

马若绮, 陈飞, 程冠乔, 等. 京杭大运河全线贯通补水对地下水回补的影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(3): 462-472.
MA R Q, CHEN F, CHENG G Q, et al. Effect of ecological water replenishment on groundwater recharge in the Beijing-Hangzhou Grand Canal[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(3): 462-472. (in Chinese)

京杭大运河全线贯通补水对地下水回补的影响

马若绮^{1,2,3}, 陈飞¹, 程冠乔⁴, 史文龙¹, 张雷⁵

(1. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120; 2. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871;
3. 教育部水沙科学重点实验室, 北京 100871; 4. 天津市中水科技咨询有限责任公司, 天津 300170;
5. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要: 基于 2022—2023 年京杭大运河(小运河、卫运河、南运河、北运河、通惠河)全线贯通补水期间沿线 419 眼浅井和 173 眼深井地下水水位监测数据, 分析实施生态补水后河道的入渗水量以及河道沿线和灌溉水源置换区的地下水水位变化。结果表明: 相较小运河、北运河和通惠河等衬砌河道, 卫运河和南运河渗透性较好, 地下水回补效果更为显著; 贯通补水后大运河河道周边 0~10 km 范围内浅层地下水水位较去年同期回升 0.48 m, 3—5 月春灌期取水过程中大运河沿线地下水水位下降幅度减少了 0.19 m, 表明生态补水对地下水水位恢复具有积极作用; 河道周边地下水水位对生态补水过程的响应有滞后, 表现为距离河道越近, 水位下降幅度越小; 水源置换能够有效缓解因灌溉取水导致的水位下降, 卫运河和南运河段农灌受水区深、浅层地下水水位较去年同期分别回升 3.17 m 和 0.27 m。重点对入渗性强、灌溉需水量高的河段持续实施生态补水, 保证河道水量, 能够更为有效地促进地下水水位回升。

关键词: 生态补水; 京杭大运河; 入渗强度; 地下水水位; 水源置换; 灌溉取水

中图分类号: TV213.4; X143 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0048

京杭大运河作为世界上距离最长、规模最大的
人工运河^[1], 纵贯海河、黄河、淮河、长江和钱塘江
五大水系, 具有防洪排涝、输水供水、内河航运、生
态造景等重要功能^[2-3], 其黄河以北河段主要位于海
河流域, 流域内资源性缺水问题严重, 人均水资源
量仅为全国平均水平的 1/7^[4-5]。20 世纪 80 年代以
来, 受气候变化和人类活动影响, 海河流域水资源
呈衰减趋势, 水资源供需矛盾日益突出, 地下水超
采问题严重^[6-7]。大运河黄河以北河段长期处于断
流状态并产生了河湖水面萎缩、地下水水位下降、地
下水污染等一系列生态环境问题^[8]。

生态补水是利用工程措施从流域外或利用当地
其他水源(如本地水库水、城市再生水等)引入水质
较好的水体, 缓解受水区水资源短缺、涵养地下水
资源、恢复水生态环境的重要措施^[9-10]。华北地区
自 2018 年实施河湖生态补水, 截止到 2022 年底, 累
计补水 240.45 亿 m³, 入渗回补地下水 102.2 亿 m³, 有
效促进了补水河道周边地下水水位回升^[11]。2022 年,

利用南水北调东线一期北延应急工程、潘庄引黄工
程、岳城水库、密云水库等多水源, 首次为京杭大运
河黄河以北河段生态补水 8.4 亿 m³, 置换沿线约
5.31 万 hm² 耕地地下水灌溉用水, 压减深层地下水
开采量 0.66 亿 m³, 入渗回补地下水 2.59 亿 m³^[12],
在河湖生态环境复苏及地下水超采治理方面均取
得了显著成效。

地下水动态变化是评估短时间内生态补水效
果最直观的指标, 河道补水后沿岸地下水水位产生
的波动能够有效反映生态补水的效果及影响范围^[13]。
现有研究对京杭大运河生态补水效果评估主要集
中在补水量、河道贯通时长、有水河长及水面面积
等方面^[12], 对沿线地下水水位变化定量分析尚不充
分, 缺乏年际变化讨论, 因此有必要深入探究连续
实施生态补水后大运河不同河段、不同范围内地下
水位的动态变化, 科学全面评价大运河补水效果。

实施京杭大运河全线贯通补水是充分发挥南水
北调工程综合效益, 推进华北地区河湖生态环境复

收稿日期: 2024-02-22 修回日期: 2024-04-11 网络出版时间: 2024-05-29

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240527.0923.007>

基金项目: 水利部青年人才发展资助项目“京杭大运河贯通补水效果跟踪分析与补水模式优化研究”

作者简介: 马若绮(1995—), 女, 河南郑州人, 工程师, 博士, 主要从事地下水环境及资源管理研究。E-mail: ruoqima@pku.edu.cn

苏和地下水超采综合治理的重要举措。本研究通过分析京杭大运河实施贯通补水后河道入渗补给、河道周边及农业灌溉水源置区地下水位年内及年际变化,探究生态补水过程对大运河沿线地下水回补效果,为进一步优化完善河湖生态补水方案提供理论依据。

1 研究区概况

京杭大运河黄河以北河段为主要贯通补水线路,北起北京市东便门,经通惠河、北运河至天津市三岔河口,南起山东省聊城市东线一期穿黄出口闸,经小运河、卫运河、南运河至天津市三岔河口,全长 707 km,涉及北京、天津、河北和山东 4 省市,流经 8 个地级行政区,沿线省市年均降水量在 520.8~673.0 mm^[14-15]。

根据《京杭大运河 2023 年全线贯通补水水文监测与评估方案》,地下水位监测以国家地下水监测工程(一期)建设的地下水自动监测站(水利部国家站)为主,省(直辖市)现有地下水自动监测站(省级)及相关部门监测站点为补充,共布设浅层地下水自动监测站 419 处,深层地下水自动监测站 173 处,位于不同河段周边同一范围或不同范围的监测站点数量,在各河段地下水位变化分析中重复计算。

京杭大运河补水河道两侧布设地下水自动监测站 379 处 [表 1 和图 1(a)],其中,位于河道中心线两侧各 10 km 区域内监测站 243 处,用于跟踪评价补水沿线浅层地下水位变化情况;位于 10 km 河道中心线两侧区域以外监测站 192 处,用于对比分析未受大运河贯通补水区域浅层地下水位变化情况。在大运河沿线农业水源置换受水区设置浅层地下水监测站 116 处、深层地下水监测站 173 处 [表 2 和图 1(b)],用于分析从大运河及补水沿线取用水的受水区地下水位变化情况。

表 1 京杭大运河黄河以北河段地下水位监测点位信息
Tab. 1 Location information of groundwater level monitoring site in the Beijing-Hangzhou Grand Canal in the north reach of the Yellow River

监测河段	河长/km	河道周边监测站点数量/个				合计
		0~≤2 km	>2~≤5 km	>5~≤10 km	>10 km	
通惠河	20.4	4	9	33	24	70
北运河	142.0	11	27	29	38	105
南运河	103.3	19	12	39	83	153
卫运河	94.0	3	11	22	13	49
小运河	347.2	3	8	13	34	58
合计	706.9	39	67	109	192	379

