

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.02.004

间歇性输水条件下塔里木河下游地下水时空变化模拟

薛联青^{1,2}, 杨明杰^{1,2}, 廖淑敏³

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 皖江工学院水利工程学院, 安徽 马鞍山 243031;
3. 济宁市水务综合执法支队, 山东 济宁 272004)

摘要:为确定适宜的输水策略以实现塔里木河下游地下水位的快速抬升,提高生态系统的恢复力,运用 GMS 软件构建了塔里木河下游地下水动态模拟模型,设计单阶段、双阶段和多阶段输水情景模拟预测了地下水对不同输水情景的时空响应特征。结果表明:制定输水策略时应保证年输水量大于有效水量,当输水总量一定时,延长输水时间、扩大输水间隔有助于地下水位的快速抬升;最佳输水策略是以 1 月和 3—11 月为输水期分两个阶段输水 4 500 万 m³;地下水埋深和水位变化量沿河道对称分布,地下水埋深与距河道两侧距离成正比,地下水位变化量和抬升量与时间成反比。

关键词:地下水;输水策略;GMS;塔里木河下游

中图分类号:TV213.4;X171.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)02-0025-06

Simulation of spatiotemporal variation of groundwater in lower reaches of the Tarim River under intermittent water transportation conditions // XUE Lianqing^{1,2}, YANG Mingjie^{1,2}, LIAO Shumin³ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Hydraulic Engineering, Wanjiang University of Technology, Maanshan 243031, China; 3. Water Comprehensive Law Enforcement Detachment of Jining, Jining 272004, China)

Abstract: In order to determine an appropriate water delivery strategy, achieve the rapid rise of the groundwater level in the lower reaches of the Tarim River, and improve the resilience of the ecosystem, this paper uses the GMS software to construct a dynamic simulation model of groundwater in the lower reaches of the Tarim River and simulates and predicts the spatiotemporal response characteristics of groundwater to single-stage, two-stage, and multi-stage water delivery scenarios. The results show that the formulation of a water delivery strategy requires that the annual water delivery volume is greater than the effective water volume. When the total amount of water delivery is constant, extending the water delivery time and expanding the water delivery interval are conducive to the rapid rise of the groundwater level. The best water delivery strategy is to transport 45 million m³ of water in two stages, with January and March to November as the water conveyance periods. The groundwater depth and water level variation are symmetrically distributed along the river channel. The groundwater depth is proportional to the distance from the two sides of the river channel, and the groundwater level change and elevation are inversely proportional to the time.

Key words: groundwater; water delivery strategy; GMS; lower reaches of the Tarim River

塔里木河水系长期以来具有不可替代的生态服务功能,是维系整个塔里木盆地自然和人工生态系统的水资源保障^[1-2]。自 20 世纪 70 年代大西海子水库建成后,塔里木河下游河道断流,地下水位不断降低,不合理的水资源开发和极端干旱气候加剧了生态环境恶化^[3-5]。为改善塔里木河生态环境,自 2000 年起进行间歇性生态输水,至 2018 年 1 月输水总量达 70 亿 m³^[6-8]。塔里木河下游植被得到恢

复,地下水埋深抬升至 6 m 以上^[9-10]。许多学者开展了地下水埋深的相关研究^[11-15],但主要集中在输水对地下水的影响方面。薛联青等^[16]构建了局部地下水数值模型,采用地下水对输水的有效响应距离和受水面积两个指标揭示了输水前后地下水时空分布格局,评估了现有生态输水对地下水产生的累积效应,确定了输水对地下水恢复的有效影响范围。但为了实现地下水位的加速抬升,提高生态系统的恢复

基金项目:兵团科技合作计划项目(2022BC001);国家自然科学基金(51779074)

作者简介:薛联青(1973—),女,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:lxue@hhu.edu.cn

力,仍需进一步研究以确定适宜的未来输水策略。

本文基于地下水模型系统(groundwater modeling system,GMS)软件建立了塔里木河下游地下水动态模拟模型,设计了单阶段、双阶段和多阶段输水情景模拟地下水对不同输水情景的时空响应特征,以期确定塔里木河下游输水策略提供参考。

1 研究区概况

如图 1 所示,研究区位于塔里木河下游中下段(87°18'35"E~88°35'11"E、39°21'50"N~40°48'26"N),从大西海子水库到台特玛湖河段^[17],海拔 690~980 m。由于河流双侧地下水的对称性及模拟区域的典型性,模拟区域的边界以阿拉干监测断面处的河道为中心,向河道两侧各扩展 5.0 km,由 ArcGIS 裁剪缓冲区,该区域为包含老塔里木河河道长度 19.29 km、其文阔尔河河道长度 15.97 km、塔里木河河道长度 14.38 km 的不规则区域。模拟区域包含 6 个生态监测井,分别是距离河道右岸垂直距离 50 m、150 m、300 m、500 m、750 m 和 1 050 m 的 H1~H6 观测井^[18]。

