#### DOI: 10.5846/stxb201911252552

曾庆慧, 胡鹏, 赵翠平, 龚家国, 刘欢, 杨泽凡. 多水源补给对白洋淀湿地水动力的影响. 生态学报, 2020, 40(20): 7153-7164. Zeng Q H, Hu P, Zhao C P, Gong J G, Liu H, Yang Z F. Influence of multi-water resource replenishment on the hydrodynamic behavior of Baiyangdian wetland. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(20): 7153-7164.

# 多水源补给对白洋淀湿地水动力的影响

# 曾庆慧,胡 鹏\*,赵翠平,龚家国,刘 欢,杨泽凡

中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038

摘要:白洋淀是华北平原最大的淡水湖泊,对维护华北地区生态系统平衡、调节区域气候、补充地下水源、调蓄洪水以及保护生物多样性等方面发挥着重要作用。白洋淀作为雄安新区赖以持续发展的重要生态屏障,维系淀区稳定补水量、改善淀区水动力状况以保证水生态系统持续健康发展显得尤为重要。通过构建白洋淀湿地二维水动力模型,综合考虑淀区刚性需水与弹性生态需水,共设置了 8 种情景来探究引黄人冀补淀、南水北调中线、南水北调东线应急补水以及上游水库联合补水等多水源补给情景下白洋淀水动力条件的改善情况。结果表明:(1)引黄人冀补淀和南水北调东线应急补水对小白河入口处水动力有明显改善,改善范围约占淀区面积的 15%—20%,但对淀区水动力整体提升效果不佳。(2)南水北调中线相机补水对西北角水动力改善最为明显,同时对淀区平均流速的提升最大。连续补水 1 个月的情景下淀区平均流速从 0.003 m/s 提高到 0.006 m/s,西北 角平均流速从 0.003 m/s 提高到 0.001 m/s。(3)上游水库联合向淀区补水的方式由于入淀口分散,对淀区整体水动力循环流动的促进效果最好。连续补水 1 个月后淀区平均流速从 0.003 m/s 提高到 0.005 m/s。研究结果为白洋淀湿地水资源保障和促进淀区水体循环流动提供了科学依据,同时也为构建雄安新区蓝绿交织、清新明亮、水城共融的生态城市提供重要基础支撑。 关键词:白洋淀;多水源补给;MIKE 21;水动力;数值模拟

# Influence of multi-water resource replenishment on the hydrodynamic behavior of Baiyangdian wetland

ZENG Qinghui, HU Peng\*, ZHAO Cuiping, GONG Jiaguo, LIU Huan, YANG Zefan

State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China

Abstract: Baiyangdian wetland is the largest freshwater lake in the North China Plain. It plays a significant role in maintaining the balance of the ecosystem in northern China, regulating regional climate, replenishing underground water sources, regulating and storing flood water, and protecting biodiversity. As an important ecological barrier for the sustainable development of Xiong'an New Area, it is crucial to maintain the stability of water replenishment and improve the hydrodynamic status in Baiyangdian wetland, to ensure the healthy development of this aquatic ecosystem. A MIKE 21 Flow Model was applied to completely understand the influence of multi-water resource replenishment on the hydrodynamic behavior of Baiyangdian wetland. Eight scenarios were considered, including the diversion of the Yellow River into the wetland, middle route of the south-to-north water diversion project, eastern route of the south-to-north water diversion project, and joint replenishment of upstream reservoirs. Subsequently, the following results were obtained: (1) The hydrodynamic behavior at the entrance of Xiaobai river significantly improved under the water replenishment scenarios of the diversion project.