注:由于位于不同河段周边同一范围或不同范围的监测站点,在各河段地下水位变化分析中重复计算,表中合计为扣除重复计算后的净监测井数。

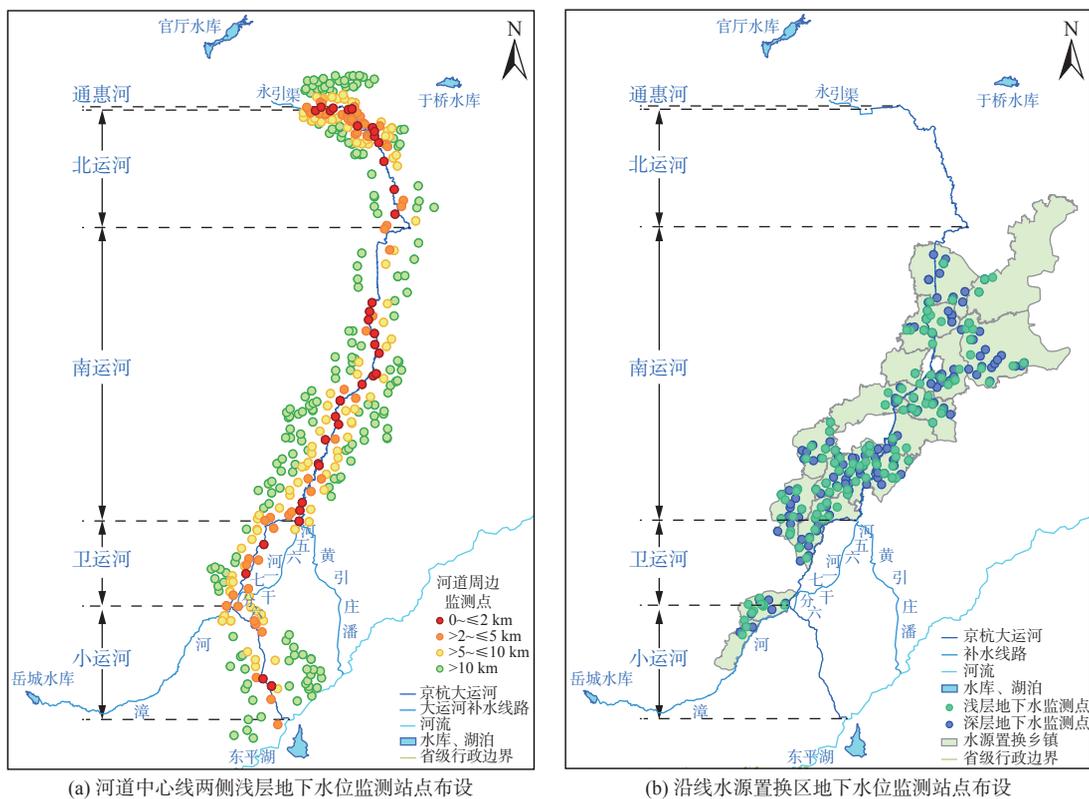


图 1 京杭大运河地下水位监测点分布

Fig. 1 Map of sampling sites distribution in the Beijing-Hangzhou Grand Canal

表 2 京杭大运河沿线水源置换区地下水位监测点位信息

Tab. 2 Location information of groundwater level monitoring site in water source replacement areas along the Beijing-Hangzhou Grand Canal

水源置换受水区	面积/km ²	区域内监测点位数/个		
		浅层地下水	深层承压水	
天津市	滨海新区	89	3	4
	静海区	578	2	16
衡水市	故城县	643	11	14
	景县	1 029	19	28
	武邑县	414	7	11
	枣强县	648	9	13
	泊头市	386	6	6
沧州市	青县	789	10	16
	沧县	578	8	9
	南皮县	630	10	11
	东光县	239	3	5
	吴桥县	466	8	12
邢台市	黄骅市	1 419	9	18
邢台市	临西县	479	8	7
邯郸市	馆陶县	128	3	3
合计	8 515	116	173	

2023 年京杭大运河全线贯通补水过程中, 南水北调东线一期北延应急工程、潘庄引黄工程、引滦工程、官厅水库和再生水等水源自 3 月 1 日开始补水, 补水时长 91 天; 岳城水库自 4 月 1 日开始补水, 补水时长 60 天。地下水埋深(水位)选择 2023 年 3 月 1 日(补水前)和 2023 年 5 月 31 日(补水后)数据; 此外选择 2022 年 5 月 31 日地下水水位日均值与 2023 年 5 月 31 日进行地下水水位同期对比。地下水水位数据、补水期平均水面蒸发量和流域面降雨量来自海河水利委员会京杭大运河贯通期监测数据。流域给水度来自海河水利委员会水文局统计数据。

2 数据与方法

2.1 河道入渗量

利用概化槽蓄法, 对各河段进行河道内外水量平衡分析, 根据河道上游断面流入水量、区间汇入水量、降水量、水面蒸发量、下游断面流出水量、沿线取水量等, 演算各河段补水过程, 计算河道入渗量:

$$G = W + Q + P - E - R - \Delta V - S \quad (1)$$

式中: G 为河道入渗量, m^3 ; W 为上游断面流入水量, m^3 ; Q 为河段区间汇入水量, m^3 ; P 为降水量, m^3 ; E 为水面蒸发量, m^3 ; R 为下游断面流出水量, m^3 ; S 为沿线取水量, m^3 ; ΔV 为补水前后槽蓄量变化, m^3 。

降雨量根据水面面积与补水期流域面降雨量计算:

$$P = A \times S_{\text{Rain}} \times 1\,000 \quad (2)$$

式中: A 为补水后遥感解译得到的水面面积, km^2 ; S_{Rain} 为流域面降雨量, mm 。

水面蒸发量根据水面面积与补水期平均水面蒸发量计算:

$$E = A \times S_{\text{Eva}} \times 1\,000 \quad (3)$$

式中: S_{Eva} 为平均水面蒸发量, mm 。

入渗强度根据入渗量、水面面积和补水时长计算:

$$I = G / (A \times T \times 10^3) \quad (4)$$

式中: I 为入渗强度, mm/d 。 T 为补水时长, d 。

2.2 地下水位变化

为更好地识别并排除异常值对地下水位计算结果的影响, 采用河段周边各监测点位在对比时段前后水位差值的算术平均计算地下水位变化:

$$\Delta h = \frac{\sum_{i=1}^n (h_{1,i} - h_{0,i})}{n} \quad (5)$$

式中: Δh 为对比时段前后各河段沿线地下水位波动, m ; $h_{1,i}$ 为第 i 个河段内监测点的对比时段后地下水水位, m ; $h_{0,i}$ 为第 i 个河段内监测点的对比时段前地下水水位, m ; n 为河段内监测点位个数。

京杭大运河沿线整体地下水位变化利用各河段河长进行加权平均计算:

$$\overline{\Delta h_l} = \frac{\sum_{j=1}^n (\Delta h_j \times l_j)}{\sum_{j=1}^n l_j} \quad (6)$$