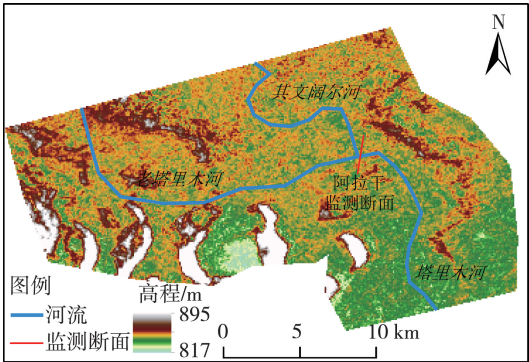


图 1 研究区概化图
Fig.1 Generalized map of study area

模型的建立可见文献[16]。模型模拟预测的时间为 2018 年 1 月 1 日至 2029 年 12 月 31 日,空间边界为塔里木河下游中下段。

2 输水情景设计

确定最优输水策略包括确定输水量、输水期和输水间隔,基本输水量区间为 0.1 亿~0.3 亿 m³,依据前期的研究成果^[19],最佳的输水期为 3—4 月和 6—9 月,适宜的输水间隔为 4~8 月,本次模拟输水情景时主要采用输水期覆盖 2—10 月的输水方案,依据不同的输水期和输水间隔将输水情景设置为单阶段输水情景、双阶段输水情景和多阶段输水情景。

a. 单阶段输水情景的主要输水期为 4—9 月(此时一年中有 6 月不输水)。GMS 模拟的单阶段

输水情景为水量设置情景,其输水期均为 4—9 月,年输水量分别设置为 1 000 万 m³、1 500 万 m³、2 000 万 m³、2 500 万 m³、3 000 万 m³、3 500 万 m³、4 000 万 m³、4 500 万 m³和 5 000 万 m³。单阶段输水情景的不同模拟输水时长设置如表 1 所示,为方便表达,不同输水时长代表的输水情景以数字+M 表示。

表 1 单阶段输水情景不同模拟输水时长设置

Table 1 Different water delivery duration settings of single-stage water delivery scenarios

输水情景	输水时长/月	输水期
6M	6	4—9 月
7M	7	3—9 月
8M	8	3—10 月
9M	9	2—10 月
10M	10	2—11 月

b. 双阶段输水情景的第一阶段设置在 1—3 月,第二阶段设置在 3—11 月,以双阶段输水 6—10 月、输水间隔 1~4 月进行组合可以获得 38 个输水方案,根据植被生长期和地下水滞后响应,模拟输水时选择输水期覆盖 5—9 月、输水间隔不超过 3 月的输水情景进行模拟,最终 GMS 运行模拟方案 12 个,如表 2 所示,表中“M”前面的数字表示输水时长,“-”后面的数字表示输水间隔。

表 2 双阶段输水情景模拟设置

Table 2 Simulated settings of two-stage water delivery scenarios

输水情景	双阶段输水时长/月	输水间隔/月	输水期
6M-1	6	1	3 月、5—9 月
6M-2	6	2	2 月、5—9 月
6M-3	6	3	1 月、5—9 月
7M-1	7	1	2 月、4—9 月
7M-2	7	2	1 月、4—9 月
7M-3	7	3	1 月、5—10 月
8M-1	8	1	1 月、3—9 月
8M-2	8	2	1 月、4—10 月
8M-3	8	3	1 月、5—11 月
9M-1	9	1	1 月、3—10 月
9M-2	9	2	1 月、4—11 月
10M-1	10	1	1 月、3—11 月

c. 多阶段输水情景。多阶段输水情景设置主要从每阶段输水 Z 月、输水间隔 N 月进行组合,包括 19 种输水方案,但考虑到月均蒸散发及植被生长状况,6—8 月蒸散发最大,必须进行输水;地下水对输水滞后响应 80 d 后开始减弱,输水间隔不应超过 3 月;11—12 月进行输水对植被影响微弱,会造成不必要的水资源浪费。因此,实际操作中应在 5—9 月进行输水,此时多阶段输水类似于双阶段输水。可见,多阶段输水既没有必要,在实际应用中操作性也比较差,输水条件设置烦琐,故不做模拟计算。

