

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222494

塔里木河干流中游典型生态闸补水效应研究

冯思阳^{1,2}, 杨鹏年¹, 张胜江³, 崔瑞³, 周龙¹, 洪辉⁴

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 南京水利科学研究院
水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 3. 新疆水利水电科学研究院,
新疆 乌鲁木齐 830049; 4. 新疆塔里木河流域管理局, 新疆 库尔勒 841000)

摘要: 为探究塔里木河流域内生态闸补水效应, 运用 MODFLOW 建立乌斯满断面地下水剖面二维流运动的数值模拟, 拟合了区域内 4 年的地下水流场演变过程, 并在此基础上针对有无生态闸输水的两种方案进行了预测与对比。结果表明, 两种预测方案下的第 5 年, 使用生态闸输水的方案较单一的主河道输水, 研究区小于 8 m 的埋深面积增加 6.62%; 生态闸集中恢复了远离主河道生态区域的地下水位, 断面北侧的地下水位平均抬升了 2~3 m; 使用生态闸的方案相比单一的主河道输水, 每立方米地下水存储量的增量所消耗的潜水蒸发量减少了 24.6%。生态闸解决了传统输水模式下远离主河道生态区域地下水位难以恢复的问题, 为中游多处汉口形成的河网地块生态系统的恢复及干流沿线生物多样性的安全带创造了条件。

关键词: 生态闸; 地下水位; MODFLOW; 塔里木河中游

中图分类号: TV211.1⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)10-0036-05

1 工程概况

1990 年代, 为解决塔里木河下游断流等问题, 修建了贯穿中下游的堤防和生态闸, 改变了塔里木河天然河道的水文过程, 两岸的天然植被主要通过生态闸放水提供^[1]。生态闸作为塔里木河流域特有的水资源调控手段, 目的是扩大生态输水对地下水的影响范围, 维护干流外侧生态区域的植被生长。为评估塔里木河干流中游生态闸输水效应, 围绕着塔里木河干流生态闸相关内容进行了深入研究, 如黄粤等^[2]运用 FloodArea 建立了塔里木河干流小尺度分布式水位模型, 较好地模拟了生态闸的洪水漫溢过程; 陈永金等^[3]从地下水埋深、地下水水质、植被恢复的角度分析了生态闸建设对流域生态保护与修复的积极影响; 刘荣华等^[4]建立了以种业优化和基于生态需水的塔里木河流域水量优化调度模型, 提出了以生态需水量和生态需水警戒级别为基础的生态闸轮灌机

制。塔里木河干流夏代闸—依兰力克闸间区段距离 8 km, 并与北侧的帕台木河构成了一个封闭的河网, 是塔里木河中游生态闸后水量调控与植被恢复的典型区域, 该区域位于塔里木河中游英巴扎—哈拉河段, 距离上游英巴扎水文站 180 km, 距离下游哈拉站 219 km(图 1)。区域内塔里木河主河道长 25 km, 水面宽 80~120 m, 河道弯曲, 泥沙淤积, 河床不断抬升, 致使洪水漫溢, 无效耗水严重^[5], 加之人为扒口, 使中游河段形成众多汉口^[6]。北侧帕台木河宽 20 m, 与塔里木河主

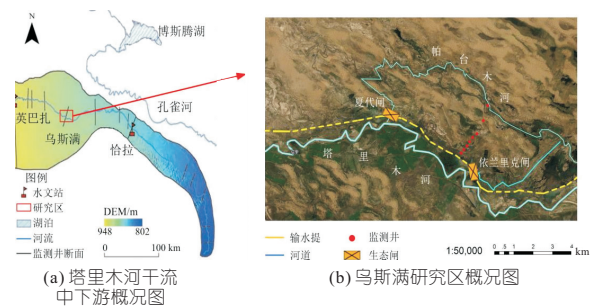


图 1 研究区概况图

Fig. 1 Overview of study area

收稿日期: 2022-11-28, **修回日期:** 2023-01-06

基金项目: 科技部第三次新疆综合科学考察项目(2021XJKK0203); 国家自然科学基金项目(U2003105); 新疆维吾尔自治区塔里木河流域管理局项目(TGJJG-2020KYXM0002); 新疆维吾尔自治区水利科技专项项目(XSKJ-2021-07); 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室研究项目(ZDSYS-YJS-2021-10)