式中: $\overline{\Delta h_l}$ 为对比时段前后京杭大运河沿线地下水位波动, m ; Δh_j 为第 j 河段在对比时段的地下水位波动, m ; l_j 为第 j 河段河长, km ; n 为河段个数。

京杭大运河沿线农业灌溉水源置换受水区涉及天津市, 河北省衡水市、沧州市、邢台市、邯郸市, 共计 15 个区县。受水区各区县地下水位变化采用区域内各监测点位在对比时段前后水位差值的算术平均计算:

$$\Delta h = \frac{\sum_{k=1}^n (h_{1,k} - h_{0,k})}{n} \quad (7)$$

式中: Δh 为对比时段前后受水区区内地下水位波动, m ; $h_{1,k}$ 为受水区区内第 k 个监测点的对比时段后地下水水位, m ; $h_{0,k}$ 为受水区区内第 k 个监测点的对比时段前地下水水位, m ; n 为受水区区内监测点位个数。

水源置换地市地下水位变化利用该地市涉及区县的面积进行加权平均计算:

$$\overline{\Delta h_s} = \frac{\sum_{m=1}^n (\Delta h_m \times s_m)}{\sum_{m=1}^n s_m} \quad (8)$$

式中: $\overline{\Delta h_s}$ 为对比时段前后水源置换地市地下水位波动, m; Δh_m 为第 m 个区县在对比时段的地下水位波动, m; s_m 为第 m 个区县面积, km^2 ; n 为区县个数。

2.3 贯通补水对浅层地下水位变化的贡献

贯通补水期间, 浅层地下水位变化主要受到降雨和补水影响。贯通补水减缓地下水位下降幅度利用河道沿线给水度和扣除蒸发降雨后的入渗量计算得到:

$$h_D = \frac{G - P}{(S_R \mu) \times 10^6} \quad (9)$$

式中: h_D 为贯通补水减缓地下水位下降幅度, m; S_R 为河段周边 0~10 km 区域的面积, km^2 ; μ 为河段周边 0~10 km 区域的给水度。

3 结果与讨论

3.1 贯通补水河道入渗分析

2023 年 3—5 月贯通补水期间, 利用南水北调

东线北延工程、岳城水库、官厅水库、潘庄引黄、引滦工程、沿线再生水及雨洪水等水源向京杭大运河累计实施生态补水 9.26 亿 m^3 。主要补水水源为水库水和再生水, 占比分别为 34.4% 和 25.3%, 通过建立本地水库泄放生态水量机制, 优化水库调度, 实现还水于河^[16]; 引江水、引黄水、引滦水等外调水的占比分别为 15.7%、16.6%、8.1%。在农业灌溉期实施京杭大运河生态补水, 有效兼顾了沿线地区农业灌溉和河湖生态复苏的需求。

通过水量平衡分析, 京杭大运河区间汇入水量 2.06 亿 m^3 , 区间引出水量 7.70 亿 m^3 , 新增槽蓄量 7.7 万 m^3 , 扣减降水后蒸发损失 0.11 亿 m^3 , 河道入渗量 1.49 亿 m^3 (表 3)。其中: 通惠河作为北京市内景观河道, 供水和防洪为其主要功能^[17], 因此河道入渗强度较低, 仅为 7.0 mm/d; 北运河入渗强度为 14.5 mm/d, 主要考虑其中下游河段常年有水, 渗漏率较小; 南运河入渗强度为 57.6 mm/d, 其中四女寺枢纽至北陈屯段入渗强度较高, 且该河段内有多处橡胶坝拦蓄阻隔水流, 非补水期易断流, 因此在贯通补水期间入渗量相对较大; 卫运河河道黏土比例较小渗透性较强^[12], 入渗强度达到 83.0 mm/d; 小运河约有 72% 输水干渠衬砌^[12], 渗透性较弱, 入渗强度仅为 29.0 mm/d。

表 3 京杭大运河入渗分析

Tab. 3 Analysis of the Beijing-Hangzhou Grand Canal infiltration

补水河段	起点	讫点	补水后水面面积/ km^2	汇入水量/亿 m^3		流出水量/亿 m^3		槽蓄量变化/万 m^3	扣降水后蒸发损失/万 m^3	河道入渗/亿 m^3	入渗强度/($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)
				上游断面	区间汇入	下游断面	区间引出				
通惠河	东便门	北关闸	0.92	0.37	0.20	0.56	0	0.9	27.0	0.002	2
	通州	杨洼	7.16	1.54	0.96	2.35	0	296.0	211.4	0.11	16
北运河	杨洼	土门楼	2.62	2.35	0.15	0.94	1.52	-9.2	77.3	0.04	15
	土门楼	三岔河口	4.71	0.94	0	0.45	0.41	159.7	139.2	0.05	12
南运河	四女寺枢纽	第三店	1.64	3.12	0	2.81	0.15	103.1	44.4	0.15	98
	第三店	北陈屯	7.09	2.81	0	0.94	1.36	239.2	192.2	0.47	73
	北陈屯	九宣闸	2.31	0.94	0	0.36	0.51	-95.6	62.6	0.08	36
	九宣闸	三岔河口	2.47	0.36	0.75	0	1.09	66.9	67.1	0.02	7
卫运河	临清站	四女寺枢纽	8.95	3.73	0	0.62	2.67	-287.9	147.8	0.47	83
小运河	位山闸	邱屯枢纽	4.08	1.45	0	1.38	0	-465.4	106.8	0.11	29

3.2 京杭大运河沿线地下水位响应

3.2.1 贯通补水期地下水位变化

补水后(5月31日)京杭大运河周边地下水位

较补水前(3月1日)呈略微下降趋势(图 2)。在河道周边 0~5 km 补水主要影响范围内, 区域地下水位上升(上升>0.1 m)、稳定(-0.1~0.1 m)和下降(下降

>0.1 m)的面积比例分别为 12%、14% 和 73%。除通惠河 0~2 km 和 2~5 km 范围内地下水位分别回升 0.01 m 和 1.72 m 外,其余河道周边地下水位均有所下降(图 3)。其中南运河入渗强度较高,总体入渗量最大,河道周边地下水位下降幅度最小,反映了生态补水对地下水的回补作用^[18]。相较大运河河道周边 10 km 以外未受影响区域地下水位平均下降 1.01 m,河道周边 10 km 范围内地下水位平均下降 0.80 m,降幅显著低于未受影响区域($p<0.05$),表明生态补水有效缓解了地下水位年内下降的趋势。3—5 月贯通补水期间,京杭大运河沿线华北平原山东、河北、天津等省市降水量相对较少,不能满足冬小麦等农作物在返青、拔节、灌浆等关键生长期的水量需要^[19-20],春灌期间以地下水为主要水源的灌溉抽取导致了大运河沿线地区地下水位的年内下降^[21]。因此,实施贯通补水虽然能够促进地下水的入渗回补,但是尚未能扭转年内 3—5 月大运河沿线地下水位下降的态势。