基金项目:国家重点研发计划课题(2018YFC0506904, 2017YFC0404503);国家自然科学基金项目(51625904);中国水科院基本科研业务费项目 (WR0145B522017)

收稿日期:2019-11-25; 修订日期:2020-06-12

\* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: hup@iwhr.com

The improvement area accounted for approximately 15 - 20% of the total area of the wetland; however, the average velocity of the entire wetland did not markedly improve. (2) The hydrodynamic improvement of the northwest corner was the most noticeable under the water replenishment scenario of the middle route of the south-to-north water diversion project, and the average velocity of the whole wetland increased the most in the case of this scenario. The average velocity of the entire wetland increased from 0.003 m/s to 0.006 m/s, while that of the northwest corner increased from 0.003 m/s to 0.01 m/s after one month of water replenishment. (3) The hydrodynamic circulation of the whole wetland increased the most under the joint water replenishment scenarios of upstream reservoirs due to the dispersion of water entrance. The average velocity of the entire wetland increased from 0.003 m/s to 0.005 m/s after a month of water replenishment. Thus, the results of this study provide scientific support for promoting the circulation of water in Baiyangdian wetland.

Key Words: Baiyangdian; multi-water resources replenishment; MIKE 21; hydrodynamics; numerical simulation

白洋淀是华北平原最大、最典型的淡水浅湖型湿地,具有完备的沼泽和水域生态系统,被誉为"华北之 肾"。广阔的水面和沼泽湿地对维护华北平原生态系统平衡、调节区域气候、补充地下水源、调蓄洪水,以及 保护生物多样性和珍稀物种资源等方面发挥着重要作用。近年来,白洋淀流域面临着水资源衰减显著、主要 河流大面积断流、地下水超采严重等水资源保障问题<sup>[1]</sup>。20世纪70年代开始,白洋淀水面面积开始萎缩,并 呈现破碎化趋势,特别是1984—1987年连续4年完全干淀,随后淀区水位基本依靠外调水补给维持。1995— 1996年连续两年洪水补淀后,白洋淀几乎年年逼近干淀警戒水位,进入了频繁补水以维持基本生态功能的阶 段。20世纪80年代以来,先后实施了"引岳济淀"、"引黄济淀"等应急补水措施,1998—2006年上游水库连 续9年向白洋淀补水,2006年以后则主要依靠每年调引黄河水补给白洋淀,勉强维持淀区生产和基本生态需 求<sup>[2]</sup>。在京津冀协同发展和雄安新区建设学为战略背景下,白洋淀的生态地位和生态价值更加凸显,加强流域 水资源保障意义重大。雄安新区一大核心目标是"打造优美生态环境,构建水城共融的生态城市",白洋淀作 为雄安新区赖以持续发展的重要生态屏障,维系淀区稳定补水量、改善流域水环境状况以及保证水生态系统 健康发展显得尤为重要。

目前国内外学者对水动力的研究主要采取数学模型和数理统计的方法,大量的数值模拟软件已得到广泛 推广和应用,如 EFDC 模型、MIKE 系列模型、ROMS 模型等<sup>[3-6]</sup>。宫雪亮等<sup>[7]</sup>基于 MIKE 21 构建了南四湖水动 力水质模型,分析了多情景下南四湖上级湖内水量水质响应关系。贾瑞鹏等<sup>[8]</sup>建立万宝湖水动力和水质二 维耦合模型,分析了万宝湖的水动力条件变化特征及其对于水环境中各种污染物迁移转化机制的影响。窦明 等<sup>[9]</sup>应用 MIKE 21 建立大庆市龙凤湿地二维水动力和水质耦合模型,研究提出湿地水质改善的优化调控模 型。龚然<sup>[10]</sup>基于 EFDC 模型分析了南京市天印湖水动力条件对水质变化的影响。郁片红<sup>[11]</sup>基于 MIKE 21 水动力模型,以湖泊典型污染物 COD 为指标,对琵琶湖水动力增加的工程措施进行方案比选。路洪涛等<sup>[12]</sup> 研究了城市湖泊的人工水循环对水环境的改善效果,通过人为设定不同的进、出水口位置以及组合,调节换水 量和换水时间等方式,改善城市湖泊的水动力条件。熊鸿斌等<sup>[13]</sup>基于 MIKE 11 模型建立了颍河一维河网水 动力和水质模型,分析了补水流量、补水水质、补水水位和补水方式等调整措施对河流水质的影响。Li 等[14] 利用 MIKE 21 模型建立了东湖水动力模型,对流域内水动力及水质演变规律进行了分析。Kafrawy 等<sup>[15]</sup>对地 中海区域部分沿海湖泊构建了水动力模型,探究了淡水流入和交换对海洋的相对重要性以及它们对盐度、环 流模式、营养物来源和分布的影响。Li等<sup>[16]</sup>结合水动力模型与统计方法研究了鄱阳湖洪泛区9个季节性湖 泊的水文连通性及其与水质的关系,结果表明水文连通性可能是控制季节性湖泊间水质动态变化的关键因 素。以上研究都是以水动力模拟为基础,旨在研究与水动力过程相关的水质演变趋势或富营养化状态,因此 方案设置及比选都是以改善水环境为重点,而不是以改善研究区水动力条件为目的,单纯针对湖泊水库水动 力改善的研究较为少见。