作者简介: 冯思阳(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水文学及水资源, E-mail: 3050357585@qq.com

通讯作者: 杨鹏年(1966-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为水文学及水资源, E-mail: ypn10@163.com

河道大致呈平行状,主河道上游左岸为夏代闸,下游左岸为依兰里克闸,两闸均用于河岸带的生态供水,两闸每年洪水季放水至北侧帕台木河。乌斯满监测断面位于两闸之间,断面距主河道依次存在 D1~D8 八口监测井。本文以塔里木河流域干流中游夏代闸、依兰里克闸控制的生态区域作为典型区域,基于历年生态闸输水水量、河道两岸地下水等数据建立地下水数值模拟模型,通过对比使用生态闸与不使用生态闸两种输水方案,分析评估了生态闸补水的环境效应,为进一步优化生态闸输配水方案,提高生态水量配置和利用效率提供技术支撑。

2 研究资料与方法

2.1 资料来源

水文观测数据与地下水监测数据源于塔里木河流域管理局,波温比气象数据源于新疆水利水电科学研究院。

(1)地形数据。研究区 30 m 分辨率高程数据。

(2)水文观测数据:①乌斯满水文站地表水监测数据(塔里木河主河道月径流量)。②夏代闸、依兰里克闸逐月引水资料。

(3)地下水监测数据。乌斯满断面逐日地下水埋深数据。

(4)气象数据。乌斯满研究区波温比逐日气象数据。

2.2 关键参数的处理

2.2.1 主河道来水量计算

研究区主河道末端为乌斯满水文站,其测得的月径流量作为模型的流出量,再根据英巴扎—乌斯满河损数据(表1),可计算出各典型年单位

表 1 2016~2019 年英巴扎—乌斯满 180 km 区间耗损统计

年份	interval loss statistics				m ³
	区间损耗	农业放水	生态放水	河道净耗水量	
2016	186 651	14 367	101 808	70 477	
2017	313 015	22 325	223 317	67 373	
2018	100 863	22 536	51 886	26 440	
2019	118 315	20 881	59 689	37 745	

河损系数,研究区主河道为 25 km,可反推出研究区来水量的大小。河道来水量利用布设至河道各监测断面的数据分析,基于水量平衡原理,采用以下关系式表达:

$$\Delta W = W_1 - W_2 - W_3 - W_4 \quad (1)$$

$$k = \Delta W / L \quad (2)$$

式中,ΔW 为监测断面间的区间河道净耗水量;W₁ 为河道上断面的来水量;W₂ 为河道下断面的

流出量;W₃ 为断面间农业放水量;W₄ 为断面间生态放水量;L 为两断面间的河道长度;k 为单位河长耗水率。

2.2.2 潜水蒸发系数计算

由于研究区潜水埋深较浅,气候炎热干燥,潜水蒸发成为塔里木河主要的排泄途径。植被蒸散所消耗的水分来源于土壤水和饱和带水分向非饱和带转化的水分(即潜水蒸发,也称为地下水利用量)。本文通过 P-M 公式计算得到不同生育期下植被(怪柳、胡杨、草本植物及荒漠植被)蒸散量。在给定土壤和植被条件下,潜水蒸发量主要与潜水埋深和植被蒸散量有关。定义植被蒸散量与潜水蒸发量的比为潜水利用系数,三者之间的关系采用如下简单公式确定^[7-8],即:

$$\begin{cases} E_{g\text{怪柳}} = \frac{1}{(1 + 1.650\ 5H^{1.485\ 8})} E_T \\ E_{g\text{胡杨}} = \frac{1}{(1 + 0.299H^{2.494\ 6})} E_T \\ E_{g\text{草本植物}} = \frac{1}{(1 + 0.322\ 3H^{2.293\ 5})} E_T \end{cases} \quad (3)$$