3 地下水对不同输水情景响应的模拟预测

将设计的输水流量导入 STR(溪流模块)运行模型^[20],得到阿拉干各监测井的地下水位变化,计算输水前后的地下水埋深及其变化量,确定不同输水情景下的累积效应变化速率。本文累积效应变化速率通过地下水埋深变化速率(地下水埋深年均变化量)来衡量。根据地下水对单阶段输水的响应确定输水策略的输水量和输水时长,根据地下水对双阶段输水的响应确定输水策略的输水间隔。

3.1 单阶段输水的累积效应

3.1.1 有效水量的确定

为确定不同输水量下的累积效应,首先将单阶段输水期统一为每年4—9月,输水时长183 d,以年输水量作为变量,运行不同输水量条件下的模型,根据模型模拟的各输水情景下监测井2018—2029年的平均地下水埋深计算阿拉干断面的地下水埋深、年均变化量及累积10 a变化量(表3)。变化量为正值表示地下水埋深增大,水位下降;变化量为负值表示地下水埋深减小,水位抬升。年输水量小于4 000万 m³时,2019年地下水呈负增长,2020—2028年地下水位逐渐上升;年输水量为4 500万 m³时累积效应变化速率对应的地下水位抬升速率为0.1472 m/a,累积10 a抬升量为0.7904 m。

表3 单阶段输水情景不同输水量的累积效应

Table 3 Cumulative effects of different water delivery volumes of single-stage water delivery scenarios

年输水量/ 万 m ³	阿拉干断面 流量/(m ³ ·d ⁻¹)	地下水埋深/m		
		2028年	年均变化	累积10 a 变化
1 000	15 275.65	4.144 6	-0.072 2	-0.224 2
1 500	22 913.47	3.862 8	-0.099 5	-0.430 6
2 000	30 551.29	3.587 4	-0.120 7	-0.690 5
2 500	38 189.12	3.462 1	-0.131 8	-0.748 9
3 000	45 826.94	3.389 4	-0.137 4	-0.747 5
3 500	53 464.76	3.357 4	-0.140 0	-0.752 8
4 000	61 102.59	3.337 6	-0.141 6	-0.756 4
4 500	68 740.41	3.271 9	-0.147 2	-0.790 4
5 000	76 378.23	3.309 9	-0.143 8	-0.763 0

地下水埋深增大说明水位下降,输水补给小于蒸散发,地下水埋深减小说明水位上升,输水对地下水产生有效补给。年输水量小于4 000万 m³时,输水对地下水的补给作用从2020年开始大于蒸散发作用,H4~H6监测井的地下水埋深逐年明显减小;年输水量为4 500万 m³时输水对地下水的补给作用远大于蒸散发作用,据此获得年输水量4 500万 m³是地下水响应的有效水量(表4)。地下水响应范围及双阶段输水的累积效应研究均以有效水量4 500万 m³为例进行分析,年输水量大于4 500万 m³的其

他方案的变化趋势与之相同。

表4 不同观测井有效水量的地下水埋深变化量

Table 4 Groundwater depth change of effective water quantity in different observation wells

年份	地下水埋深变化量/m					
	H1	H2	H3	H4	H5	H6
2018	-0.004 8	-0.562 2	-0.883 8	-1.407 9	-1.522 9	-1.115 2
2019	-0.008 3	-0.014 2	-0.027 4	0.093 5	0.067 3	-0.241 6
2020	-0.043 4	-0.107 0	-0.144 4	-0.190 6	-0.234 8	-0.272 3
2021	-0.034 9	-0.092 7	-0.127 6	-0.174 5	-0.217 0	-0.243 0
2022	-0.025 9	-0.068 4	-0.093 7	-0.131 5	-0.168 1	-0.194 9
2023	-0.020 3	-0.054 0	-0.074 2	-0.104 0	-0.132 8	-0.157 5
2024	-0.015 6	-0.041 4	-0.057 0	-0.079 8	-0.102 9	-0.126 8
2025	-0.013 7	-0.037 1	-0.051 2	-0.073 1	-0.095 4	-0.112 1
2026	-0.011 5	-0.031 0	-0.042 7	-0.060 5	-0.079 9	-0.095 3
2027	-0.010 0	-0.026 8	-0.037 0	-0.052 5	-0.069 6	-0.083 1
2028	-0.008 2	-0.021 8	-0.030 0	-0.042 3	-0.056 6	-0.070 0
2029	-0.008 1	-0.022 2	-0.030 6	-0.044 3	-0.058 0	-0.066 3
年均 变化量	-0.019 2	-0.049 4	-0.068 5	-0.081 5	-0.109 0	-0.159 6
累积 变化量	-0.191 8	-0.494 4	-0.685 2	-0.815 3	-1.089 7	-1.596 5

