

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0121

王志鹏,刘建卫,张强,等.三江平原三环泡湿地生态补水效果[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(6):1184-1193.
WANG Z P, LIU J W, ZHANG Q, et al. Ecological water replenishment effect of Sanhuanpao wetland in Sanjiang plain[J].
South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(6): 1184-1193. (in Chinese)

三江平原三环泡湿地生态补水效果

王志鹏,刘建卫,张强,秦国帅

(大连理工大学水利工程学院,辽宁 大连 116024)

摘要:以三环泡湿地保护区为研究对象,在分析湿地需水规律、设计补水位置和补水时段的基础上,确定了4月一次性补水、4—10月逐月按需补水、4月和7月分期补水等3种补水方案,采用MIKE 21模型对相应的补水过程进行模拟计算,并基于补水面积和水深等指标进行补水效果分析。模拟结果表明,3种方案补水面积均增加,其中4月和7月份分期补水方案效果最佳,补水面积较大、水深适宜,同时补水过程可满足三环泡湿地需水过程,能为湿地生物提供适宜生存环境。本研究可为湿地生态补水提供研究方法和决策参考。

关键词:湿地;生态补水;MIKE21;水流演进;补水效果

中图分类号:TV122 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



湿地是分布在水生和陆地生态系统之间的独特自然生态系统^[1],具有调节水文状况、提供珍稀动植物赖以生存的生境、维护区域生态平衡等功能^[2],是人类社会赖以生存和发展的重要自然资源。近几十年来,受围垦、过度开发利用、降雨量减少等因素影响^[3-4],我国东北三江平原地区水资源可利用量大幅减少,湿地内生态用水严重不足,导致湿地面积不断萎缩,退化严重^[5]。

为防止湿地继续退化进而改善湿地的水文条件,对湿地进行生态补水是促进湿地生态恢复的一种重要且有效的方法^[6-7]。湿地生态需水是水资源配置、生态补水方案确定的理论基础和量化手段^[8],不少学者^[9-11]对湿地生态需水进行了研究。目前,在研究湿地生态修复时,更多学者的研究逐渐聚焦于湿地补水方案的确定及其效果评价。魏文涛^[12]计算了马踏湖湿地生态需水量,并结合实际在建工程确定了补水方案;齐云飞^[13]对盘锦湿地生态需水量进行了预测,并根据湿地水资源条件和规划建设的水利工程情况,提出了合理的

生态补水配置方案;高文宏等^[14]通过对向海湿地补水后的功能效益分析,引察济向应急补水高度缓解了湿地缺水状况,恢复了湿地的生态多样性;Duan等^[15]通过对向海湿地和洮儿河灌区的补水效果评价,得出考虑湿地功能和农业灌溉的水资源综合利用方案的效益高于单一方案。

上述研究考虑实际工况分析确定了不同湿地的宏观补水策略,但较多的补水方案仍停留在需补水量的理论化阶段,很少结合湿地需水特点和补水演进过程来分析补水效果进而对补水方案进行优选。针对补水效果的研究多是对补水后的湿地进行效益分析,补水效果后知后觉。湿地补水方式也逐渐由相机补水、有水就补的方式调整为有计划的补水^[16-18],但是运用模型来验证补水措施并分析补水效果的研究还有所欠缺。

针对以上不足,本文基于三环泡湿地需水规律特点计算分析,着重考虑区域内的生态、农业用水可能发生冲突且水资源优先用于农业需求这一实际情况,合理设置补水位置,根据补水时段的不同提出相

收稿日期:2021-01-28 修回日期:2021-07-18 网络出版时间:2021-07-22

网络出版地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210722.1436.006.html>

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0400903);国家自然科学基金项目(51679026)

作者简介:王志鹏(1994—),男,河南鹤壁人,主要从事水文学水资源研究。E-mail:zpwang@mail.dlut.edu.cn

通信作者:刘建卫(1978—),男,河北深州人,副教授,博士,主要从事水文学水资源研究。E-mail:jwliu@dlut.edu.cn

应的补水方案,构建二维水流演进模型来展示其补水过程中与湿地动植物生存相关的水情信息动态变化,分析湿地需水、补水过程的时效性,并借助 GIS 空间统计分析工具对比分析各方案的补水效果进而确定最佳补水方案。本研究力争让有限的生态用水资源得到最大限度的利用,取得更好的补水效果,具有一定的工程应用价值,可为湿地补水规划及方案确定提供参考,为湿地生态修复工作顺利进行提供帮助。

1 区域概况与研究方法

1.1 研究区域概况

三环泡湿地保护区位于黑龙江省三江平原腹地,其地理坐标为 $132^{\circ}12'21''\text{E}\sim 132^{\circ}57'01''\text{E}$, $46^{\circ}45'07''\text{N}\sim 46^{\circ}51'04''\text{N}$ 。保护区沿七星河和挠力河北岸东西向带状延伸,东西长 56 km,南北宽 11 km,总面积为 27 687 hm^2 。保护区属温带湿润大陆性季风气候,四季分明,平均气温 2.7°C ,区内多年平均降水量约 550 mm,多年平均蒸发量约 1 211 mm。区内有大面积沼泽湿地,为珍稀水禽等野生动物提供了良好的隐蔽场所和生存空间。三环泡湿地保护区在生物组成、区系特征和生态系统上均有典型代表性,具有极高的保护价值,见图 1。但是保护区旱象逐年加重,近 30 年来平均气温升高约 0.6°C ,降雨量处于减少趋势且年均蒸发量大于年均降雨量,大面积湿地和河流长期处于干涸状态,加之开垦开荒等人类活动,湿地退化较为严重。



图 1 研究区域位置
Fig. 1 The location of study area

1.2 研究方法

1.2.1 生态需水量计算方法

湿地生态需水量有广义和狭义之分^[6],其中径流性水资源的狭义生态需水量更具有实际补水工程的参考价值。根据湿地生态恢复目标,以水量平衡为基础,结合遥感技术计算生态需水量,计算内容包