式中,E_g 为不同深度下潜水蒸发量;H 为潜水埋深;E_T 为不同植被类型蒸散量。

塔里木河中游区域荒漠土类型,主要以轻壤土为主,故计算得到的潜水蒸发主要依据胡顺军等^[9]的公式:

$$\begin{cases} E = E_{\max} (1 - e^{-iE_0}) \\ E_{\max} = \frac{0.016\ 6H - 0.001\ 8}{0.030\ 4H^2 - 0.006\ 7H} \\ i = 0.030\ 3H^3 - 0.249\ 3H^2 + 0.576H - 0.086\ 5 \end{cases} \quad (4)$$

式中,E 为不同埋深下潜水蒸发强度;E_{max} 为潜水蒸发极限强度;i 为经验常数,与土质、潜水埋深有关;E₀ 为埋深等于 0 时的潜水蒸发强度;H 为地下水埋深。

模型中采用分区赋值的方法,划分依据为河道附近的林地草地和远离河道的荒漠地区,按不同的土地类型分区赋值(图 2),极限蒸发埋深取 4 m,不同土地类型所用的潜水蒸发系数见表 2。

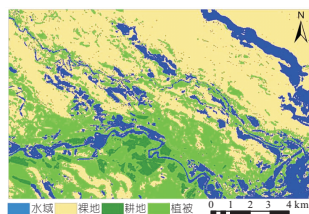


图 2 乌斯满研究区土地分类

Fig. 2 Land classification of Usman Study Area

表 2 荒漠及林地、草地不同月份的潜水蒸发系数

Tab. 2 Diving evaporation coefficient of desert, forest and grassland in different months mm/d

土地类型	埋深 /m	1~4、10~12月	5月	6月	7月	8月	9月
荒漠	0	0.055	0.107	0.198	0.358	0.428	0.301
	1	0.174	0.173	0.171	0.167	0.166	0.169
	2	0.090	0.090	0.089	0.087	0.086	0.088
	3	0.041	0.040	0.040	0.039	0.039	0.040
	4	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023
林地、草地	0	0.082	1.534	2.199	2.512	2.654	1.635
	1	0.612	0.689	0.677	0.655	0.647	0.666
	2	0.298	0.325	0.321	0.313	0.310	0.317
	3	0.151	0.163	0.161	0.158	0.157	0.160
	4	0.086	0.094	0.093	0.091	0.090	0.092

2.2.3 漫溢入渗

洪水淹没范围主要根据各典型年生态闸放水后的土地利用类型,将水域边界认定为漫溢区淹没边界。随着洪水季的到来,生态闸同时开闸放水,漫溢区的形成时间与生态闸放水时间一致。根据区域内波纹比气象数据及塔里木河流域水面蒸发折算系数^[10],可计算出逐月综合蒸散发数据(表 3),模型中漫溢区的水量入渗及水面蒸发运用 LAKE 包进行模拟。

表 3 不同月份的综合蒸散发系数

Tab. 3 Diving evaporation coefficient in different months mm

月份	综合蒸散发	月份	综合蒸散发
1	0.128	7	2.545
2	0.311	8	1.579
3	0.869	9	1.502
4	1.713	10	0.675
5	2.562	11	0.222
6	3.120	12	0.043

2.3 基于 MODFLOW 的地下水数值模拟

2.3.1 模型构建

模型构建过程如下步骤:①空间离散。根据研究区的面积大小、水系分布和水文地质特征等,采用网格划分方法。水平方向上,模拟区域被均匀分割成 680 行、456 列的 30 m×30 m 正方形网格,有效单元格数为 310 080 个,有效模拟面积为 323.48 km²。②时间离散。考虑到数据的完整性,根据获取的地下水位埋深观测资料,选择 2016 年 1 月 1 日~2019 年 12 月 31 日作为模型的校正识别期,以月为单位共分为 48 个应力期,每个应力期内划分为 1 个时间步长,每个时间步长为模型自动控制。在每个应力期内,所有补给项、排泄项强度维持不变。③边界条件。模型南北边界为荒漠区,边界侧向流动较弱,设为不透水边界;西边界为其河与老塔河的河道流入,设为第二类侧向流入边界;东边界概化为侧向流出边界。