3.1.2 单阶段输水时长的确定

以确定输水时长为目标,固定有效水量4 500万 m³,变化输水时长6~10月进行输水模拟,各月份输水连续无间隔,模拟不同输水时长的单阶段输水条件下阿拉干断面地下水埋深如图2所示。从年均地下水埋深来看,输水时长10月时地下水埋深在2021年已小于3 m,而输水时长6月时的地下水埋深在输水10 a后仍然大于3 m;就累积效应变化速率而言,输水时长10月的年均埋深抬升量在2022年开始逐渐下降至小于输水时长6月的年均埋深抬升量,累积效应变化速率减小得比输水时长6月时快。由此得出短期内年输水量不变的情况下,地下水对减小水头延长输水时长响应更显著,此输水情景下输水产生的累积效应更明显。

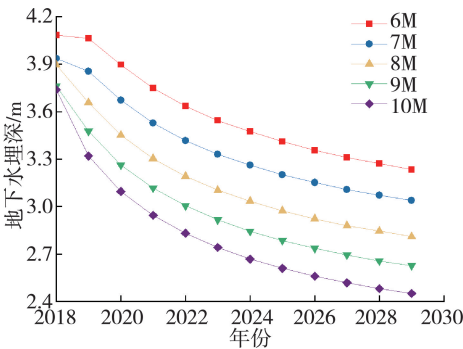


图2 单阶段输水情景不同输水时长的地下水埋深
Fig.2 Groundwater depth for different transportation durations of single-stage water delivery scenarios

3.2 双阶段输水的累积效应

3.2.1 双阶段输水时长的确定

以确定双阶段输水的输水时长为目标,固定年输水量为有效水量4500万 m^3 ,固定输水间隔 N 月,变化输水时长 Z 月,断面流量根据不同河段耗水量所占下泄水量比例及水量平衡计算,进行情景模拟得到输水间隔为1月、2月和3月时的地下水埋深变化如图3所示。由图可知,总输水量、输水间隔不变时,较长的输水时间与较短的输水时间对地下水的抬升作用在2019年差异最显著,随着输水次数增长,较长输水时间的累积变化量与较短输水时间的累积变化量差异逐渐减小,但地下水对较长时间输水的响应仍然十分显著。由此可以得出,输水总量和输水间隔不变的情况下,减小输水流量、延长输水时间产生的累积效应更加显著,输水对地下水的补

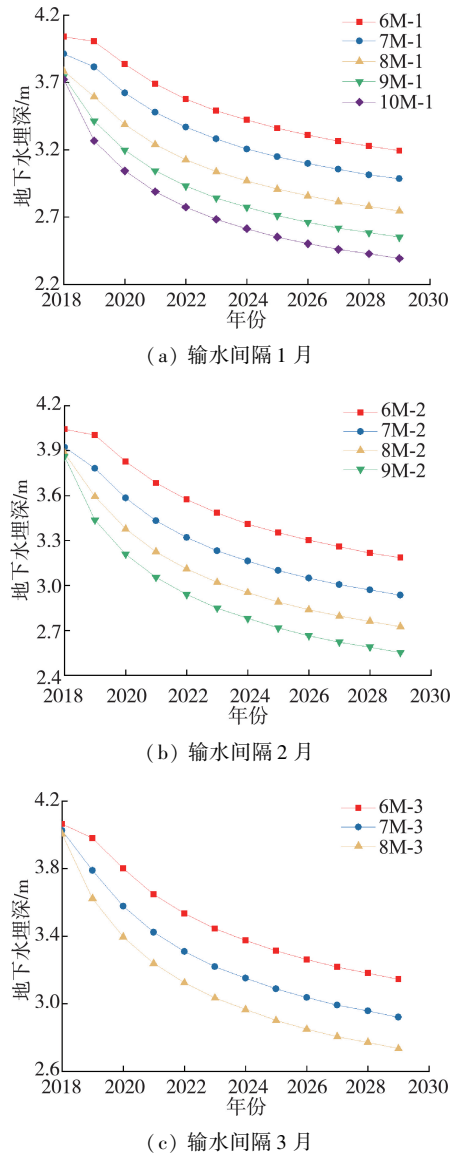


图3 双阶段输水情景不同输水时长的地下水埋深
Fig.3 Groundwater depth for different water delivery time intervals of two-stage water delivery scenarios