本文所采用的 MIKE 系列模型由于采用非结构网格,能够处理复杂的边界条件等优点,已广泛应用于港

口、河流、湖泊、河口及海岸的水动力模拟研究。杨永森等<sup>[17]</sup>利用 MIKE 21 水动力模型,模拟了上秦淮湿地水 动力过程,为制定南京上秦淮湿地生态补水量及补水的水循环方案提供了参考。胡广鑫<sup>[18]</sup>等基于 MIKE 21 模型模拟和预测了不同补水和分配方案对东昌湖流速变化的影响,以确定较优的生态补水方案。赵通阳 等<sup>[19]</sup>建立了象湖水动力学模型,模拟了不同补水换水方式下的流场分析及对湖区水动力条件的影响。 Gurumoorthi 等<sup>[20]</sup>通过 MIKE 21 水动力模型模拟了在潮汐和风力驱动下 Kanyakumari 海岸的表面流场,通过 对东北和西南季风的一系列情景分析,探究了该地区的环流情况。Acharyulu 等<sup>[21]</sup>通过 MIKE 21 水动力模型 模拟研究了 Upputeru 海峡流场的重要影响因素,并揭示了近岸河口移动的根本原因。Lopes 等<sup>[22]</sup>利用 MIKE 21 模型对 Ria de Aveiro 湖进行了研究,并证明了该模型可作为生态系统管理的有效工具。Ferdous Ahmed<sup>[23]</sup> 通过建立 MIKE 11 水动力学模型全面分析了加拿大里多运河下游河段的水动力情况。以上水动力模拟相关 研究主要探究了影响水动力的主要因素及生态补水方案和补水效果,而对于生态需水量的确定以及如何通过 大规模调水工程补水来改善水动力条件的研究尚不多见。同时,对于本文研究区白洋淀湿地的研究主要集中 在白洋淀景观动态变化、生态系统健康评价、水文过程及水质演变、沼泽化驱动机制等方面<sup>[2428]</sup>,还没有针对 多水源补给对白洋淀湿地水动力影响的系统研究。

当前,京津冀协同发展和雄安新区的开发建设为白洋淀的生态修复和保护带来了重大历史机遇。在《河 北雄安新区规划纲要》中明确指出白洋淀要实施生态修复,恢复淀泊水面,建立多水源补水机制,统筹引黄人 冀补淀、上游水库及本地非常规水资源,合理调控淀泊生态水文过程。本文以白洋淀为研究对象,基于 MIKE 21 FM 构建淀区二维水动力模型,综合考虑白洋淀湿地的刚性需水与弹性生态需水,探究引黄入冀补淀、南水 北调中线、南水北调东线应急调水以及上游水库联合补水等多水源补给情景下白洋淀水动力条件的改善情 况。研究结果为白洋淀湿地水资源保障和促进淀区水体循环流动提供了科学依据,同时也为构建雄安新区蓝 绿交织、清新明亮、水城共融的生态城市提供重要基础支撑。