上部边界为潜水,接受河道的入渗补给;下部边界为相对隔水边界。④源汇项的处理。研究区地下水补给来源主要依靠河道输水和漫溢入渗,河流一地下水之间的补给与排泄关系取决于河水与地下水之间的水力梯度方向;地下水的排泄主要是通过叶面蒸腾与潜水蒸发。模型中主要利用 Stream、LAKE、Evapotranspiration 模块模拟上述运动,其中 Stream 模拟河水与地下水之间的交换,依据干流断面月径流量数据和生态闸输水时间,概化出不同应力期日均主河道来水量及生态闸输水量;LAKE 模拟漫溢区表层水与地下水之间的转换;Evapotranspiration 通过定义蒸发系数与埋深之间的关系来计算蒸散量。

2.3.2 模型率定

模型主要采取试估校正方法进行调整,调整好的模型能较真实反映研究区地下水流场特点。模型的精度受人为因素及区域研究水平、相关资料完整程度等影响,因此数值模型是通过宏观、趋势性的角度对研究区进行模拟及预测。本研究区模型模拟了 2016~2019 年夏代闸—依兰里克闸区间的地下水演变过程,其中 D2、D5 监测井地下水位拟合见图 3。

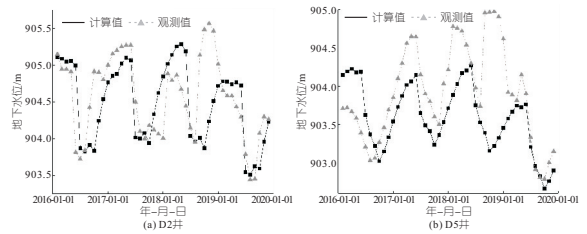


图 3 监测井地下水位动态拟合图

Fig. 3 Dynamic fitting diagram of groundwater level of monitoring well

2.3.3 地下水均衡

由率定期的水均衡分析结果可知,河道入渗量为研究区最大的地下水补给来源;潜水蒸发是区内主要的地下水排泄途径。模型整体水量平衡,2016~2018 年呈正均衡,说明研究区地下水位整体呈上升趋势,2019 年呈负均衡,说明研究区地下水位整体呈下降趋势,与实际监测并观测的情况一致,说明模型的各项参数取值合理。

2.4 预测方案设计

根据研究区水文地质条件,在水文地质条件不变的情况下拟定两种方案,即:①方案 1。仅通过塔里木河传统的主河道输水方式;②方案 2。采用主河道+生态闸输水的方式,生态闸引水量为 2016~2019 年的均值,输水时间为每年的 8~10 月。以 2019 年作为现状年,分别对两种方案

运用模型预测 5 年,采用监测井所处地下水位变化趋势及研究区水量转换效率对比,来阐述生态闸的输水效应。

3 结果与分析

3.1 地下水位对比

运用 MODFLOW 分别预测了两种方案未来 5 年的地下水流场变化趋势,根据模型预测结果,以远离主河道的 D7、D8 监测井为例,得到 5 年间监测井预测水位的变化曲线见图 4。由图 4 可看出,方案 1 中监测井所处的地下水位整体呈略微上升趋势,变化范围在 1 m 以内,方案 2 则有较大的变幅,地下水位明显抬升,变化范围在 3 m 左右,靠近北侧河网 D8 所处的地下水位随逐年生态闸的放水,呈峰谷变化趋势。以乌斯满断面为例,绘制两种方案第 5 年生态闸放水后的地下水位分布(图 5)可知,方案 2 相比方案 1 大幅提高了断面北侧的地下水位,扩大了生态水的影响范围, D7、D8 监测井所处的地下水位分别抬升了 2、3 m。说明在来水量相同的情况下,使用生态闸可扩大塔里木河对主河道以外 2 km 生态区域地下水的的影响范围。

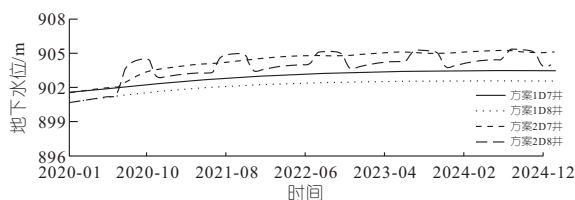


图 4 方案 1、2 监测井地下水位预测曲线

Fig. 4 Scheme 1 and 2 monitoring well groundwater level prediction curve

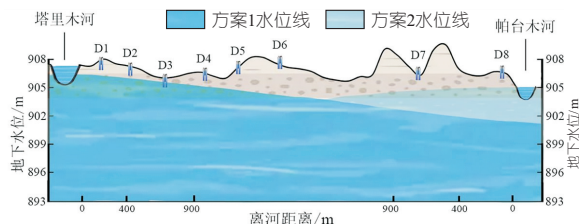


图 5 两种方案预测下第 5 年 10 月末乌斯满断面地下水位分布

Fig. 5 Groundwater level distribution of Usman section at the end of October in 5th year predicted by two schemes