给时间延长,对地下水的抬升作用更明显,地下水埋深可大幅度减小。

3.2.2 输水间隔的确定

以确定双阶段输水的输水间隔为目标,固定输水总量4500万 m^3 和输水时长 Z 月,变化输水间隔 N 月,根据累积效应的滞后性,输水间隔不应超过3月。进行输水情景模拟得到不同输水间隔下地下水埋深的变化(图4)。

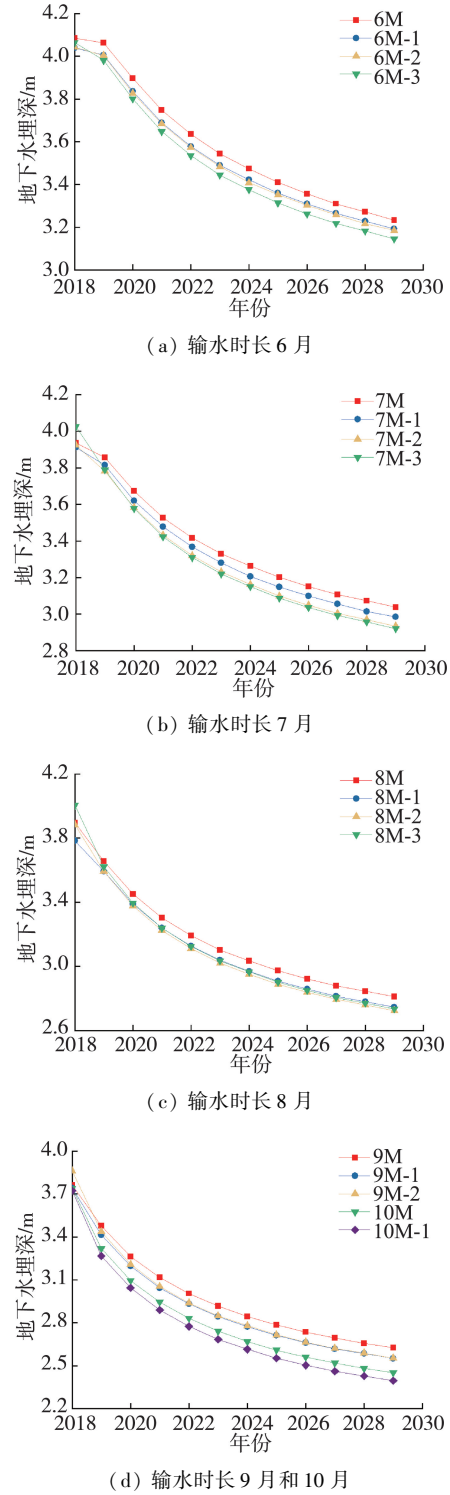


图4 不同输水间隔的地下水埋深
Fig.4 Groundwater depth for different water delivery intervals

对输水时长 6 月和 7 月来说,总输水量、输水时长不变时,输水间隔越长,累积效应越显著,输水间隔为 3 月时,累积效应变化速率对应的地下水位抬升速率、累积 10 a 变化量分别为 0.154 5 m/a、0.173 3 m/a 和 1.068 3 m、0.882 0 m,比输水间隔为 1 月的累积效应变化速率分别提高 2.59%、3.15% 和 8.82%、19.12% (图 4(a)(b));对输水时长 8~9 月来说,不同输水间隔下的累积效应变化速率对应的地下水位抬升速率差别在 0.002 m/a 以内,较长输水间隔的累积抬升量比较短输水间隔的累积抬升量有所提高,地下水埋深差别不大(图 4(c)(d))。2 月和 3 月输水间隔的累积效应变化速率(地下水年均抬升速率)与 1 月输水间隔的累积效应变化速率的差别在 2019—2020 年达到最大,之后变化速率及其差别逐渐减小(图 4(a)(c))。

据此得出,输水总量和输水时长不变时,输水间隔对地下水埋深的影响差别不大,输水间隔越长,累积变化量越大。短期内年输水量和输水时长一定时,双阶段输水采用 2~3 月的输水间隔将会比 1 月输水间隔和无间隔输水产生更显著的累积效应,这是因为第一阶段输水产生的累积效应一直持续到第二阶段输水开始,第二阶段输水产生的累积效应又会维持 2~3 月,累积效应随着输水间隔的出现和扩大被充分利用。