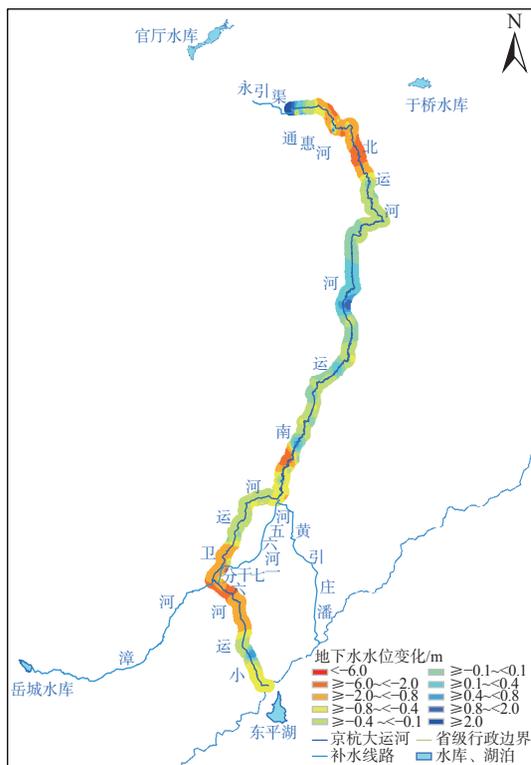


图 2 贯通补水前后京杭大运河河道 5 km 范围内地下水位变化

Fig. 2 Variation of groundwater level within 5 km of the Beijing-Hangzhou Grand Canal before and after water replenishment

各河段地下水位对贯通补水的响应存在一定滞后性^[22]。选择京杭大运河河道周边 0~≤2 km、>2~≤5 km、>5~≤10 km 范围分析河段周边地下水位的滞后响应,其中,2 km 范围内地下水位平均下降 0.30 m,>2~

≤5 km 范围内地下水位平均下降 0.56 m,>5~≤10 km 范围内地下水位平均下降 1.05 m。地下水位降幅随着距河道距离的增加而增加($p<0.05$)(图 3),证明在补水开始后,河道周边 0~≤2 km 范围内地下水最先受到入渗回补影响,地下水位响应时间较短;随着距河道距离的增加,回补效果减弱,地下水位响应滞后。相较小运河、南运河、北运河等河段,卫运河在 0~≤2 km 范围内地下水位下降 0.44 m,降幅略高于>2~≤5 km 范围下降水平(0.39 m),可能受到沿线市、县灌溉取水的影响^[23]。

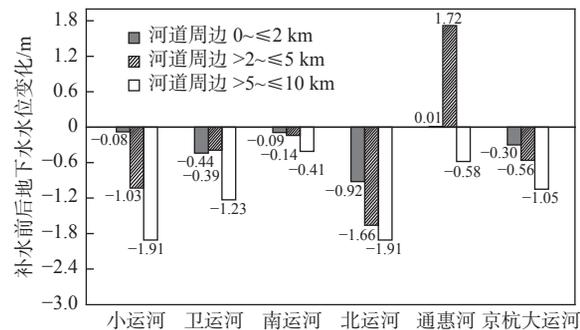


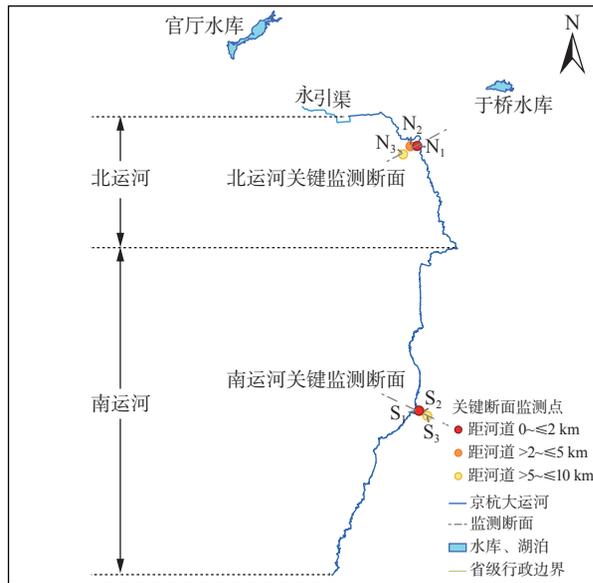
图 3 京杭大运河沿线地下水位滞后响应

Fig. 3 Delayed effect of groundwater level along the Beijing-Hangzhou Grand Canal

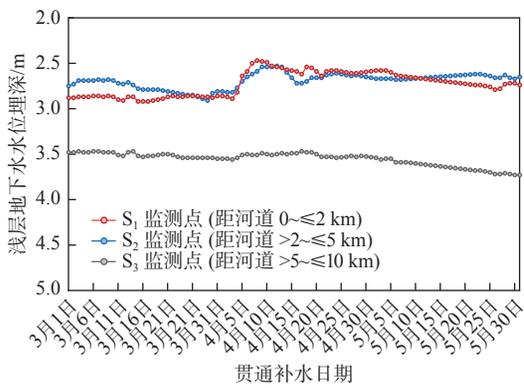
为进一步分析河道周边不同距离处地下水水位的变化规律,分别在南运河和北运河的 2 个监测断面上,选择 0~≤2 km、>2~≤5 km、>5~≤10 km 范围内的监测井各 1 个 [图 4(a)],对 6 个监测井地下水位随时间变化的趋势进行分析。

南运河周边地下水埋深整体较小,补水初期地下水位变化不明显;随着补水进程的延伸, S_1 监测井水位首先出现了显著上升,随后是 S_2 监测井,而 S_3 监测井水位随时间变化始终呈下降趋势。南运河 S_1 和 S_2 监测井在补水前后地下水位分别回升 0.10 m 和 0.14 m,补水后 S_1 监测井埋深仍高于 S_2 ,而 S_3 监测井水位则下降 0.25 m,证实了生态补水对地下水位变化的影响存在滞后,同时南运河较高的人渗量确实对河道周边地下水起到了更为有效回补。

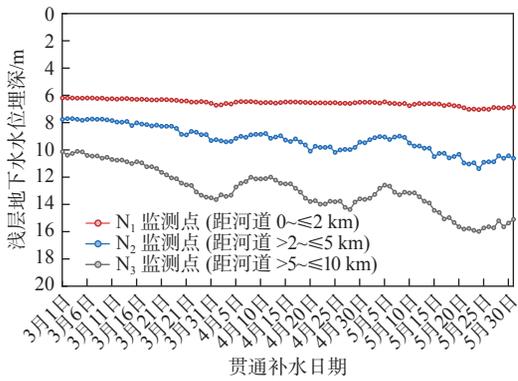
北运河周边地下水埋深较南运河更深,入渗回补量较小,地下水位下降幅度明显大于南运河。北运河 N_1 监测井水位在补水回补的影响下,基本保持稳定; N_2 和 N_3 监测井水位均有显著下降,前者在补水前后的水位下降幅度(-2.85 m)明显小于后者(-4.97 m)。从时间序列上看, N_2 监测井水位变化幅度始终小于 N_3 ,与南运河的滞后响应一致。