含水面蒸发需水量、植被蒸散发需水量、土壤需水量、生物栖息地需水量,扣除天然降雨、径流补给即可得到湿地需补水量。利用 ENVI 5.1 软件平台对研究区遥感影像进行辐射校正、裁剪、波段融合等处理,采用面向对象分类方法进行解译,提取湿地生态需水量计算中不同地类的面积数据。湿地生态需水量计算公式为

$$W_L = W_w + W_p + W_s + W_h - P - W_r \quad (1)$$

式中: W_L 为湿地生态需水量, m^3 ; W_w 为水面蒸发需水量; W_p 为植被蒸散发需水量; W_s 为土壤需水量; W_h 为生物栖息地需水量; P 为降雨补给量; W_r 为径流补给量。 W_w 、 W_p 、 W_s 、 W_h 的计算公式分别为

$$W_w = \sum A_w E_w \times 10^{-3} \quad (2)$$

$$W_p = E_p A_p \times 10^{-3} \quad (3)$$

$$W_s = \alpha \gamma H_s A_s \quad (4)$$

$$W_h = A_h H_h \quad (5)$$

式中: A_w 为湿地水面面积, m^2 ; E_w 为水面蒸发量, mm ; E_p 为植物蒸散发量, mm ; A_p 为湿地沼泽面积, m^2 ; α 为饱和持水量百分比, %; γ 为土壤容重, g/cm^3 ; H_s 为土壤厚度, m ; A_s 为土壤面积, m^2 ; A_h 为湿地水面面积, m^2 ; H_h 为湿地地表平均水深, m 。

1.2.2 补水演进模型

丹麦水力研究所开发的 MIKE 21 平面二维数学模型^[22]基于二维不可压缩流体雷诺平均应力方程,包括连续性、动量、温度、盐度和密度方程,可模拟任何作用力忽略分层的二维自由表面流的水位和面积变化^[23]。鉴于此,依托 MIKE 21 构建补水演进模型,模拟计算三环泡湿地补水演进过程。其控制方程为

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (6)$$

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{h}{r_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} -$$

$$\frac{gh^2}{2r_0} \frac{\partial r}{\partial x} + \frac{t_{xy}}{r_0} - \frac{t_{hx}}{r_0} - \frac{1}{r} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + hu_s S \quad (7)$$

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = -f\bar{u}h - gh \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} -$$

$$\frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{xy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{hy}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S \quad (8)$$

式中: t 为时间; x, y, z 为右手 Cartesian 坐标系; η 为水面相对于未扰动基面的高度, 即水位; h 为静止水深; u, v 为流速在 x, y 方向上的分量; P_a 为当地气压; ρ 为水密度, ρ_0 为参考水密度; $f = 2\Omega \sin\varphi$ 为 Coriolis 参量(其中 $\Omega = 0.729 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 为地球自转角速率, φ 为地理纬度); f_u, f_v 为地球自转引起的加速度; g 为重力加速度; $S_{xx}, S_{xy}, S_{yx}, S_{yy}$ 为辐射应力分量; $T_{xx}, T_{xy}, T_{yx}, T_{yy}$ 为水平黏滞应力; $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{yy}$ 为水面与河床边界水流切应力在 x, y 方向上的分量; S 为源汇项; u_s, v_s 为源汇项水流流速。

2 补水方案分析及补水演进模型构建

2.1 湿地需水规律分析

20 世纪 90 年代末期, 湿地核心区基本保存完好, 湿地生态系统结构及功能处于较好水平, 湿地面积和分布可满足湿地珍稀动植物的生存需求, 一定时期内可以恢复至此状态水平, 因此确定湿地恢复目标为 20 世纪 90 年代末期, 适宜目标湿地面积为 $21\,810 \text{ hm}^2$ ^[11]。采用湿地分级计算法计算恢复目标下 75% 降雨保证率枯水年的三环泡湿地保护区狭义生态需水量, 得到三环泡湿地逐月生态需水量及需水过程, 见图 2。

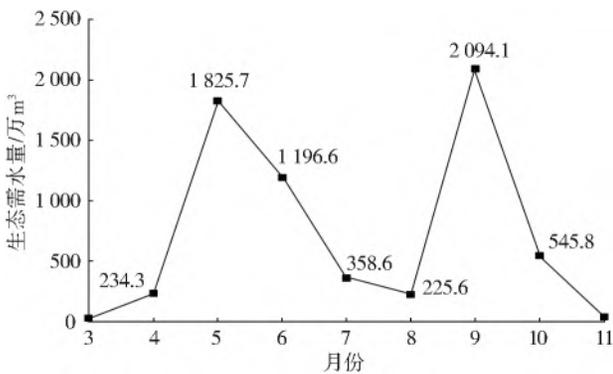


图 2 湿地生态需水过程

Fig. 2 Wetland ecological water demand process

2.2 补水方案设计

合理的补水方案旨依据三环泡湿地的生态需水量理论值, 确保配置的水量能够及时补充到湿地的

不同区域, 使补水面积和水深达到适宜状态, 满足湿地需水过程、为生物提供生存环境。研究区域东西方向长接近 60 km, 若单一位置补水则水体在湿地内的运行时间长, 水流停滞或流出湿地区会减少水体覆盖的面积从而削弱补水效果, 降低水资源利用率。保护区现有耕地属于历史遗留问题, 在生态补水过程中尽可能不淹没耕地。补水位置的选取应充分考虑地形、补水来源、设施成本等因素, 优先采取重力自流的方式补水。三环泡湿地通过河流、灌区与外界保持着水力联系, 对湿地进行补水时通过河流引水和灌区退水来进行补给。湿地内地势呈西高东低分布: 西部区域有内七星河流经湿地边界, 可引水补给(补水口 1); 湿地保护区以北分布有大面积灌区, 中部区域通过灌区退水补给(补水口 2); 东部区域有挠力河流经湿地东南边界, 亦可引水补给湿地(补水口 3)。借鉴其他湿地的补水先例同时结合三环泡湿地的需水规律, 设计了 3 种补水方案, 不同方案补水量见表 1。分析每种方案补水对湿地的优势, 并通过模型加以对比和验证。

4 月份一次性补水(方案 1)。在湿地需水较大时段之前提前补给全年需水量, 类似模拟洪水补水, 优点是流量大、流速快, 短时间内使得大量水体流入湿地, 可减少水体流动过程中的蒸发和其他损失^[20]。同时高脉冲、水深大的水流可以使得湿地微地形、地表植被阻水作用减弱, 水流演进速度较快, 有效缓解水流演进时间较长所导致的湿地干旱加重问题, 避免湿地动植物在需水时而得不到水量补给。

