速增高,持续高水位运行,最高达 40.49 m。2021 年黄河下游秋汛迅猛,与 8 月下旬开始黄河中下游降雨量显著增加有关^[3]。

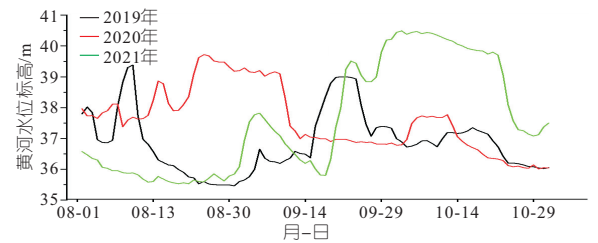


图 4 2018~2021 年 8~10 月黄河水位

Fig. 4 The Yellow River water levels during august to october 2018-2021

黄河下游艾山水文站水位监测数据表明,与本年伏汛期水位对比增加了近 5 m,与历史秋汛对比增加了 1.0~3.5 m,水位的升高增强了黄河水向沿岸含水层补给的动能;高水位运行期河水

淹没大堤内滩地(林地与农田),增大了对沿岸地下水的补给范围,并且大堤内沉积物主要为黄河粉细砂,渗透性强,可快速补给沿岸浅层地下水^[4],这增加了黄河侧渗对地下水的补给强度。

3.2 地下水位与黄河水位的关系

(1)地下水流动特征及其受黄河影响。基于 2021 年 6、10 月的地下水位统测数据,刻画了研究区地下水流动与水位埋深及水位的变化(图 5)。受黄河水补给的影响,黄河北岸地下水往西北方向流动,区内地下水位埋深在 0~4 m。受区内降雨量增加、开采量减少影响,区域内整体地下水位显著上升,平均上升 3 m 以上,在大桥镇、姚寨镇和高集镇水位上升幅度超过 5 m;黄河大堤外侧 1 000 m 范围为黄河侧渗强影响带,地下水位上升达 5 m,部分地区出现地下水自流现象。地下水位埋深小于 2 m 的地区与水位上升值大的区域分布一致,说明该地段水文地质条件更利于黄河水侧渗补给。黄河持续高水位运行侧渗量增加,但由于研究区内整体地下水位抬升显著,导致大堤外侧地下水无法顺利排泄到下游,从而造成地下水位自流现象。

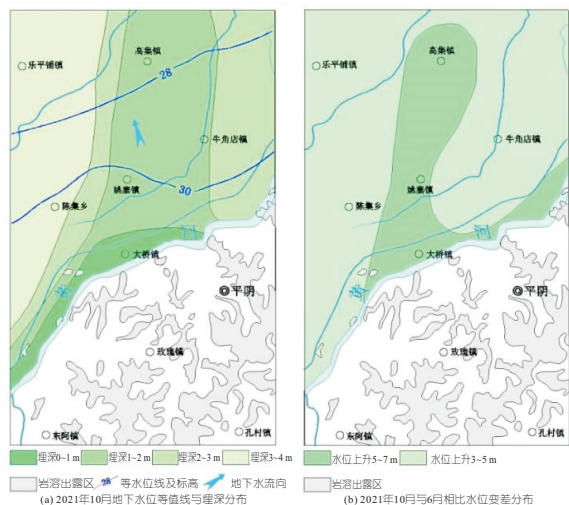


图 5 研究区地下水流动特征和埋深分布

Fig. 5 Flow direction and depth of groundwater in the study area

(2)地下水位与黄河水位的变化关系。选取布设在大堤外侧的 3 眼动态监测井(202101、202102、202103),结合地表水数据(2021DB),并与 2020 年[#]3 井(202003)监测数据进行对比,分析地下水位受黄河水位影响的规律,结果见图 6。由图 6 可知,[#]1~[#]3 监测井水位与黄河水位呈显著正相关性,当黄河水位发生显著升高或降低后,地下水位有一个显著的上升与下降过程,滞后时间非常短,表明黄河入渗补给地下水的通道畅

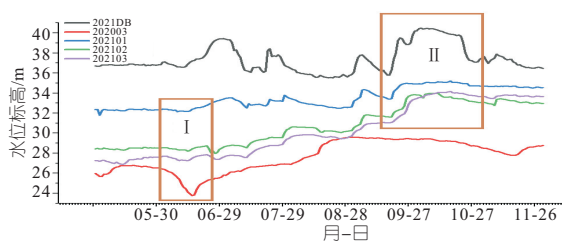


图 6 黄河、孔隙水水位变化关系图

Fig. 6 Diagram of variation of water level between Yellow River and pore water

通。在图 6 中标注的 I 区,2020 年[#]3 监测井在 6 月显著降低,是由于农业灌溉所致,而 2021 年地下水位未显著降低,表明由于降水量增加,研究区没有进行农灌;在 I 区过渡到 II 区期间,[#]2、[#]3 井水位持续升高且抬升幅度显著高于[#]1 井,即受到区域水位整体抬升影响,也受到黄河侧渗影响;在 II 区内,[#]1 井发生涌水现象并持续十几天,当黄河水位持续高于 39.5 m 时,[#]1 井地下水位达到临界涌水,[#]1 井距离大堤约 500 m,[#]2 井并未发生涌水,因此大堤外 500 m 为涌水易发范围。黄河水位下降后涌水现象消失,但 3 眼监测井仍高水位运行,表明区域地下水排泄途径较少。