(a) 监测断面及监测井布设



(b) 南运河



(c) 北运河

图4 京杭大运河重点断面监测井补水期间地下水埋深逐日变化

Fig. 4 Daily variation of groundwater level during water replenishment of monitoring wells in key sections of the Beijing-Hangzhou Grand Canal

3.2.2 大运河沿线地下水位年际变化

与2022年同期对比,2023年贯通补水后(5月31日)补水河道周边地下水位总体呈回升态势,各河段周边地下水位较去年同期显著回升($p < 0.05$)。其中,0~2 km范围内地下水位平均回升0.48 m,2~5 km范围内地下水位平均回升0.31 m,5~10 km范围内地下水位平均回升0.51 m,0~10 km

范围内生态补水主要影响区域内地下水位平均回升0.48 m。考虑到大运河周边地下水位的年际变化受到年内降水、沿线取水等多种因素的影响,为更好地反映贯通补水过程对地下水的回补效果,在年际变化分析中将认定地下水位发生变化的阈值提升为0.5 m。根据水位变化分析,河道补水主要影响范围5 km内区域地下水位上升(上升>0.5 m)、稳定(-0.5~0.5 m)和下降(下降>0.5 m)的面积比例分别为36%、63%和1%(图5)。

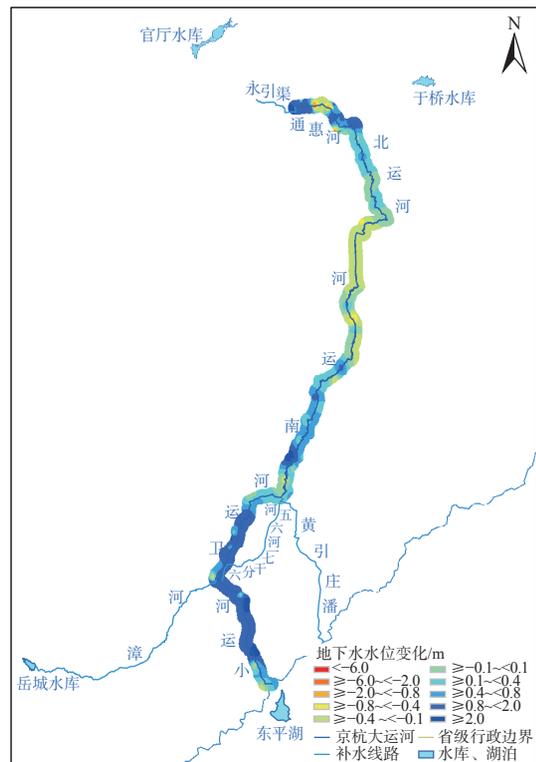


图5 补水后京杭大运河沿线地下水位与去年同期对比(2023年5月31日与2022年5月31日)

Fig. 5 Variation of groundwater level along the Beijing-Hangzhou Grand Canal after water replenishment compared to corresponding period of last year (May 31, 2023 and May 31, 2022)

进一步对比2022年和2023年同一时段(3月1日—5月31日)地下水位变化(图6),京杭大运河沿线地下水位下降幅度与去年同阶段基本持平。补水主要影响范围河道周边0~5 km内地下水位下降幅度减少了0.17 m。其中,小运河、卫运河、南运河、北运河及通惠河周边0~5 km范围内地下水位下降幅度分别减少0.47、0.01、0.05、0.15和1.60 m。

实施生态补水前,京杭大运河黄河以北河段除通惠河和北运河2个河段常年有水外,小运河、卫运河和南运河部分河段常年或除汛期外始终处于干涸或断流状态。苟少杰等^[24]研究表明,对长期断流河道持续实施生态补水后,河道渗漏量逐渐减少,

可能是地下水位抬升所致。2023 年京杭大运河再次全线贯通后, 相较 2022 年首次贯通同期和同时段, 沿线地下水位均有回升, 进一步证明连续贯通补水能够减少灌溉期地下水位下降, 促进河道沿线地下水位的整体上升^[25]。经过连续两年实施生态补水后, 小运河、卫运河、北运河、通惠河等河段基本实现了 2023 年全线有水, 在恢复地表-地下水水力联系, 改善水生态环境等方面均起到了促进作用。

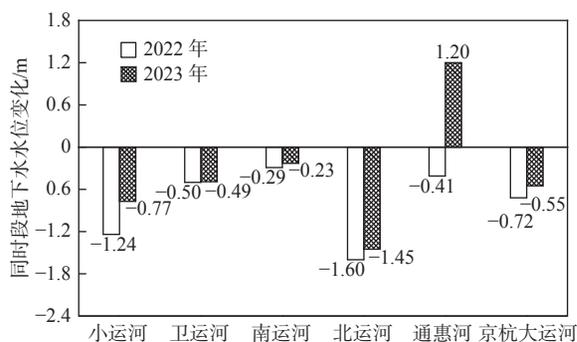


图 6 京杭大运河沿线地下水位与去年同时段对比 (2023 年 3—5 月与 2022 年 3—5 月)

Fig. 6 Variation of groundwater level along the Beijing-Hangzhou Grand Canal compared to the same time period of last year (March to May, 2023 and March to May, 2022)

3.3 主要水源置换区地下水回补效果

3.3.1 压减地下水开采量分析

京杭大运河贯通补水及春灌期间(3 月 1 日—6 月 30 日), 沿线省市累计灌溉引水 4.11 亿 m³, 置换深层承压水超采区 6.15 万 hm² 农田灌溉, 有效减少了地下水开采量^[26-27]。根据水源置换地块在补水期间的实际引水灌溉次数以及灌溉定额^[28], 对比未实施水源置换情形, 分析地下水压采量。河北省水源置换区在贯通补水期间实施水源置换 1~3 次, 天津市水源置换区在贯通补水期间实施水源置换 2 次。按照每次灌溉用水 750 m³/hm² 计算, 河北省、天津市可分别压减地下水开采量 1.05 亿 m³、0.19 亿 m³(表 4)。

表 4 京杭大运河沿线主要农业灌溉水源置换情况

Tab. 4 Agricultural irrigation water source replacement along the Beijing-Hangzhou Grand Canal

省级行政区	地级行政区	置换面积/万hm ²	引水灌溉次数	压减地下水开采量/万m ³
天津市	天津市	1.28	2	1 920
	沧州市	3.18	3	7 155
河北省	衡水市	1.33	3	2 993
	邢台市	0.27	1	203
	邯郸市	0.09	2	135
合计		6.15	-	12 406

3.3.2 主要水源置换区地下水位变化

京杭大运河沿线农业灌溉用水置换区主要分布在卫运河和南运河段沿线, 水源置换区地下水位变化分析以河北省和天津市两省市为主。贯通补水后, 主要水源置换区地下水位总体呈下降趋势, 浅层地下水和深层地下水位平均下降 0.27 m 和 7.02 m, 其中位于卫运河和南运河段的衡水市相关乡镇深层承压水位下降幅度最大, 平均达到 16.58 m(表 5)。大运河沿线深层水作为农业灌溉水源时^[29], 灌溉期入渗量的增加也在一定程度上回补了浅层地下水^[18], 因此在贯通补水期间深层地下水下降幅度远大于浅层地下水。