4—10 月逐月按需补水(方案 2)。按需补水方案, 即在每个月补给湿地当月需水量, 若水流及时漫延至湿地各区域, 各月需水量得到合理配置, 可认为湿地逐月的生态补水量接近需水量理论值, 湿地需水、补水过程在水量上能够契合, 湿地补水可达到较为理想的效果^[21]。同时此方案在发生极端水文情势时, 后续补水量可根据前期天然来水量做出调整。

表 1 不同方案补水量

Tab. 1 Water supply of different schemes

编号	补水方案	不同时间补水量/万 m³							
		4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	
1	一次性补水	6 480.7	0	0	0	0	0	0	
2	按需补水	234.3	1 825.7	1 196.6	358.6	225.6	2 094.1	545.8	
3	分期补水	3 256.6	0	0	3 224.1	0	0	0	

4月和7月分期补水(方案3)。由需水过程可看出,5、6月湿地需水量增大,可在此时段之前补充所需水量,8月以后湿地需水量回升,在此之前再次补水。5—7月为当地农业用水高峰期,实际生态用水不足可能无法补水,有必要错峰补水,同时农业灌溉后的退水可作为补水水源。分期补水一方面可以削减大规模补水的量,降低补水对湿地及周边耕地的破坏,同时第二次补水有助于抬升冰冻水位,提升鱼类及水生动物的越冬空间,且有助于次年冰封期后保持湿地水位和水面面积^[16]。本方案首次补给4—6月湿地需水量,第二次补给7—10月湿地需水量。

2.3 补水演进模型构建

2.3.1 模型构建

模拟计算区域采用不规则三角网格,网格边界的距离取100 m,网格划分及地形插值结果见图3。模型共设置3处补水边界:补水边界1对应内七星河引水流入湿地,补水边界2对应挠力河引水流入湿地,补水边界3对应周边灌区退水补给湿地,出流边界以实测流量作为规定流量边界。通过对三环泡湿地遥感解译得到现状年不同土地利用类型的空间分布,参考水力计算手册对不同覆盖类型模型赋予不同的糙率经验值,制作成随空间分布的模型糙率输入文件。边界及糙率分布见图4。

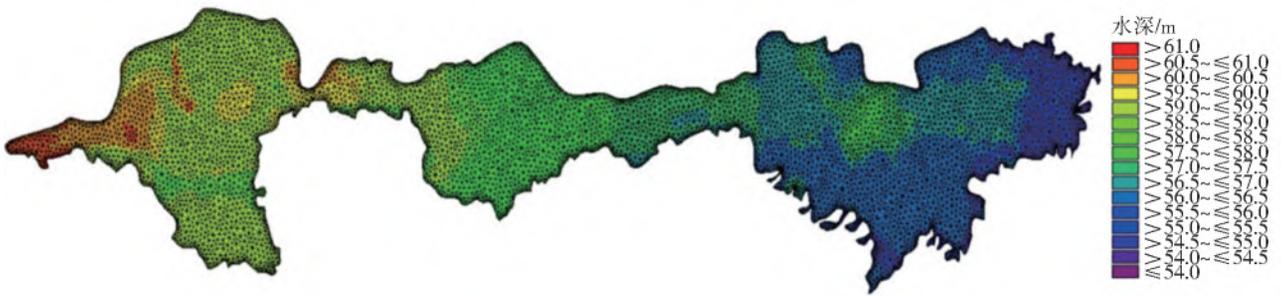


图3 网格划分及地形插值

Fig. 3 Mesh generation and terrain interpolation

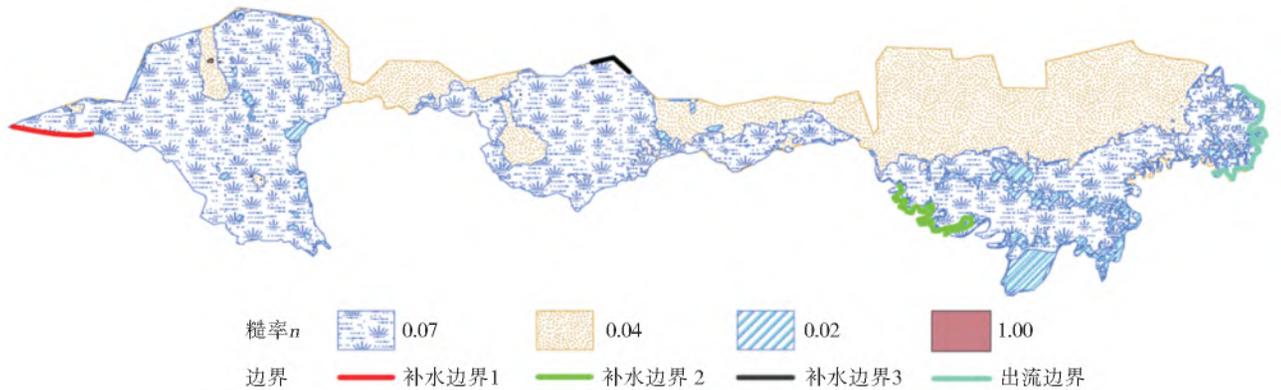


图4 边界及糙率分布

Fig. 4 Boundary and roughness distribution

2.3.2 模型精度验证

采用现状年(2017年)的实测降雨、蒸发、天然径流资料在天然情况下对湿地保护区进行数值模拟,得到湿地不同时段的水域面积及水深数据。运用ENVI 5.1软件对三环泡湿地保护区现状年的遥感影像进行解译,得到土地利用类型分布。将模拟结果同遥感影像提取的湿地沼泽、淹水范围进行空间叠加分析对比,发现模型模拟结果和实际遥感解译的沼泽、淹水分布范围重合面积达到后者面积的90%以

上,见图5,表明模型模拟结果较好。水深验证采用实测数据,模拟水深与实测水深误差均在可接受范围以内,说明模型计算结果合理。验证结果见表2。

由以上验证结果可以看出,湿地水平空间分布及水深模拟结果精度稍低的主要原因是模型初始条件设置基本不可能与湿地实际情况一致,但是通过实测流量和蒸发等资料来模拟湿地水流过程的各物理量变化过程定性、定量基本正确,可以用于后续的湿地补水水流演进模拟。