3.3 有效水量输水后地下水位变化量的分布情况

以年输水量 4 500 万 m^3 、输水期 4—9 月、无间隔单阶段连续输水情景为例,分析地下水对有效水量输水后的时空响应。

3.3.1 地下水埋深分布

流域地面高程与 2028 年输水后(2028 年 10 月 1 日)含水层地下水位相减得到如图 5 所示的地下水埋深等水位线分布图,埋深在 2~12 m 范围内变化,地下水埋深为 2 m 的等水位线沿河道大致对称分布,主要分布在河道两侧 700~1 500 m 范围内,地下水埋深为 4 m 的等水位线分布在河道两侧 900~1 700 m 范围内,地下水埋深为 6 m 的等水位线分布在河道两侧 1 400~2 200 m 范围内,地下水埋深为 8 m 的等水位线分布在河道两侧 2 000~3 400 m 范围内。

3.3.2 地下水位变化量分布

各阶段输水前后地下水等水位线图相减得到输水后地下水位变化量(图 6),变化量等值线沿河道对称分布,2020 年、2024 年、2028 年地下水位变化量分别集中在 0~1.17 m、0~0.45 m 和 0.1~0.35 m 范围内。累积 10 a 地下水位变化量(图 7)在 1~6 m 范围内。

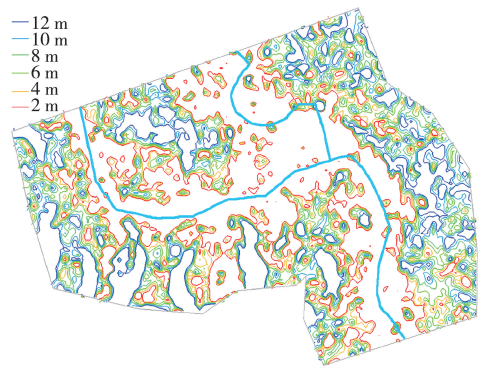
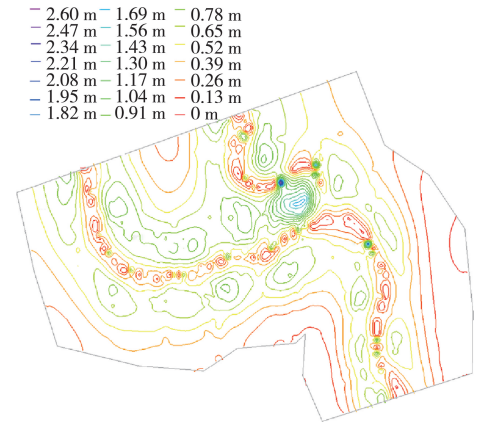
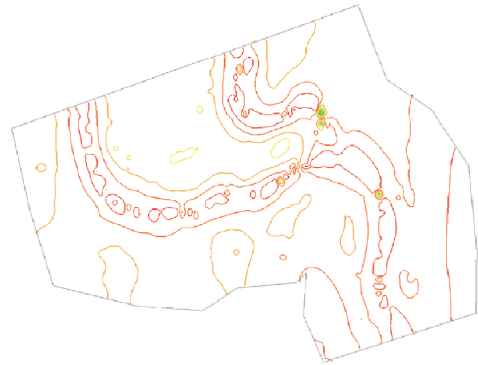


图 5 有效水量输水后地下水埋深等值线分布
Fig.5 Distribution of groundwater depth contours after effective water delivery



(a) 2020 年



(b) 2024 年



(c) 2028 年

图 6 有效水量输水后地下水位变化量等值线分布
Fig.6 Distribution of groundwater level change contours after effective water delivery

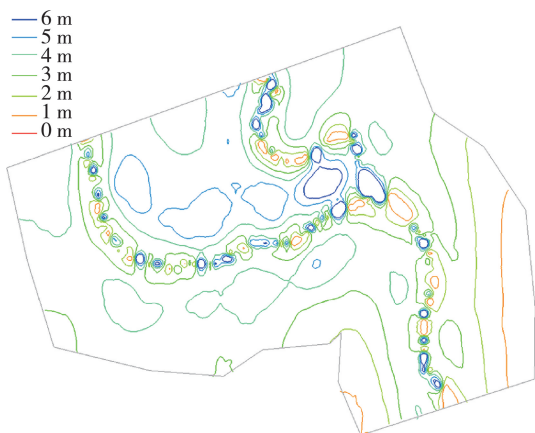


图7 累积10 a 地下水位变化量等值线分布

Fig.7 Distribution of ten-year cumulative groundwater level change contours

表5 为各阶段输水后主要地下水位抬升量与距河道距离的响应关系,2020 年地下水位抬升量在 0.5 m 左右,距河道的最大响应距离为 4 000 m;2022 年、2024 年、2026 年和 2028 年地下水位抬升量主要在 0.25 m 左右,距河道的最大响应距离达 3 800 m;累积 10 a 的地下水位抬升量主要在 3 ~ 6 m 范围内,距河道的最大响应距离为 1 000 m。