表 5 京杭大运河沿线水源置换区地下水位变化

Tab. 5 Variation of groundwater level in water source replacement area along the Beijing-Hangzhou Grand Canal 单位: m

地级行政区	2023 年 5 月 31 日		2022 年 5 月 31 日		2023 年 5 月 31 日	
	对比 3 月 1 日		对比 3 月 1 日		对比 2022 年 5 月 31 日	
	浅层	深层	浅层	深层	浅层	深层
天津市	-0.15	-1.11	0.42	-0.41	-0.20	2.82
沧州市	-0.15	-2.52	-0.25	-1.98	-0.03	3.23
衡水市	-0.46	-16.58	-0.37	-15.24	0.57	3.44
邢台市	-0.32	-4.01	-0.37	-2.75	1.46	1.28
邯郸市	-0.93	-3.18	-1.16	-4.40	2.35	4.23
主要受水区	-0.27	-7.02	-0.26	-6.20	0.27	3.17

与 2022 年同期相比, 2023 年贯通补水后(5 月 31 日), 主要受水区地下水位总体呈回升态势, 浅层地下水位平均回升 0.27 m, 深层地下水位平均回升 3.17 m(表 5), 表明持续实施生态补水和水源置换, 对深层地下水位抬升起到了显著作用。其中, 位于京杭大运河补水支线漳河沿线的邯郸市地下水位回升幅度最大, 浅层地下水位平均回升 2.35 m, 深层地下水位平均回升 4.23 m。自 2022 年京杭大运河首次全线贯通后, 卫运河实现了河道内全年有水, 对邯郸等沿线市县浅层地下水入渗回补和深层地下水越层补给均起到了促进作用^[30-31]。针对卫运河和南运河等入渗强度高且沿线农业灌溉取水需求较大的河段, 持续实施生态补水, 一方面能够更为有效地入渗回补地下水, 另一方面也能够通过实施水源置换, 减少地下水开采, 促进地下水水位回升。

进一步对比 2022 年和 2023 年同一时段主要受水区浅层地下水位总体变幅基本保持稳定(2022 年下降 0.26 m, 2023 年下降 0.30 m), 深层地下水位下

降幅度有所上升(2022年下降6.20 m, 2023年下降7.02 m)。冀中南地区浅层地下水水质相对较差, 苦咸水广泛分布, 在水资源紧缺的情况下, 深层水是农业灌溉水源之一^[32-33]。2023年初(1—3月)大运河沿线受水区降水量相较2022年同期减少59.1%, 灌溉期有效降水不足, 同时河北省2023年春季平均气温为14.6℃, 较多年平均气温偏高1.1℃, 为近5年内最高值, 导致春灌期(3—5月)农作物需水量增加^[34]。由此导致沿线农业灌溉取用地下水量增加, 深层地下水位下降幅度较大。

3.4 贯通补水对京杭大运河沿线浅层地下水水位变化贡献

京杭大运河贯通补水对沿线地下水水位的影响主要体现在对浅层地下水入渗回补的直接影响和提供地表水源置换沿线农业灌溉开采深层地下水量的间接影响。虽然生态补水过程中实施的水源置换影响了深层地下水的开采, 但是短时间内农业灌溉对浅层地下水的回渗量相对稳定, 浅层地下水位的变化主要受到降水和生态补水两方面的影响^[35]。

对浅层地下水位在贯通补水期间的变化, 为准确评估生态补水的影响, 在河道水量平衡计算结果的基础上, 进一步扣除降水量, 分析生态补水过程对河道周边地下水的入渗回补量和浅层地下水水位下降幅度的减少值(表6)。根据计算结果, 在实施生态补水后, 京杭大运河河道周边10 km范围内, 浅层地下水位下降幅度减少0.19 m, 其中, 卫运河和南运河由于渗透性较高、入渗量较大, 河段周边地下水位下降幅度分别减少0.33 m和0.21 m。

表6 贯通补水对京杭大运河沿线浅层地下水水位下降幅度的减缓

Tab. 6 Reduction of phreatic groundwater level decline along the Beijing-Hangzhou Grand Canal due to water replenishment

补水河道	给水度	河道周边10 km范围面积/km ²	扣除降水后生态补水河道入渗量/亿m ³	浅层地下水水位下降幅度减缓/m
通惠河	0.087	721	-	-
北运河	0.059	2 561	0.19	0.13
南运河	0.064	5 382	0.71	0.21
卫运河	0.065	2 133	0.46	0.33
小运河	0.070	2 265	0.11	0.07
京杭大运河	0.065	13 063	1.47	0.19

对浅层地下水位的年际变化, 考虑降水和补水的影响, 分析两者对浅层地下水水位回升的贡献。

2023年贯通补水期间, 大运河入渗回补水量为1.49亿m³, 其中, 降水入渗量为122.3万m³, 补水入渗量为1.47亿m³。降雨过程虽然能对回补浅层地下水起到积极作用, 但是贯通补水是促进地下水位回升的主要因素。根据入渗回补水量的比例, 贯通补水对浅层地下水位升高的贡献比例约为99.1%。

进一步分析浅层地下水补排关系, 根据贯通补水后大运河重点河段周边浅层地下水等水位线图, 大运河贯通补水时间较短, 地下水流场形态变化不显著, 影响范围整体在10 km范围内。卫运河河段周边形成了狭长的水丘, 对于周边存在的浅层地下水漏斗能够起到补给作用, 如果能够长期实施生态补水, 有助于控制漏斗范围[图7(a)]。南运河虽然入渗量较大, 河道周边地下水水位下降幅度最小(图3), 但是由于河段周边浅层水位埋深较浅, 以河道为中心向周边区域地下水补给关系相对较弱[图7(b)], 与前文分析的不同距河道距离下南运河浅层地下水位随时间变化不显著[图4(b)]的结论一致。

4 结论

本研究分析京杭大运河贯通补水过程中河道入渗水量、河道沿线和灌溉水源置换区地下水位变化, 得出以下结论:

生态补水对促进京杭大运河补水河段周边地下水位回升具有积极作用, 实施生态补水后浅层地下水位下降幅度减少了0.19 m; 但现有补水量不足以扭转春灌期地下水位的下降趋势, 南运河等入渗强度较高的河道地下水位下降幅度较小。

河道周边地下水对生态补水的响应表现出明显的滞后性, 并表现出距离河道越近, 地下水位下降幅度越小, 响应越快的特征, 且研究区内不同河段地下水位抬升幅度具有差异性; 入渗性好的河段周边地下水位随时间变化的幅度较小。

农业水源置换区浅层地下水和深层地下水位分别较去年同期回升0.29 m和3.17 m, 表明在生态补水的同时实施水源置换, 能够减少地下水开采, 促进越流补给深层地下水, 提升地下水位。

针对卫运河和南运河等入渗条件好且沿线引水灌溉需求较高的河段重点实施生态补水, 延长河道全年有水时长, 保证灌溉期沿线取水需求, 能够更为有效地促进地下水水位回升。