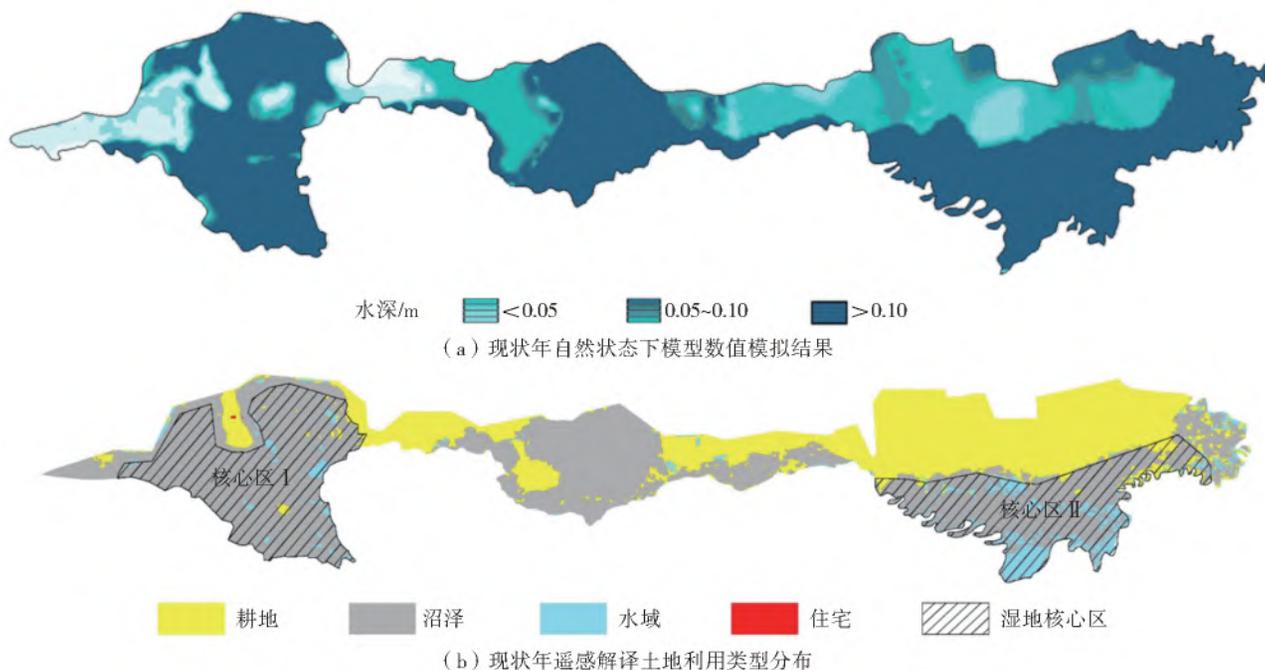


图 5 模型模拟结果与遥感提取结果对比

Fig. 5 Comparison of model simulation results and remote sensing extraction results

表 2 模型水深验证结果

Tab. 2 Validation results of model water depth

样点位置坐标	实测值/m		模拟值/m		平均误差/%
	5月下旬	8月中旬	5月下旬	8月中旬	
132°21'E, 46°48'N	0.14	0.20	0.12	0.21	9
132°38'E, 46°48'N	0.25	0.35	0.21	0.39	12
132°33'E, 46°49'N	0.36	0.50	0.33	0.48	6
132°49'E, 46°46'N	0.38	0.55	0.40	0.60	7

3 结果与分析

3.1 不同方案水情信息变化分析

模型运行计算后,可以得到任一坐标和任一时刻的水位、水深、水流速度等信息,进而可以分析得到水流在湿地保护区内的演进过程。由于模拟时段较长,取补水后每月月初的模拟结果进行展示,3种方案不同时间的淹没范围及水深分布见图6。

从图6可以看出:采用方案1、方案3补水后,由于补水较为集中,补水流量大、漫延快,在5—7月需水量较大时段之前水流已演进至包含湿地核心区I、II的大部分沼泽分布的湿地区域;方案2由于每月按需补水量较小,小流量水流演进具有一定的滞后性不能及时补给湿地。将图5中遥感解译与图6中补水结果对比发现,在方案1大量补水情况下易对周边灌区造成淹没,短时间内低洼区域水深较大。保护区耕地由于多年人类活动致使微地形变化、地势抬高,方案2和方案3情况下的耕地区

域水深基本在0.05 m以下,补水没有对周边耕地造成淹没和破坏。在方案2下三环泡湿地整个补水过程覆水面积、水深基本在不断增大,但在7月之前均较小,由于水流演进延迟,需水过程和补水过程不同步。

将计算结果导入ArcGIS平台进行空间统计分析,不同时间、水深下的覆水面积结果见图7。在方案1补水情况下湿地在5月初覆水面积达到最大22 911.1 hm^2 ,占总保护区面积的83%,随后逐渐减小,已对部分中部及东北部耕地造成淹没,不同水深时空分布较为不均匀,保护区东部、西部核心区大部分区域水深在0.4 m以上。在方案2补水情况下湿地补水后的覆水面积逐渐增大,直至7月以后覆水面积达到较大范围,分布在16 000 hm^2 左右,约占总保护区面积的58%,较多区域水深分布在0.1~0.2 m,补水前期整体水深较小,补水后期不同水深分布逐渐均匀。在方案3情况下三环泡湿地补水后在5月下旬水域面积分布最大,达到21 533.9 hm^2 ,

占总保护区面积的 78%,不同水深时空分布相对均匀,西部水深范围基本为 0.35~0.40 m,中部和东部水深范围基本为 0.20~0.25 m。在 6、7 月,由于湿地植被蒸散发量等消耗增大,湿地水域面积和水深稍有减小,主要体现在湿地保护区的中部和东部,水

深范围分布为 0.10~0.25 m。8 月份对湿地进行二次补水,补水后湿地水域面积和水深逐渐增大,湿地水域面积在 9 月份达到第二次峰值 18 965.6 hm²,西部水深范围基本为 0.40~0.45 m,中部和东部水深范围基本为 0.20~0.30 m。