3.2 地下水埋深对比

绘制预测第 5 年生态闸放水后的地下水位等值线,得到两者差值水位的升降图(图 6)。由图 6 可知,方案 2 相比方案 1 集中提高了主河道北侧河网生态区域的地下水位,扩大了塔里木河生态水对地下水的影响范围。通过比较不同输水方案

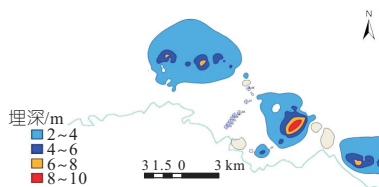


图 6 两种方案预测第 5 年 10 月末埋深的插值图

Fig. 6 Interpolation diagram of two schemes to predict the buried depth at the end of October in the fifth year

下第 5 年输水后研究区地下水浅埋深面积的大小可知,使用生态闸输水的方案相比单一的主河道输水方案,研究区小于 8 m 的埋深面积增加 6.62%,其中 0~2、2~4、4~6、6~8 m 的埋深区域分别提升了 1.60%、2.25%、1.76%、1.01%,综合说明在来水量相同的情况下,使用生态闸可提高主河道以外生态区域的地下水浅埋深面积。

3.3 水量转换效率对比

通过比较不同输水方案下第 5 年全年研究区潜水蒸发量及地下水存储量(表 4)可知,由于地下水位的抬升,主河道+生态闸输水方案下的潜水蒸发量较大,其中方案 1、2 相比现状年地下水存储量分别增加了 0.012×10^8 、 $0.045 \times 10^8 \text{ m}^3$;两种方案每立方米地下水存储量的增加所消耗的潜水蒸发量分别为 36.12、23.63 m^3 ,方案 2 每立方米消耗的蒸发量减少了 8.89 m^3 。说明相比单一的主河道输水,使用生态闸的方案能减小无效蒸发的比例,有利于生态水对地下水的补给,提高了生态水的转化效率。

表 4 两种输水方案下第 5 年全年水量耗散统计

Tab. 4 Statistical of water dissipation in the fifth year under two water conveyance schemes

输水方式	潜水蒸发量 $E/10^8 \text{ m}^3$	地下水存储量的 增量 $\Delta S/10^8 \text{ m}^3$	$E/\Delta S$
主河道	0.614	0.017	36.12
主河道+生态闸	0.847	0.031	27.32

4 结论

运用 Processing MODFLOW 建立了乌斯满断面地下水流运动数值模型,针对使用生态闸与不使用生态闸两种输水方案分别进行 5 年预测与对比,确定生态闸能有效抬升主河道以外生态区域的地下水位,扩大塔里木河生态水的影响范围,提高与地下水的转化效率。

参考文献:

- [1] 陈曦,黄粤,钱静,等. 干旱区内陆河漫溢型生态用水调控的模拟分析——以塔里木河干流灿木里克

生态区为例[J]. 中国科学(D辑:地球科学),2006, 36(增刊2):1-8.

[2] 黄粤, 陈曦, 钱静, 等. 塔里木河干流生态闸洪水漫溢过程分布式水文模拟——以灿木里克生态闸为例[J]. 自然资源学报, 2007(1):37-43.

[3] 陈永金, 李卫红, 陈亚宁, 等. 塔里木河流域综合治理的生态效应[J]. 中国环境科学, 2007, 27(1):24-28.

[4] 刘荣华, 魏加华, 陈志祥, 等. 塔里木河流域水量调度优化模型研究[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(1):26-30.

[5] 王延贵, 胡春宏, 周文浩, 等. 塔里木河干流的河床演变特点[J]. 水利学报, 2003(12):27-33.