京杭大运河地下水位响应的主要研究时段主要为年内补水期及去年同期,尚未全面对沿线地下水全年逐月变化进行分析,需要进一步收集河道沿线长时间序列地下水位的实测资料,并充分考虑降

水、入渗、补水量等多因素对地下水回补的影响。未来的研究可以进一步结合各河段入渗情况和流域降雨情势对生态补水回补地下水效果进行更为准确的评估。

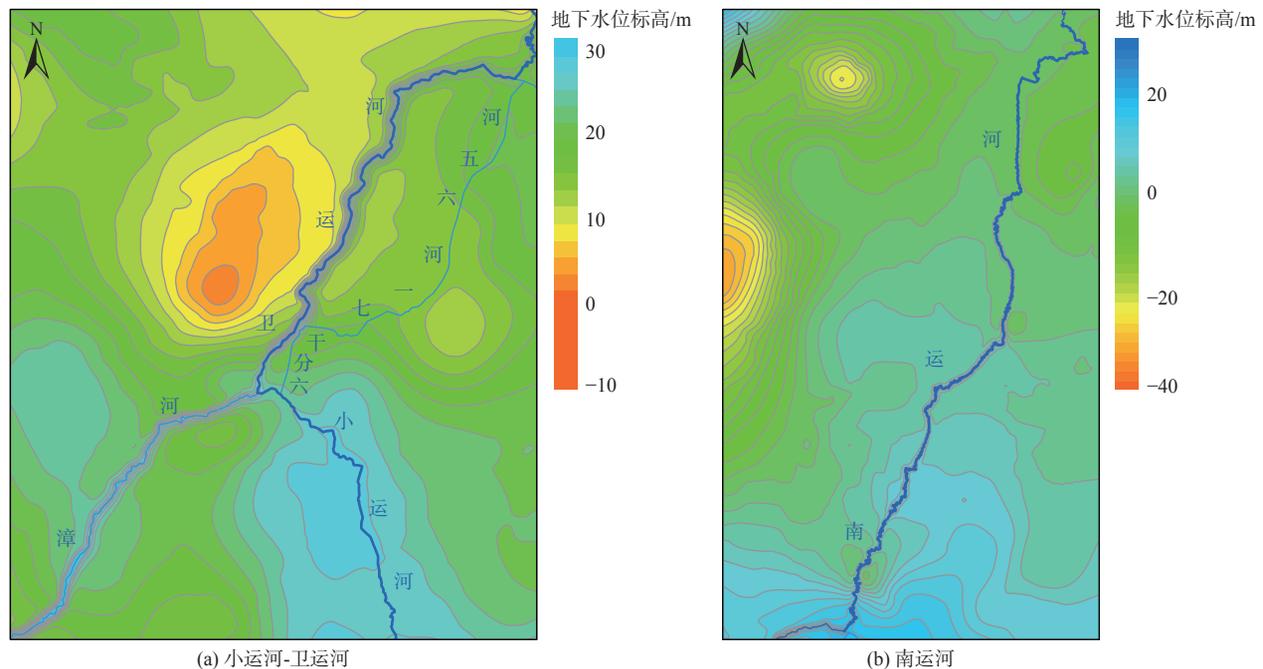


图 7 贯通补水后京杭大运河重点河段浅层地下水等水位线

Fig. 7 Contour map of phreatic groundwater level in key reaches of the Beijing-Hangzhou Grand Canal after water replenishment

参考文献:

- [1] CHEN M, WANG J C, SUN J, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of intangible cultural heritage and tourism response in the Beijing-Hangzhou Grand Canal basin in China[J]. *Sustainability*, 2023, 15(13): 10348. DOI: 10.3390/su151310348.
- [2] 柴琪. 近四十年京杭大运河水质分布时空变化遥感研究[D]. 徐州: 江苏师范大学, 2020. DOI: 10.27814/d.cnki.gxzs.2020.000136
- [3] MAO F, WU Y X, YANG B F, et al. Water environment evolution along the China Grand Canal[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, 17(1): 012170. DOI: 10.1088/1755-1315/17/1/012170.
- [4] ZHU Y, DRAKE S, LV H, et al. Analysis of temporal and spatial differences in eco-environmental carrying capacity related to water in the Haihe River basins, China[J]. *Water Resources Management*, 2010, 24(6): 1089-1105. DOI: 10.1007/s11269-009-9487-1.
- [5] 李帅, 王怀军, 潘莹萍. 基于Max-Stable模型的海河流域气候极值变化特征[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(2): 31-43. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2020.0025.
- [6] CHEN X, ZHANG K, LUO Y, et al. A distributed hydrological model for semi-humid watersheds with a thick unsaturated zone under strong anthropogenic impacts: A case study in Haihe River basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 623: 129765. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129765.
- [7] ZHENG Z, NING L, DAI D, et al. Water budget variation, groundwater depletion, and water resource vulnerability in the Haihe River basin during the new millennium[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2022, 126: 103141. DOI: 10.1016/j.pce.2022.103141.
- [8] 李原园, 黄火键, 李宗礼, 等. 河湖水系连通实践经验与发展趋势[J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(4): 81-85. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2014.04.018.
- [9] REN J, HAN G, LIU X, et al. Water chemical characteristics and water quality evaluation of the river under the ecological water replenishment: A case study in the Yongding River basin in north China[J]. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2023, 7(8): 1505-1515. DOI: 10.1021/acsearthspacechem.3c00067.
- [10] XU C, SUN Y, SHI B, et al. Study on the processes influencing and importance of ecological water replenishment for groundwater resources: A case study in Yongding River[J]. *Water*, 2022, 14(5): 828. DOI: 10.3390/w14050828.