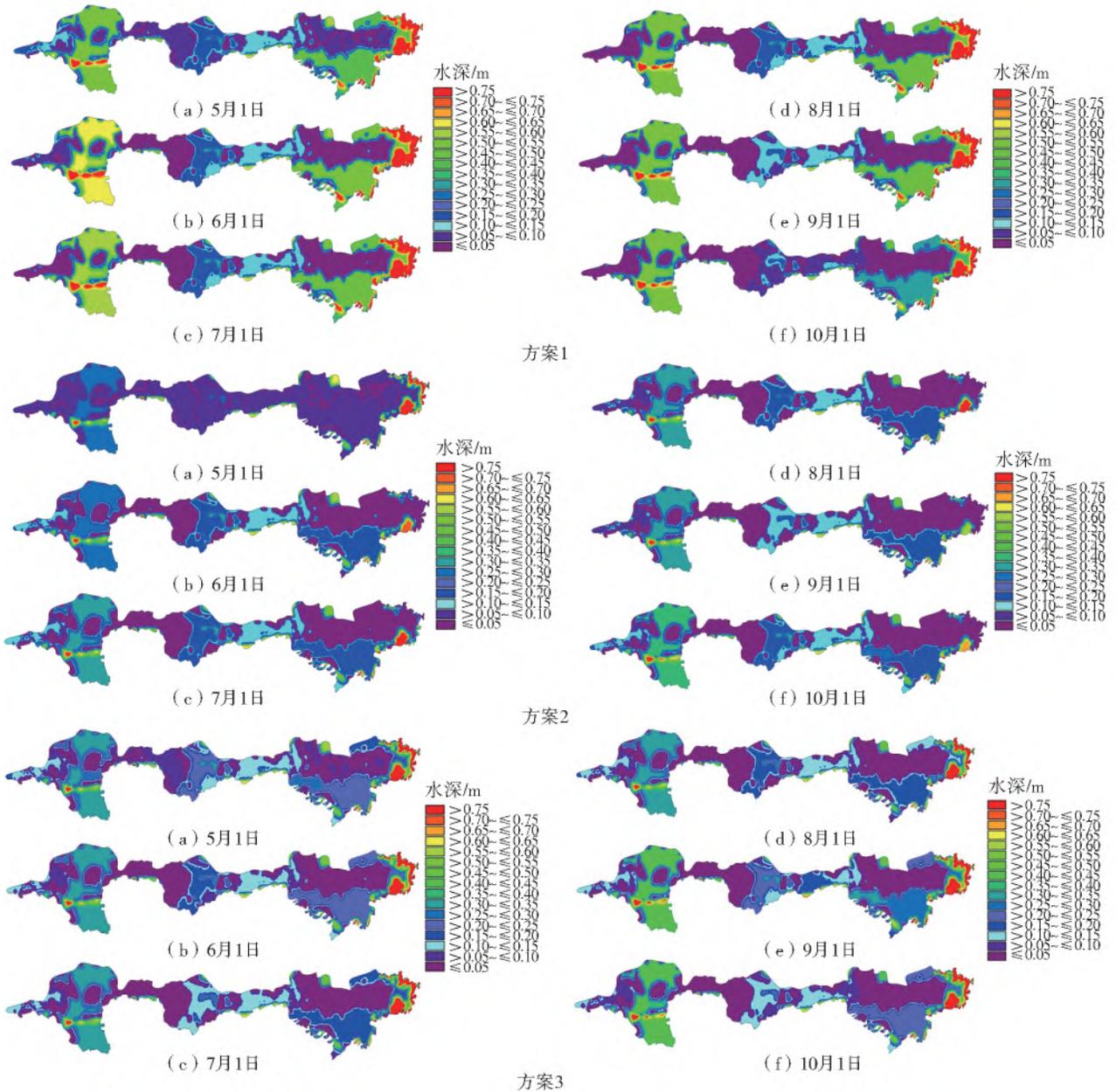


图 6 3 种方案不同时间水域及水深分布

Fig. 6 Water area and water depth distribution of the three schemes at different times

3.2 补水效果对比分析

可以发现 3 种方案均可使水域面积显著增加,方案 1、3 在 5 月补水面积均超过 20 000 hm²,可认为水流已基本演进至全部湿地区域,随后方案 1 由于蒸散发覆水面积逐渐减小,方案 3 由于再次补水后整体上覆水面积较大,而方案 2 水流演进较为滞后,补水面积相对较小。从水深上看,方案 1 有较多区域的水深较大,不同区域水深差别较大,方案 2、3

不同水深时空分布较为均匀。

湿地核心区是湿地生物群落赖以生存和发展的区域,因此对三环泡湿地核心区的补水效果分析尤为关键。在三环泡湿地核心区分布有丹顶鹤、东方白鹤、天鹅等珍稀水禽及芦苇、小叶章等优势植被。野外调查显示:丹顶鹤喜欢在水深 30 cm 附近的近水草丛和芦苇漂筏上觅食、活动、营巢;东方白鹤多在水深 25 cm 附近的毛果苔草和漂筏苔草沼泽中觅

食,并选择水深在 30 cm 附近的毛果苔草和漂筏苔草中筑巢;天鹅等选择在芦苇沼泽或苔草漂筏上筑巢。除水域鸟类和沼泽鸟类外,一些草甸鸟类常栖息于草甸之上,对水深没有特殊要求。芦苇对水量需求不同且具有时段性,芦苇沼泽地表常年积水,水

深一般在 20 cm 以上。由于三环泡核心区地势较为平坦,水深基本一致,为了更好地反映补水后水深变化情况,选取核心区 I、II 区域的水深进行分析。不同方案核心区水深变化过程见图 8。