### 1 研究方法

#### 1.1 研究区概况

白洋淀(115°38' E—116°07 'E,38°43' N—39°02' N)主要位于保定市安新县境内,地处暖温带大陆性季 风气候区,四季分明,年降水量 550 mm,主要集中在 7—9月<sup>[26-27]</sup>。淀区总面积 366 km<sup>2</sup>,南北长 39.5 km,东 西长 28.5 km, 为华北地区典型的草型浅水湖泊, 也是大 清河水系中重要的蓄水枢纽<sup>[24]</sup>。白洋淀 2011—2015 年平均水位 6.4 m,平均水深 2.3 m,多年平均水域面积 约占淀区总面积的41%[25]。淀内主要由小白洋淀、马 棚淀、烧车淀、藻杂淀等大小不等的 143 个淀泊和 3700 多条沟壕组成,构成了淀中有淀,淀淀相通,沟壕相连, 农田和水面相间分布的特殊地貌。淀内地势平坦,总地 势自西向东略有倾斜,地面自然坡度 1/200-1/2000。 流域水系呈扇形分布,其中南支诸河直接汇入白洋淀, 主要河流有潴龙河、孝义河、唐河、府河、漕河、瀑河、萍 河等;北支为白沟引河,下游出口由枣林庄闸和赵北口 溢流堰控制(图1)。





# 1.2 数据来源

白洋淀淀区范围底部地形高程数据为项目组实测。水文数据来自河北省水利厅,主要包括 2015 年 1—

12月白洋淀入淀河流(潴龙河、孝义河、唐河、府河、漕河、瀑河、萍河、白沟引河)及下游出口枣林庄闸的逐日 流量及逐日水位时间序列数据。气象数据来自中国气象数据网,主要包括河北省保定站(区站号 54602)2015 年1—12月逐日平均降雨、蒸发、风速风向数据。王快水库、安各庄水库和西大洋水库历年调水补淀数据参考 《白洋淀沼泽化驱动机制与调控模式》。

1.3 模型构建

本研究采用丹麦水利研究所(DHI)开发的 MIKE 21 软件构建二维水动力模型, MIKE 21 主要作为区域 流场的水动力数学模拟和其他模型模拟计算的基础, 在 平面二维自由表面流数值模拟方面具有强大的功 能<sup>[29]</sup>。MIKE 21 广泛用于河流、湖泊、河口、海湾、海岸 及海洋的水流、波浪、泥沙及环境等方面。采用非结构 化网格对淀区进行划分, 共生成了 2701 网格和 1582 个 节点, 研究区底部高程及网格划分结果如图 2 所示。模 型采用动态时间步长 120 s, 结果表明该步长可以保证 模型的精度和稳定性。

在所有可获得的数据中,2015 年是包含完整的建 模所需时间序列数据年份最近的一年,因此选择 2015 年的数据对模型进行率定和验证。此外,由于预测时输 入的边界条件为情景设置的定值,通过预实验发现模型 经过一定时间的热启动后在短期内即可趋于稳定(不 超过 10 天),因此选择 2015 年 1 月至 6 月对模型进行 率定,2015 年 7 月至 12 月对模型进行验证,该时间跨 度足以保证模型预测的精确性。初始条件水面高程设



Fig. 2 Bathymetry and meshing results at the bottom of the study area

为 6.58 m,水平速度和垂直速度均为 0 m/s。边界条件包括白洋淀湿地出入流的逐日平均流量时间序列和十 方院逐日水位时间序列。反复运行模型并调整水动力参数直至模型误差达到可接受范围内。为了衡量模型 的模拟结果,本文采用平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE):

$$MAE = \frac{\sum |X_{obs} - X_{sim}|}{N}$$
(1)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X_{obs} - X_{sim})^2}{N}}$$
(2)