- [11] 宋浩楠,陈文婧,田晓华,等.华北中部平原地表水入渗试验:以南宫滦河为例[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(6): 1157-1166. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0118.
- [12] 王哲,朱静思,安会静,等.京杭大运河2022年全线贯通补水水文监测分析与评价[C].2022中国水利学术大会(中国水利学会2022学术年会), 2022: 9. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2022.056807
- [13] CUI W Z, HAO Q C, XIAO Y, et al. Combining river replenishment and restrictions on groundwater pumping to achieve groundwater balance in the Juma River Plain, North China Plain[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 902034. DOI: 10.3389/feart.2022.902034.
- [14] LI J Z, SHI Y, ZHANG T, et al. Radar precipitation nowcasting based on ConvLSTM model in a small watershed in north China[J]. *Natural Hazards*, 2024, 120(1): 63-85. DOI: 10.1007/s11069-023-06193-6.
- [15] WU B Y, LI Z K, ZHANG X, et al. Has Arctic sea ice loss affected summer precipitation in North China? [J]. *International Journal of Climatology*, 2023, 43(11): 4835-4848. DOI: 10.1002/joc.8119.
- [16] 南天,曹文庚,任印国,等.京津冀平原浅层地下水漏斗演变规律与影响因素[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2024, 22(1): 110-121. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0013.
- [17] 李楠.通惠河水环境问题分析及应对措施研究[J].*海河水利*, 2023(4): 24-27,47. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7328.2023.04.006.
- [18] 陈李宁.滹沱河生态补水不同区段地下水环境变化及影响机制[D].北京:中国地质大学(北京), 2021. DOI: 10.27493/d.cnki.gzdzy.2021.000838
- [19] 王西琴,张馨月,陈浩.华北地下水超采区粮食作物灌溉用水量及其节水潜力:基于河北省620户问卷调研数据[J].*西北大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(2): 227-233. DOI: 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2020-02-008.
- [20] 徐珺.华北春季极端降水的主导环流型及其中尺度动力过程[D].南京:南京信息工程大学, 2022. DOI: 10.27248/d.cnki.gnjqc.2022.000010
- [21] 张婧,马贵宏,高雅,等.华北山前平原典型井灌区地下水水位变化影响因素分析[J].*河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(1): 21-28,84. DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2022.01.004.
- [22] 李志强,王亚娟,温子希,等.潮白河春季生态补水及地下水响应[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(2): 375-384. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0038.
- [23] 曹欣欣.大运河河北段水资源配置分析[J].*水科学与工程技术*, 2023(3): 9-11. DOI: 10.19733/j.cnki.1672-9900.2023.03.03.
- [24] 苟少杰,仇文顺,李述,等.大规模生态补水对长期断流河道永定河北京段入渗能力的影响[J].*水电能源科学*, 2023, 41(8): 35-38,26. DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221805.
- [25] 孙浩.永定河北京平原段河道生态补水对地下水影响分析[D].北京:中国地质大学(北京), 2021. DOI: 10.27493/d.cnki.gzdzy.2021.000794
- [26] 陈飞,羊艳,史文龙,等.河北省地下水超采综合治理农业措施压采效果与技术经济性分析[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(5): 1019-1026. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0101.
- [27] 贾玲,游进军,汪林,等.南水北调东、中线一期工程水源置换效应情景分析[J].*南水北调与水利科技*, 2014, 12(1): 16-20. DOI: 10.3724/SP.J.1201.2014.01016.
- [28] 赵晗,刘玉春,吴迪,等.河北省5个县域冬小麦-夏玉米连作灌溉需水特性分析[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(4): 185-194. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0086.
- [29] 邓兴.河北省衡水市地下水水位动态特征及变化趋势分析[D].石家庄:河北地质大学, 2019. DOI: 10.27752/d.cnki.gsjzj.2019.000082
- [30] 陈彭,苗晋杰,王威,等.陡河流域地表水与地下水转化关系[J].*南水北调与水利科技*, 2016, 14(2): 165-171. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2016.02.029.
- [31] 李莎,成建梅,李敏敏,等.人类开采活动影响下的衡水地区地下水水质特征及演化[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2016, 14(3): 55-61,100. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2016.03.010.
- [32] ZHOU S, GAO Y, ZHANG J P, et al. Impacts of saline water irrigation on soil respiration from cotton fields in the North China Plain[J]. *Agronomy-Basel*, 2023, 13(5): 1197. DOI: 10.3390/agronomy13051197.
- [33] LI X B, KANG Y H, WAN S Q, et al. Reclamation of very heavy coastal saline soil using drip-irrigation with saline water on salt-sensitive plants[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 146: 159-173. DOI: 10.1016/j.still.2014.10.005.
- [34] WANG X J, ZHANG J Y, ALI M, et al. Impact of climate change on regional irrigation water demand in Baojixia irrigation district of China[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2016, 21(2): 233-247. DOI: 10.1007/s11027-014-9594-z.
- [35] 夏绮文.潮白河再生水河道入渗区浅层地下水化学演化特征分析[D].北京:中国地质大学(北京), 2021. DOI: 10.27493/d.cnki.gzdzy.2021.000156

Effect of ecological water replenishment on groundwater recharge in the Beijing-Hangzhou Grand Canal

MA Ruoqi^{1,2,3}, CHEN Fei¹, CHENG Guanqiao⁴, SHI Wenlong¹, ZHANG Lei⁵

(1. General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Beijing 100120, China; 2. College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, Beijing 100871, China; 4. Tianjin Zhongshui Technology Consulting Limited Liability Company, Tianjin 300170, China; 5. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Ecological water replenishment is an important measure to improve the ecological environment of rivers and lakes and reduce the groundwater deficit. The dynamic change of groundwater level is the most intuitive index to evaluate the effect of the short-time ecological water replenishment. In order to scientifically evaluate the effect of the ecological water replenishment on the Beijing-Hangzhou Grand Canal since 2022, it is necessary to explore the dynamic changes of the groundwater levels in different reaches of the Grand Canal.

Based on the groundwater level data from 419 phreatic water and 173 confined water monitoring wells along the Beijing-Hangzhou Grand Canal (the north section of the Yellow River, including Xiao Canal, Wei Canal, South Canal, North Canal, and Tonghui River) during the replenishment period in 2022-2023, the river channel infiltration was calculated by the water balance method, and the variations of the groundwater level was analyzed along the river channel and in the agricultural irrigation water source replacement regions.

Results showed that: (1) The volume of ecological water replenishment for the Beijing-Hangzhou Grand Canal in 2023 was 926 million cubic meters, and the infiltration volume was 149 million cubic meters. Compared to the lining channels such as Xiao Canal, North Canal, and Tonghui River, Wei Canal and South Canal had a high permeability, which can recharge groundwater around the river channel more efficiency. (2) During the replenishment period, the phreatic water level in the range of 0~10 km around the river decreased 0.80 m, which confirmed that the current water replenishment amount is not enough to fully eliminate the impact of spring irrigation water withdrawals in March to May on the groundwater level. (3) The average decrease of groundwater level in regions beyond 10 km from the center line of the river channel (unaffected area) was 1.01 m. And the average decrease of groundwater level in regions within 10 km from the center line of the river channel was 0.80 m, which was significantly lower than that in the unaffected area, indicating that ecological water replenishment effectively mitigated the downward trend of groundwater level. (4) Groundwater level has risen by 0.48 m compared to the same period of last year and the decrease of groundwater level has reduced by 0.19 m during the spring irrigation period, indicating the positive impact of replenishment on the groundwater level recovery. (5) There had a delayed effect on the response of the groundwater level to the water replenishment, which was shown as the closer distance to the river, the smaller decrease of the groundwater level. (6) In the agricultural irrigation water source replacement regions, compared with the same period of last year, the confined water and phreatic water levels have risen by 3.17 m and 0.27 m respectively, which showed the water source replacement can effectively alleviate the decline in groundwater levels caused by irrigation water withdrawals.

This study is of great significance to grasp the changing law of groundwater level by ecological water replenishment, which can provide the basis for further optimization of ecological water replenishment plan. Changes in groundwater levels in the Beijing-Hangzhou Grand Canal after the two consecutive years of ecological water replenishment indicated that the downward trend in groundwater levels due to irrigation withdrawals was difficult to reverse through the ecological recharge. While continuous implementation of ecological replenishment on rivers with strong infiltration and high irrigation water demand can promote the recovery of groundwater levels effectively.

Key words: ecological water replenishment; the Beijing-Hangzhou Grand Canal; infiltration intensity; groundwater level; water source replacement; irrigation water withdrawal