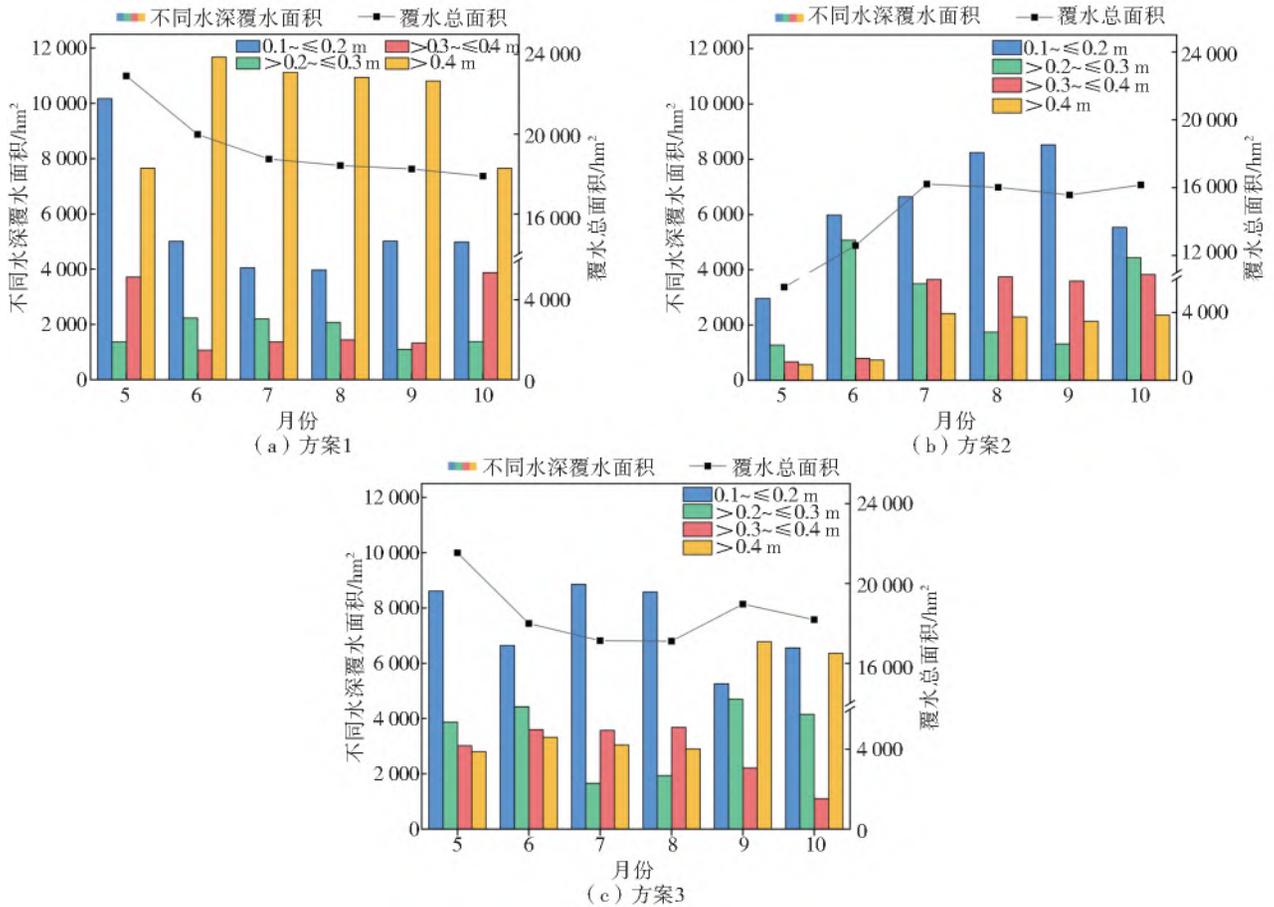


图 7 3 种方案下不同时间、水深的覆水面积

Fig. 7 Water area of three schemes at different times and water depths

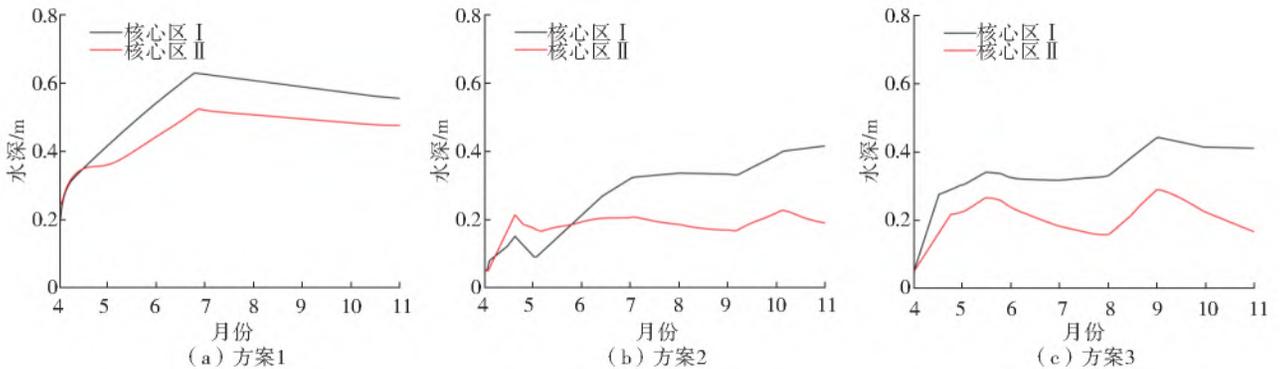


图 8 不同方案核心区水深变化过程

Fig. 8 Variation process of water depths in core area of different schemes

由图 8 可知:方案 1 在 4 月集中补水后,核心区 I、II 水深 4—7 月内增加迅速,分别达到 0.62 m、0.46 m,大流量、高水深可能会对部分动植物栖息地造成破坏;方案 2 逐月补水水深增加较慢,在 7 月之前 2 个核心区的水深基本在 0.20 m 以下,不足以

满足主要鸟类和植被的需水要求;方案 3 在 4 月补水后至 5 月中旬,水深处于增加的趋势,核心区 I、II 水深分别增加至 0.35 m、0.28 m,首次补水结束至 8 月再次补水之前由于蒸散发两区域水深均有所减小,二次补水后核心区 I、II 水深分别增加至

0.44 m、0.30 m,随后由于蒸发消耗水深再次减小。对比湿地补水后核心区水深变化情况,方案3可以满足三环泡湿地内珍稀水禽及优势植被的适宜水深要求,也未对其造成长期高水深淹没,可通过湿地生态补水营造适宜的生物栖息地环境。同时根据覆水面积及水深模拟结果,方案3补水过程更能满足“M型”需水过程特点。

4 结论与展望

通过分析湿地需水过程、设计补水位置及补水时段,确定了3种补水方案,利用MIKE 21构建了三环泡湿地枯水年生态补水数值模型,模拟计算了不同方案的补水面积以及水深等水情变化情况,并对比分析不同方案的补水效果,得到以下主要结论:

4月和7月分期补水方案效果最佳。3种方案进行补水后水域面积均有所增加,整个过程方案3平均水域面积最大,更接近恢复目标,方案1次之,方案2最小。方案2按需补水演进时间较长,湿地需水和得到补水的过程不同步,方案1、3可将湿地所需水量及时补充到需水区域,能克服水流滞后性问题,但方案1一次性补水会对周边耕地造成淹没,且水深较低和较高的区域多,不同水深时空分布不均匀。

根据三环泡湿地模拟补水过程中的覆水面积和相应水深变化情况,4月和7月分期补水方案更能满足湿地“M型”需水过程特点。此外通过分析核心区珍稀水禽和优势植被的适宜水深范围,此方案湿地补水后水深变化过程更接近区域内生物的适宜生存条件,能营造适宜的生物栖息地环境。