式中,X<sub>abs</sub>为实测值,X<sub>sim</sub>为模拟值。MAE 值和 RMSE 值的大小代表模拟值与实测值的吻合程度。

为了保证模型运行的稳定性将克朗值(CFL number)设置为 0.8,干水深设置为 0.005 m,淹没水深设置为 0.05 m,湿水深设置为 0.1 m,以上参数均采用模型推荐值。干湿水深用来判断单元网格是否参与到模型的计算中来,MIKE 21 可以根据每个网格的水深情况调整计算条件,灵活调用公式参与计算<sup>[30]</sup>。涡黏系数(Eddy Viscosity)选用 Smagorinsky 公式,Smagorinsky 系数取值 0.28。底床摩擦力选用曼宁系数(Manning Number),取值 16 m<sup>1/3</sup>/s。其他没有设置的参数采用默认值。

1.4 情景设置

根据《白洋淀水资源保障规划(2017—2030年)》,白洋淀恢复到7m的目标生态水位时,能够满足防洪、 生态、景观建设及水环境等多方面需求对应的生态需水量为3.2—4亿m<sup>3[31-32]</sup>。其中,刚性需水量约为 2亿m<sup>3</sup>,刚性需水是为了维持淀区基本水位不下降,必须要保障的生态需水部分,主要是指淀区蒸发耗水量 和下渗水量两个方面,其中蒸发又包括水面蒸发和陆面蒸发蒸腾。弹性需水指的是用于改善淀区水动力条件 和水生态环境质量的生态需水部分,目的是为了改善和提高淀区水生态环境,具体由淀区水生态环境状态确定,在一定范围内能保障的弹性生态水量越多对水动力或水生态环境改善效果越好。白洋淀 6.8 m 汛限水位对应的库容为 3.2 亿 m<sup>3</sup>,7 m 水位对应的库容为 3.6 亿 m<sup>3</sup>,考虑到未来的清淤措施,7 m 目标水位下的库容可能进一步增加到 4 亿 m<sup>3</sup>。按照每年换 1 次水的频率估计,则在刚性需水之外,至少还需要 1.2 亿—2 亿 m<sup>3</sup>的弹性生态需水<sup>[31]</sup>。为了保障 2020 年白洋淀达到地表水 III 类标准的目标,近期在保障刚性需水基础上,必须充分考虑弹性用水需求,建议 2020 年前保障生态需水 4 亿 m<sup>3</sup>,随着流域和淀区污染治理任务逐步完成,弹性需水可逐步减少。

近期白洋淀 2 亿 m<sup>3</sup>刚性需水主要依靠引黄入冀补淀工程保障,弹性需水主要依靠上游王快水库、西大洋 水库、安各庄水库、南水北调中线、南水北调东线应急调水等相机补水保障,维持白洋淀生态水量需求和良好 的水动力条件<sup>[31]</sup>。实际引水量视黄河水情、河北省引黄计划等综合情况确定。为了探究不同水源补给情况 下对白洋淀湿地水动力影响,共设置了 8 种情景,见表 1。其中情景 2 和情景 3 是河道补水,按照 2 亿 m<sup>3</sup>的估 算值设置。情景 4 和情景 5 中弹性需水的量是根据研究目的和实际情况设置的。情景 4 是为了探究各大水 库以最大潜力补水的情景下对白洋淀湿地水动力的改善情况,根据安各庄、西大洋和王快水库历年最大补水 潜力设置,共补水 2.1 亿 m<sup>3</sup>。情景 5 是根据《南水北调东线一期工程向北延伸应急供水方案研究报告》设定 的,其中指出南水北调东线应急调水仅考虑重要湿地生态需水,应急供水量为 1.36 亿 m<sup>3</sup>。