表5 有效水量输水后地下水位变化量的响应距离

Table 5 Response distance of groundwater change after effective water delivery

年份	地下水位 变化量/m	响应距离/m			最大响应 距离/m
		老塔里 木河河道	其文阔尔 河河道	塔里木河 河道	
2020	0.50	500 ~ 3 000	550 ~ 3 800	550 ~ 1 800	4 000
2022	0.25	450	500	700 ~ 2 600	3 800
2024	0.25	750	900	1 450	2 000
2026	0.25	1 500	1 700	2 400	3 400
2028	0.25	1 800	3 000	3 500	3 500
累积 10 a	3 ~ 6	700	1 000	600	1 000

4 结 论

a. 单阶段输水情景输水总量一定时,减小输水流量、延长输水时长输水效应更显著;双阶段输水情景输水总量一定时,延长输水时长、扩大输水间隔的输水方式产生的累积效应更显著。输水策略的制定对年输水量的要求是不小于有效水量 4 500 万 m^3 ,制定输水策略的原则是在输水总量一定时,延长输水时间和扩大输水间隔。因此,本文所列的输水情景中最佳输水策略是输水时长为 10 月、输水间隔为 1 月的双阶段输水情景中的输水策略。

b. 有效水量输水后,地下水埋深等水位线沿河道大致对称分布,地下水埋深越大,距离河道越远。地下水位变化量等值线沿河道对称分布,且地下水

位变化量和抬升量均随时间推移逐渐降低。

参考文献:

- [1] 王珊珊,王金林,周可法,等. 塔里木河下游土地利用/覆被变化对生态输水的响应[J]. 水资源保护,2021,37(2): 69-74. (WANG Shanshan, WANG Jinlin, ZHOU Kefa, et al. Response of land-use/land cover change to ecological water conveyance in the lower reach of Tarim River[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 69-74. (in Chinese))
- [2] 吴青松,马军霞,左其亭,等. 塔里木河流域水资源-经济社会-生态环境耦合系统和谐程度量化分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 55-62. (WU Qingsong, MA Junxia, ZUO Qiting, et al. Quantitative analysis on harmony degree of water resources-economic society-ecological environment coupling system in the Tarim River Basin[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 55-62. (in Chinese))
- [3] 薛联青,王晶,魏光辉. 基于 PSR 模型的塔里木河流域生态脆弱性评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019,47(1): 13-19. (XUE Lianqing, WANG Jing, WEI Guanghui. Dynamic evaluation of the ecological vulnerability based on PSR modeling for the Tarim River Basin in Xinjiang [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019,47(1): 13-19. (in Chinese))
- [4] SHEN Qin, GAO Guangyao, HAN Fei, et al. Quantifying the effects of human activities and climate variability on vegetation cover change in a hyper-arid endorheic basin [J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(10): 3294-3304.
- [5] ZENG Yong, ZHAO Chengyi, LI Junli, et al. Effect of groundwater depth on riparian plant diversity along riverside-desert gradients in the Tarim River[J]. Journal of Plant Ecology, 2019, 12(3): 564-573.
- [6] 薛联青,杨帆,杨昌兵,等. 外界胁迫作用下塔里木河流域径流变化响应的敏感性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 1-6. (XUE Lianqing, YANG Fan, YANG Changbing, et al. Sensitivity analysis of the streamflow alteration subjected to climate changes and anthropogenic activities in the Tarim River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(1): 1-6. (in Chinese))
- [7] 孔子洁,邓铭江,凌红波,等. 塔里木河下游河道断流区生态安全评估与生态恢复对策[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1128-1139. (KONG Zijie, DENG Mingjiang, LING Hongbo, et al. Ecological security assessment and ecological restoration countermeasures in the dry-up area of the lower Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1128-1139. (in Chinese))

(下转第 77 页)