3.3 水化学和同位素显示的黄河补给过程

东阿沿黄区,黄河影响带的范围约 15 km,该范围内黄河水对地下水的补给明显,黄河水和沿岸地下水有密切的水力联系^[5]。在涌水期,沿垂直黄河方向采集黄河水和 3 km 内的 4 组地下水样品。从地下水和黄河水的氡同位素信息(图 7)可知,沿岸地下水的氡同位素和黄河水的氡同位素接近,自黄河至远离黄河的方向,地下水氡含量仅略微减小。该范围内,在涌水发生前,地下水的氡含量显著小于黄河水,涌水后地下水氡含量和黄河水的差异减小,反映出黄河水对近岸地下水的补给强度增大,地下水的循环更新能力增强。从样品点的 TDS 也可看出,近岸地下水的 TDS 与黄河水接近,反映出黄河水对近岸含水层的强烈补给过程。

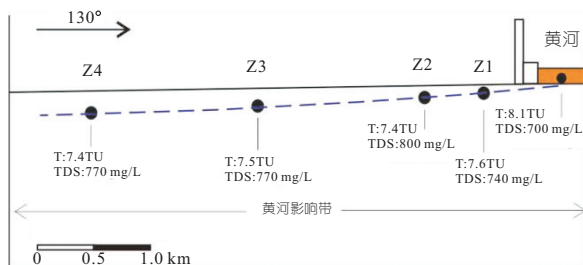


图 7 水化学—同位素分布特征

Fig. 7 Characteristics of water chemistry and isotope distribution

4 结 论

a. 黄河下游东阿段 2021 年 6~10 月降雨量显著增加,使黄河水和区域地下水均显著增大,导致黄河侧渗的地下水排泄不畅,是造成黄河大堤外侧水井涌水的基础原因。

b. 当黄河持续高水位运行时,最高达 41.5 m,对地下水的补给强度增加,黄河水入渗补给含水层,再通过井口排泄,是造成水井涌水的直接原因。

c. 从水文地质角度出发,综合孔隙水井涌水特征,考虑黄河水位达到 39.5 m 时作为水井涌水的警戒水位。届时需加强对大堤外侧 500 m 范围内井孔的监测,尤其是发生过涌水的水井,建议强化成井材料质量,预防因井管破损造成的涌

沙,如有必要可实施封填井口的防范措施。

参 考 文 献:

[1] 苏晨,张学庆,田夏,等. 东阿县沿黄区孔隙地下水化学特征及成因分析[J]. 水电能源科学,2022,40(2):61-65,74.

[2] 王广昊,张莹,徐亮亮,等. 衢江流域地表水与地下水的转化关系[J]. 科学技术与工程,2021,21(15):6165-6174.

[3] 毕经涛. 不退,不退——聊城黄河河务局鏖战 2021 年黄河中下游秋汛洪水纪实[J]. 黄河. 黄土. 黄种人,2022(1):38-41.

[4] 雷万达,罗玉峰,缴锡云. 黄河下游侧渗研究进展[J]. 人民黄河,2009,31(1):61-64.

[5] 李清平,崔玉兰. 黄河侧渗补给浅层地下水试验研究[J]. 水文,2004,24(2):26-30.

Mechanism of Groundwater Gushing Outside the Dike of the Lower Reaches of the Yellow River

ZHANG Xue-qing^{1,2}, SU Chen¹, LIU Lu³, MENG Su-hua^{1,2}, CUI Xiang-xiang^{1,2}

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China; 2. Key Laboratory of Groundwater Remediation of Hebei Province, Shijiazhuang 050061, China; 3. Geo-Environmental Monitoring Institute of Hebei Province, Shijiazhuang 050011, China)

Abstract: This study analyzed the mechanism of groundwater gushing from Quaternary boreholes at Aishan section of the lower reaches of the Yellow River in autumn floods. Groundwater level analysis, meteorological analysis, runoff analysis of the Yellow River, combined with isotopic analysis of groundwater and surface water samples were used. The results show that the average groundwater level was increased more than 3 m, which reduced the groundwater runoff. The increase of groundwater level was the basic factor of groundwater gusher. Continuous high water level of the Yellow River and the intensive water replenishment of the Yellow River to groundwater directly led to the groundwater gushing. The warning groundwater level of wells near Aishan section of the lower reaches of the Yellow River was 39.5 m within the 500 m outside the dike. This paper provides a basic understanding for preventing groundwater gushing from wells outside the levee of the Yellow River, and it is helpful for the protection of the levee of the Yellow River.

Key words: the lower reaches of the Yellow River; outside of the dike; groundwater gushing; mechanism

(上接第 73 页)

Application of HSPF Model in Flood Forecasting of Lushui Basin

MO Jun-cheng¹, HUANG Chun-fu^{2,3}, YANG Jia-liang¹, LONG Yuan-nan^{2,3}

(1. Hunan Water Resources & Hydropower Survey, Design, Planning and Research Co., Ltd., Changsha 410007, China; 2. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha 410114, China)

Abstract: In recent years, rainstorm and flood disasters occur frequently in the basin. Accurate and reliable flood forecasting is an important measure to effectively prevent and resist mountain torrents. Taking Lushui basin as the research area, this paper constructed the HSPF semi-distributed model. Choosing the representative floods in the flood data of the basin from 2013 to 2020, the calibration and verification of the model parameters were carried out. The accuracy of flood simulation was evaluated by using indexes of certainty coefficient and relative error. The results show that the model has a good performance in the field flood simulation of Lushui basin. The qualified rates of peak time and peak discharge of 15 flood simulations are 100.0% and 80.0%, respectively, the qualified rates of flood volume and runoff depth are 93.3%, and the average value of certainty coefficient is 0.80. The overall prediction accuracy reaches class B, indicating that the HSPF flood prediction model has good applicability in Lushui basin. The research results can provide basis for flood forecasting in this area.

Key words: HSPF model; semi-distributed hydrological model; Lushui Basin; flood