情景 Scenarios	补水方式 Methods	入淀河流 Inflow river	入淀水量/m <sup>3</sup> Inflow quantity	补水天数/d Implementation days	备注 Remarks
1	不补水				
2—1	引黄入冀补淀	小白河	2亿	156	刚性需水
2—2	引黄入冀补淀	小白河	1亿	156	刚性需水
		潴龙河	1亿	156	刚性需水
3—1	引黄入冀补淀+南水北调中线	小白河	2 亿	156	刚性需水
		瀑河	1亿	30	弹性需水
		萍河	1亿	30	弹性需水
3—2	引黄入冀补淀+南水北调中线	小白河	2 亿	156	刚性需水
		瀑河	1亿	60	弹性需水
		萍河	1亿	60	弹性需水
4—1	引黄入冀补淀+上游水库	小白河	2 亿	156	刚性需水
		安各庄	0.55 亿	30	弹性需水
		西大洋	0.35 亿	30	弹性需水
		王快	1.2 亿	30	弹性需水
4—2	引黄入冀补淀+上游水库	小白河	2 亿	156	刚性需水
		安各庄	0.55 亿	60	弹性需水
		西大洋	0.35 亿	60	弹性需水
		王快	1.2 亿	60	弹性需水
5	引黄入冀补淀+南水北调东线	小白河	2 亿	以最大设计流量	刚性需水
		小白河	1.36 亿	(30m <sup>3</sup> /s)入淀	弹性需水

表1 白洋淀湿地补水情景设置

Table 1 Scenarios of water replenishment of baiyangdian wetland

### 2 结果与讨论

#### 2.1 水动力率定验证结果

图 3 显示了 MIKE 21 模型逐日水位率定和验证的结果。由图中可以看出率定期水位模拟值与实测值吻

合得非常好,绝对误差在-0.03—0.15 m 范围内,平均绝对误差为0.086 m,均方根误差为0.095 m。为了验证 水动力模型的可靠性,在率定好的水动力模型的基础上,用 2015 年 7 月至 12 月逐日水位数据对模型进行验证。如图所示,验证期淀区实测水位与模拟水位吻合较好,绝对误差在-0.19—0.03 m 范围内,平均绝对误差为0.091 m,均方根误差为0.101 m。结果显示白洋淀湿地入流、出流、降雨和蒸发之间有很好的水量平衡关系,模拟误差控制在模型计算要求范围内,模型模拟效果较好,该模型适宜于白洋淀的水动力模拟。







2.2 引黄入冀补淀情景结果分析

引黄入冀补淀工程自河南省濮阳市渠村引黄闸引水,利用濮阳市濮清南干渠输水,穿卫河进入河北省,经 东风渠、老漳河、滏东排河至献县枢纽,穿滹沱河北大堤后,利用紫塔干渠、古洋河、小白河和任文干渠输水,于 千里堤大树刘12孔闸进入白洋淀。引水线路全长482km,在河北省境内长398km,多年平均引水量6.2亿 m<sup>3</sup>,入冀引水流量60m<sup>3</sup>/s,入白洋淀设计流量30m<sup>3</sup>/s。引黄入冀补淀工程规划冬四月(11月至来年2月)引 水,年入淀水量1.1亿m<sup>3</sup>,若引水增大到2亿m<sup>3</sup>,需要在现有规划基础上进一步延长引黄入冀补淀时间35 天,同时采取工程措施,提水入淀,增加入淀能力。

图 4(情景 1)显示了不补水时白洋淀湿地的水动力情况,从图中可以看出白洋淀湿地整体水动力条件不 佳,淀区平均流速仅 0.003 m/s,尤其是西南角马棚淀等区域水体几乎不流动,易形成死水区。图 4(情景 2— 1)显示了从小白河引黄入冀补淀后淀区的水动力改善情况。结果表明补水后淀区东南角水动力条件有所改 善,小白河入口处改善最为明显,但西北角、西南角和东北角水体流速几乎没有变化,整体改善效果不佳,影响 范围仅占淀区面积的 15%左右。为了增强引黄补淀水量改善淀区水动力条件的效果,情景 2—2 中考虑建设 小白河—潴龙河连通工程,使得引黄水量从小白河、潴龙河双径入淀,以改善淀区西南角马棚淀的水动力条 件,避免西南角淀区形成死水区。结果显示小白河、潴龙河双径入淀后西南角淀区水动力情况有所改善,但由 于入淀流量较小,改善的效果并不佳,无法在淀区西南角和东南角区域形成水体连通流动。