496. (ZHANG Danwu, CONG Zhentao, NI Guangheng. Comparison of three Mann-Kendall methods based on the China's meteorological data [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(4): 490-496. (in Chinese))
 - [35] 杨扬, 杨启东, 王芝兰, 等. 中国区域陆气耦合强度的时空分布特征[J]. 干旱气象, 2021, 39(3): 374-385. (YANG Yang, YANG Qidong, WANG Zhilan, et al. A study of spatial and temporal distribution of land-atmosphere coupling strength in China [J]. Arid Meteorology, 2021, 39(3): 374-385. (in Chinese))
-
- (上接第 30 页)
- [8] 李丽君, 张小清, 陈长清, 等. 近 20a 塔里木河下游输水对生态环境的影响[J]. 干旱区地理, 2018, 41(2): 238-247. (LI Lijun, ZHANG Xiaoqing, CHEN Changqing, et al. Ecological effects of water conveyance on the lower reaches of Tarim River in recent twenty years [J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2): 238-247. (in Chinese))
 - [9] 廖淑敏, 薛联青, 陈佳澄, 等. 塔里木河生态输水的累积生态响应[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 120-126. (LIAO Shumin, XUE Lianqing, CHEN Jiadeng, et al. Cumulative ecological response of ecological water transmission in Tarim River [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 120-126. (in Chinese))
 - [10] MIAO Ning, JIAO Peipei, TAO Wenjing, et al. Structural dynamics of *Populus euphratica* forests in different stages in the upper reaches of the Tarim River in China [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 3196.
 - [11] 贾俊姝, 孟悦, 戴俊生, 等. 生态输水对塔里木河下游地下水时空分布特征的影响[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2016, 37(5): 81-90. (JIA Junshu, MENG Yue, DAI Junsheng, et al. Affect on characteristic of groundwater spatial and temporal distribution after ecological water transport in the lower reaches of Tarim River [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2016, 37(5): 81-90. (in Chinese))
 - [12] 邓铭江, 杨鹏年, 周海鹰, 等. 塔里木河下游水量转化特征及其生态输水策略[J]. 干旱区研究, 2017, 34(4): 717-726. (DENG Mingjiang, YANG Pengnian, ZHOU Haiying, et al. Water conversion and strategy of ecological water conveyance in the lower reaches of the Tarim River [J]. Arid Zone Research, 2017, 34(4): 717-726. (in Chinese))
 - [13] 刘迁迁, 古力米热·哈那提, 王光焰, 等. 间歇性生态输水塔里木河下游断面地下水位变化模拟[J]. 生态学报, 2018, 38(15): 5519-5528. (LIU Qianqian, GULIMIRE·Hanati, WANG Guangyan, et al. Simulation of sectional groundwater level variation in the lower reaches of Tarim River under intermittent ecological water conveyance [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15): 5519-5528. (in Chinese))
 - [14] 薛联青, 魏卿, 魏光辉. 塔里木河干流地表水与地下水耦合模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 195-201. (XUE Lianqing, WEI Qing, WEI Guanghui, et al. Coupled simulation of surface water and groundwater in the main stream of Tarim River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(3): 195-201. (in Chinese))
 - [15] 刘迁迁, 古力米热·哈那提, 苏里坦, 等. 塔里木河下游河岸带地下水埋深对生态输水的响应过程[J]. 干旱区地理, 2017, 40(5): 979-986. (LIU Qianqian, GULIMIRE·Hanati, SU Litan, et al. Response process of groundwater table to ecological water conveyance in the lower reaches of Tarim River riparian zone [J]. Arid Land Geography, 2017, 40(5): 979-986. (in Chinese))
 - [16] 薛联青, 廖淑敏, 刘远洪, 等. 基于地下水动态模拟的生态输水累积效应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(4): 322-328. (XUE Lianqing, LIAO Shumin, LIU Yuanhong, et al. Cumulative effects of ecological water conveyance based on groundwater dynamic simulation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(4): 322-328. (in Chinese))
 - [17] 王希义, 徐海量, 潘存德, 等. 2000—2014 年塔里木河下游地下水补给量及合理需求量[J]. 水资源保护, 2017, 33(4): 32-39. (WANG Xiyi, XU Hailiang, PAN Cunde, et al. Study on groundwater recharge amount and suitable demand amount in lower reaches of Tarim River from 2000 to 2014 [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(4): 32-39. (in Chinese))
 - [18] 白元, 徐海量, 张青青, 等. 基于地下水恢复的塔里木河下游生态需水量估算[J]. 生态学报, 2015, 35(3): 630-640. (BAI Yuan, XU Hailiang, ZHANG Qingqing, et al. Evaluation on ecological water requirement in the lower reaches of Tarim River based on groundwater restoration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3): 630-640. (in Chinese))
 - [19] LIAO S M, XUE L Q, DONG Z C, et al. Cumulative ecohydrological response to hydrological processes in arid basins [J]. Ecological Indicators, 2020, 111: 1-14.
 - [20] 肖斌, 许模, 曾科, 等. 基于 Modflow 的岩溶管道概化与模拟探讨[J]. 地下水, 2014, 36(1): 53-55. (XIAO Bin, XU Mo, ZENG Ke, et al. Study on karst conduit generalization and simulation [J]. Ground Water, 2014, 36(1): 53-55. (in Chinese))
- (收稿日期: 2022-01-01 编辑: 俞云利)