本研究分析确定了补水效果最佳的三环泡湿地补水方案,可为其他湿地补水方案的确定及补水效果的分析提供参考和方法借鉴。本文模型精度验证中有样点平均误差稍大,由于卫星影像精度不够高,遥感解译时可能会出现偏差,另外实测水深数据较少,湿地内缺乏长时间序列的高精度地形监测数据,均在一定程度上影响了模拟结果,今后仍需进一步完善相关数据,提高精度,增强成果的可指导性。

参考文献(References):

[1] 马银.南四湖湿地生态系统格局演变及预警分析[D]. 济南:山东建筑大学,2020. (MA Y. Evolution and early warning analysis of ecosystem pattern in Nansi Lake wetland[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2020. (in Chinese))

[2] 章光新,武瑶,吴燕锋,等.湿地生态水文学研究综述

[J]. 水科学进展,2018,29(5):737-749. (ZHANG G X, WU Y, WU Y F, et al. A review of research on wetland ecohydrology [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(5): 737-749. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2018. 05. 014.

[3] 刘峰,高云芳,李秀启.我国湿地退化研究概况[J]. 长江大学学报(自然科学版),2020,17(5):84-89. (LIU F, GAO Y F, LI X Q. Overview of wetland degradation research in China [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2020, 17(5): 84-89. (in Chinese)) DOI: 10. 16772/j. cnki. 1673-1409. 2020. 05. 014

[4] 李玉宛,郭继香,王赫,等.辽河流域典型湿地退化因素研究[J]. 水资源研究,2017,6(2):176-186. (LI Y W, GUO J X, WANG H, et al. Research on typical wetlands degradation factors in Liao River basin [J]. Journal of Water Resources Research, 2017, 6(2): 176-186. (in Chinese)) DOI: 10. 12677/jwrr. 2017. 62021.

[5] 刘吉平,高佳,董春月.1954—2015年三江平原沼泽湿地变化的区域分异及影响因素[J]. 生态学报,2019,39(13):4821-4831. (LIU J P, GAO J, DONG C Y. Regional differentiation and factors influencing changes in swamps in the Sanjiang plain from 1954 to 2015 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13): 4821-4831. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/stxb201802270394.

[6] 张珮纶,王浩,雷晓辉,等.湿地生态补水研究综述[J]. 人民黄河,2017,39(9):64-69. (ZHANG P L, WANG H, LEI X H, et al. A Review of ecological water replenishment for wetlands [J]. Yellow River, 2017, 39(9): 64-69. (in Chinese)) DOI: 10. 3969 / j. issn. 1000-1379. 2017. 09. 014.

[7] 公雪婷,刘志红,阎奕维,等.水文连通条件下向海湿地多水源补水研究[J]. 湿地科学,2020,18(6):719-723. (GONG X T, LIU Z H, YAN Y W, et al. Water supply from multiple sources to Xianghai wetlands under hydrologic connectivity [J]. Wetland Science, 2020, 18(6): 719-723. (in Chinese)) DOI: 10. 13248/j. cnki. wetlandsci. 2020. 06. 011.

[8] 张洋.基于向海湿地生态补水的水资源优化配置研究[D]. 吉林:吉林大学,2016. (ZHANG Y. Study on optimization allocation of water resources based on water diversion in Xianghai wetland [D]. Jilin: Jilin University, 2016. (in Chinese))

[9] 刘闯,张卉,于静洁.植物生长季敦煌西湖湿地生态需水量研究[J]. 湿地科学,2020,18(6):706-711. (LIU C, ZHANG H, YU J J. Ecological water demand in plant growing season at Dunhuang West Lake wetlands [J]. Wetland Science, 2020, 18(6): 706-711. (in Chinese)) DOI: 10. 13248/j. cnki. wetlandsci. 2020. 06. 009.

[10] LIU J, WANG T, ZHOU Q. Ecological water require-

- ments of wetlands in the middle and lower reaches of the Naoli River[J]. *Water Policy*, 2018, 20(4): 777-793. DOI: 10. 2166/wp. 2018. 099.
- [11] 周强. 挠力河中下游湿地生态需水量研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017. (ZHOU Q. Study on ecological water requirement of wetland in middle and lower reaches of Naoli River[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese))
- [12] 魏文涛. 马踏湖湿地生态需水量及补水方案研究[D]. 济南: 山东大学, 2016. (WEI W T. Study on ecological water demand and water replenishment scheme of Mata Lake wetland[D]. Jinan: Shandong University, 2016. (in Chinese))
- [13] 齐云飞. 盘锦芦苇湿地多水源生态补水配置方案研究[J]. *东北水利水电*, 2015, 33(4): 19-21. (QI Y F. Study on configuration scheme of multi source ecological water supplement in Panjin reed wetland[J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 2015, 33(4): 19-21. (in Chinese)) DOI: 10. 14124/j. cnki. dbtsld22-1097. 2015. 04. 008
- [14] 高文宏, 闫红军. 引察济向恢复湿地功能效益分析[J]. *吉林水利*, 2006(11): 18-20. (GAO W H, YAN H J. Benefit analysis of wetland function restoration with water supplement from Chaersen reservoir to Xianghai wetland [J]. *Jilin Water Resources*, 2006(11): 18-20. (in Chinese)) DOI: 10. 15920/j. cnki. 22-1179/tv. 2006. 11. 008
- [15] DUAN H, XU M, CAI Y, et al. A holistic wetland ecological water replenishment scheme with consideration of seasonal effect[J]. *Sustainability*, 2019, 11(3). DOI: 10. 3390/su11030930.
- [16] 杨泽凡. 基于水流过程的河沼系统生态需水与调控措施研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019. (YANG Z F. Study on ecological water demand of river marsh system based on water flow process[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019. (in Chinese))
- [17] 郭子良, 张余广, 刘丽. 河北衡水湖湿地生态补水策略的探讨[J]. *湿地科学与管理*, 2019, 15(4): 27-30. (GUO Z L, ZHANG Y G, LIU L. Discussion about the strategy of ecological water replenishment to Hengshui Lake wetland of Hebei[J]. *Wetland Science & Management*, 2019, 15(4): 27-30. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-3290. 2019. 04. 07.
- [18] WANG X, ZHANG D, GUAN B, et al. Optimum water replenishment strategy to restore reed wetland in the Yellow River Delta[J]. *PLOS ONE*, 2017, 12(5): e177692. DOI: 10. 1371/journal. pone. 0177692.
- [19] XIE P L, CHEN Y L, CHANG S C, et al. Analysis of the environmental degradation and ecological water requirement process of the typical wetlands in north-east China[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 1014: 299-302. DOI: 10. 4028/www. scientific. net/AMR. 1014. 299.
- [20] 赵文花. 渭南卤阳湖湿地水系生态修复规划策略研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018. (ZHAO W H. Overall planning strategies for ecological restoration of water system in Weinan Luyang Lake wetland[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018. (in Chinese))
- [21] 张强. 挠力河中下游湿地生态补水方案研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020. (ZHANG Q. Study on ecological water replenishment scheme in the middle and lower reaches of Naoli River[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese))
- [22] WANG Q, PENG W, DONG F, et al. Simulating flow of an urban river course with complex cross sections based on the MIKE21 FM model[J]. *Water*, 2020, 12(3): 761. DOI: 10. 3390/w12030761.
- [23] 常楚阳, 周建中, 徐少军, 等. 基于 MIKE21 FM 的杜家台分蓄洪区洪水演进模拟[J]. *人民长江*, 2017, 48(S1): 14-18. (CHANG C Y, ZHOU J Z, XU S J, et al. Flood routing simulation of Dujiatai flood diversion and storage area based on MIKE21 FM[J]. *Yangtze River*, 2017, 48(S1): 14-18. (in Chinese)) DOI: 10. 16232/j. cnki. 1001-4179. 2017. S1. 004.