2.3 南水北调中线相机补水情景结果分析

南水北调中线分配给河北省水量指标为 30.4 亿 m<sup>3</sup>,在满足全省城市用水需求和水源区水量充足的条件 下可实施南水北调中线相机向白洋淀补水措施,通过瀑河水库进行调蓄后,沿瀑河和萍河入淀。情景 3—1 和 情景 3—2 在引黄入冀补充淀区刚性需水的基础上,增加了南水北调中线相机补水以补充淀区弹性需水。图 5(情景 3—1)显示了连续补水 1 个月后淀区水动力的改善情况,和不补水时(情景 1)相比,淀区整体水动力 条件都有所改善,淀区平均流速从 0.003 m/s 提高到 0.006 m/s。其中西北角水动力改善最为明显,西北角平 均流速从 0.003 m/s 提高到 0.01 m/s。图 5(情景 3—2)显示了连续补水 2 个月后淀区的水动力改善情况,淀 区整体水动力条件也都有所改善,淀区平均流速从 0.003 m/s 提高到 0.005 m/s,西北角平均流速从 0.003 m/s 提高到 0.007 m/s。连续补水 2 个月对淀区水动力条件的改善效果和连续补水 1 个月相比稍差,这主要是由



图 4 引黄入冀补淀对白洋淀湿地水动力的改善情况

于在补水量一定的情况下,延长补水时间,则补水流量较小,但和不补水时相比,淀区水动力条件整体都有所 提升。

2.4 上游水库相机补水情景结果分析

上世纪 60 年代以来,白洋淀上游陆续修建了 6 座大型水库。上世纪 80 年代白洋淀发生连续 5 年干淀以后,上游王快水库、安各庄水库和西大洋水库多次临时进行生态补水,对维持白洋淀湿地生态功能起到了重要作用,可作为近期白洋淀补水的重要水源。

表2列举了王快水库、安各庄水库和西大洋水库历年调水补淀的情况。在引黄入冀补充淀区刚性需水的基础上,根据白洋淀湿地弹性生态需水需求及历年各大水库最大补水潜力,设置了情景4—1和情景4—2以探究上游水库相机补水对白洋淀湿地水动力的改善情况。图6(情景4—1)显示了上游水库连续补水1个月后淀区水动力的改善情况,和不补水时(情景1)相比,淀区整体水动力条件都有所改善,淀区平均流速从0.003 m/s提高到0.005 m/s。此种补水方式对淀区南部水动力的改善最为明显,淀区南部平均流速从0.003 m/s提高到0.006 m/s。图6(情景4—2)显示了连续补水2个月后淀区的水动力改善情况,淀区整体水动力条件也都有所改善,淀区平均流速从0.003 m/s提高到0.004 m/s,淀区南部平均流速从0.003 m/s提高到0.005 m/s。上游三个水库联合向淀区进行生态补水的补水方式有利于淀区西北角和南部水体的循环流动,但东北角由于水面宽阔,同时白沟引河补水流量较小导致补水对东北角水动力条件没有明显改善。在南水北调

Fig.4 Hydrodynamic improvement of Baiyangdian wetland under the water replenishment scenarios of the diversion of the Yellow River into the Baiyangdian wetland



图 5 南水北调中线相机补水对白洋淀湿地水动力的改善情况

Fig.5 Hydrodynamic improvement of the Baiyangdian wetland under the water replenishment scenarios of the middle route of south-tonorth water diversion project

中线通水后,上游大型水库进一步增强了相机向白洋淀补水的能力,如若未来安各庄水库补水潜力进一步增大,则上游三个水库联合向淀区补水的方式能够极大地促进淀区整体的水动力循环流动。