[6] 史秀英, 李勇, 孙卫刚, 等. 塔里木河中游河段水文要素分析——以乌斯满河口上下游河段为例[J]. 干旱区地理, 2010, 33(3):411-418.

[7] CHEN X, SU Z, MA Y, et al. Estimation of surface energy fluxes under complex terrain of Mt. Qomolangma over the Tibetan Plateau[J]. *Hydrology and earth system sciences*, 2013, 17(4):1607-1618.

[8] ROOHI R, WEBB J A, ZALAMEDA J N, et al. Thermal and visible remote sensing for estimation of evapotranspiration of rainfed agrosystems and its impact on groundwater in SE Australia[C]//SPIE, 2016: 98610A.

[9] 胡顺军, 康绍忠, 宋郁东, 等. 塔里木盆地潜水蒸发规律与计算方法研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2):49-53.

[10] 胡顺军, 田长彦, 宋郁东, 等. 塔里木河流域水面蒸发折算系数分析[J]. 中国沙漠, 2005(5):649-651.

Study on Water Replenishment Effect of Typical Ecological Gates in the Middle Reaches of Tarim River

FENG Si-yang^{1,2}, YANG Peng-nian¹, ZHANG Sheng-jiang³, CUI Rui³, ZHOU Long¹, HONG Hui⁴
 (1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;
 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Xinjiang Research Institute of Water Resources and Hydropower, Urumqi 830049, China; 4. Xinjiang Tarim River Basin Authority, Korla 841100, China)

Abstract: To study on water replenishment effect of ecological gate in the Tarim River Basin, the MODFLOW was used to establish the numerical simulation of the two-dimensional flow movement of the groundwater profile in the Wusiman section, and to analyze the evolution process of the groundwater flow field in 4 years. On this basis, the two schemes with or without ecological sluice were predicted and compared. The results show that in the fifth year under the two prediction schemes, compared with the single main river channel, the buried depth area less than 8 m in the study area increased by 6.62% by using the ecological sluice water conveyance scheme. The ecological gates restored the groundwater level far away from the ecological area of the main river channel, and the groundwater level on the north side of the section increased by 2-3 m on average. Compared with the single main channel water conveyance, the phreatic evaporation consumed by the increment of groundwater storage per cubic meter was reduced by 24.6%. The ecological sluice solves the problem that the groundwater level is difficult to recover in the ecological area far away from the main river channel under the traditional water conveyance mode, and creates conditions for the restoration of the river network ecosystem formed by multiple branches in the middle reaches and the safety belt of biodiversity along the main stream.

Key words: ecological gate; groundwater level; MODFLOW; middle reaches of Tarim river

 (上接第 57 页)

Simulation of Influence of Poyang Lake Hydraulic Project on Wetland Vegetation Habitat Based on MIKE 21

WANG Ping^{a,b}, ZHANG Hui-ming^{a,b}, LIN Hao^{a,b}, WANG Su-peng^{a,b}
 (a. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering;
 b. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to analyze the influence of Poyang Lake Water Control Project on wetland vegetation habitat, MIKE21 was used to establish two-dimensional hydrodynamic model of Poyang Lake. Through the scenario of the typical years, the changes of water level and wetland vegetation growth habitat area in the main lake area and wetland nature reserve after the operation of the water conservancy project were simulated. The simulation results show that the operation of the Hydraulic Project has a great influence on the water level in the north of Songmen Mountain, and the influence degree gradually decreases from north to south. The operation of the hub has a great influence on the most suitable area and suitable habitat area of wetland vegetation in different hydrological years. The vegetation habitat surface varies greatly. After the operation of the hub, the dry year increases by 43.8%, the normal year increases by 24.6%, and the wet year is only 16.4%. In October and November, the suitable habitat area can reach more than 2,000 km², accounting for about 2/3 of the total lake area, indicating that wetland vegetation will provide Siberian cranes with rich food sources and make them better survive and reproduce in wetlands. The simulation results reveal the influence of the Hydraulic Project on the change law of lake water level and wetland vegetation habitat interval under the current scheduling scheme, which can provide a theoretical reference for engineering construction and dispatching operation and maintenance.

Key words: Poyang Lake Hydraulic Project; wetland vegetation; hydrodynamic model; habitat area