Ecological water replenishment effect of Sanhuanpao wetland in Sanjiang plain

WANG Zhipeng, LIU Jianwei, ZHANG Qiang, QIN Guoshuai

(School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A serious degradation and significant decrease in wetlands areas in Sanjiang Plain of China have been reported. Water shortage is the key cause of wetland degradation. The natural inflow can not meet the actual water demand of wetland. Thus, it is imperative to replenishment the ecological water of the wetland. There may be conflicts between ecological and agricultural water use in the region, and water resources are preferentially used for agriculture in the region. Therefore, it is necessary to select the appropriate location and timing of water replenishment to make a planned water replenishment, to limit the ecological water resources that can be used to the maximum extent and the wetland can achieve better water replenishment effect. It requires the study of ecological water replenishment schemes based on water replenishment effect analysis.

The characteristics of regional water demand and the surrounding hydraulic connection were analyzed, and the reasonable water replenishment period and location were selected to design the water replenishment scheme. Three water replenishment schemes were determined; one-time water replenishment in April (scheme 1), monthly water replenishment on demand from April to October (scheme 2), and staged water replenishment in April and July (scheme 3). MIKE 21 water flow evolution model was constructed through grid division, terrain interpolation, roughness selection, boundary setting, model verification, and other processes to realize the water flow evolution simulation of ecological water replenishment process in Sanhuanpao wetland, and to show the dynamic change process of water replenishment area and water depth. The GIS platform was used for numerical statistics and analysis of the wetland water replenishment effect.

In schemes 1 and 3, the water replenishment flow was large and the spread was fast due to the relatively concentrated water replenishment. The flow had flowed to most wetland swamps areas containing the core areas I and II of the wetland before the period of large water demand from May to July. In scheme 2, due to the small amount of water supply on demand each month, the diffusion of small flow could not supply the wetland in time due to a certain lag. Before July, the water area and water depth are small, and the water demand process and water supply process are not synchronized due to the delay of water supply spread. In scheme 1, the water depth in the low-lying area was large in a short time, and a large amount of water supply caused the inundation of some central and northeastern cultivated land, while schemes 2 and 3 did not cause the inundation. The water area of the wetland increased significantly after water replenishment under the three schemes. The water replenishment areas of schemes 1 and 3 exceeded 20 000 hm² in May, and it could be considered that the water flow had flowed into the whole protected area. Subsequently, the water area of scheme 1 decreased gradually due to evaporation, and the water area of scheme 3 was larger as a whole after water replenishment again. However, the water flow spread in scheme 2 was lagging, the water area increased gradually after water replenishment, and the water area was small in the early stage. Until July, the water area reached a large range, which is about 16 000 hm². In terms of water depth, scheme 1 had a larger water depth in many areas, and the water depth in most areas of the eastern and western core areas of the reserve was more than 0.4 m. The water depth in different areas was quite different. After concentrated replenishment in April, the water depths of core areas I and II increased rapidly from April to July, reaching 0.62 m and 0.46 m, respectively, which may cause damage to some animal and plant habitats. In scheme 2, the water depth of the wetland increased slowly after monthly replenishment. Before July, the water depth of the two core areas was basically below 0.20 m, which was not enough to meet the water requirements of major birds and vegetation. In the later stage of replenishment, the water depth of more areas was distributed in 0.1–0.2 m, and the distribution of different water depths was gradually uniform. In scheme 3, the water depth increased from April to mid-May, and the water depths in the core areas I and II increased to 0.35 m and 0.28 m, respectively. The water depths in the two areas decreased from the end of the first replenishment to August, and the water depths increased to 0.44 m and 0.30 m, respectively, after the second replenishment. The water depth decreased again due to evaporation consumption. The process could meet the requirements of the suitable water depth for the rare waterfowl and dominant vegetation in the Sanhuanpao wetland.

The staged water replenishment scheme in April and July has the best simulation effect. Under three schemes, the average water area of scheme 3 is the largest, which is closer to the recovery target, followed by scheme 1 and scheme 2. In scheme 2, the on-demand replenishment flow has a long spread time, and the process of water demand and replenishment is not synchronized. Schemes 1 and 3 can replenish the water demand of wetland to the water demand area in time, which can overcome the problem of flow hysteresis. However, one-time replenishment of scheme 1 will cause inundation of surrounding irrigation areas, and there are more areas with lower and higher water depths, and the spatial and temporal distribution of different water depths is uneven. The M-type characteristics of water demand process are more consistent under the staged replenishment scheme in April and July. By analyzing the suitable water depth range of rare waterfowl and dominant vegetation in the core area, the change process of water depth after water replenishment in this scheme can better meet the suitable living conditions of organisms in the region and create a suitable habitat environment.

Key words: wetland; ecological water replenishment; MIKE 21; water flow; effect of water replenishment