表 2 王快水库、安各庄水库和西大洋水库历年调水补淀情况表<sup>[28]</sup>

Table 2	Water	replenishment	of	Baiyangdian	wetland	from	Wangkuai	Reservoir,	Angezhuang	Reservoir	and	Xidayang	Reservoir	over
the years[	28]													

uic years			
序号 No.	时间 Time	补水水库 Reservoir	入淀量/万 m <sup>3</sup> Quantity/10000 m <sup>3</sup>
1	1981年11月	安各庄水库	1281
2	1983年3月	安各庄水库	1400
3	1983年3—5月	西大洋水库	1961
4	1984年6月	王快水库	1431
5	1984年6—7月	西大洋水库	1219
6	1992年10月	王快水库	2709
7	1992年10—11月	西大洋水库	1621
8	1992年10—11月	安各庄水库	1880
9	1997年12月	安各庄水库	5765
10	2000年12月—2001年1月	王快水库	4060
11	2001年2—4月	安各庄水库	2164
12	2001年6—7月	王快水库	4513
13	2002年2—3月	西大洋水库	3501
14	2002年4—5月	西大洋水库	1974
15	2002 年 7—8 月	王快水库	3104
16	2003年1—3月	王快水库	11634
17	2005年3—4月	安各庄水库	4251
18	2006年3月	安各庄水库	815
19	2006年3月	王快水库	4867







### 2.5 南水北调东线应急补水情景结果分析

南水北调东线一期向北延伸应急供水线路沿清凉江输水至徐沙闸上,经武邑县江河干渠与引黄入淀输水 河道滏东排河相连,经已完建的引黄入冀补淀线路可输水至白洋淀<sup>[32]</sup>。在引黄入冀补淀工程遇枯水年时,利 用南水北调东线应急调水来满足白洋淀的生态用水需求,生态补水量为2.0亿m<sup>3[32]</sup>。

情景 5 在引黄入冀补充淀区刚性需水的基础上,增加了南水北调东线应急补水以补充淀区弹性需水。考虑到南水北调东线一期向北延伸应急供水线路最终经引黄入冀补淀线路输水至白洋淀,补水流量设置为引黄入冀补淀工程入白洋淀设计流量 30 m<sup>3</sup>/s,以探究该补水方式对淀区水动力的最大改善效果。图7(情景 5)显示了南水北调东线应急补水最大入淀流量下淀区水动力的改善情况,和不补水时(情景 1)相比,淀区整体平均流速从 0.003 m/s 提高到 0.004 m/s。其中以小白河入口处改善最为明显,向北逐渐减弱,淀区东南部水动力情况改善较大,东南部平均流速从 0.0035 m/s 提高到 0.0053 m/s,改善范围约占淀区面积的 20%。

# 2.6 讨论

### 2.6.1 情景结果分析

表3总结对比了不同情景下水动力提升明显的区域及淀区整体水动力改善情况。由于白洋淀湖盆呈浅 碟型结构,决定了其具有水深浅、面积大、蒸发强、调蓄弱等特征。综合以上情景结果发现,通过单一人口补水 时,仅在补水入口处水动力改善较明显,影响范围仅占淀区的15%—20%。在多水源补水的情况下,尤其是在 引黄入冀补淀和上游王快水库、安各庄水库和西大洋水库共同补水的情景下,由于入流口分散,带动了淀区整 体水体的循环流动,使淀区流场分布较均匀,对整体水动力条件改善较明显。但由于淀区西北角与其他部分 之间的连通渠道相对狭窄,因此南水北调中线由瀑河和萍河入淀补水时仅能显著改善淀区西北角的水动力情 况,对淀区东南部的改善效果不大。从补水时间的角度,当补水量一定时,短期较大流量的补水方式对淀区水 动力的改善效果优于长期较小流量的补水方式。

白洋淀湿地理想的水动力情况是水系流动通畅,流场分布较均匀合理,整体水域流速达到 0.01—0.03 m/s。根据研究结果,仅在情景 3—1 引黄入冀补淀和南水北调中线连续补水 1 个月后淀区西北角平均流速能达到 0.01 m/s,但由于西北角与淀区其他部分连通条件不佳,淀区整体平均流速仅为 0.006 m/s,其余情景下水体流速也均没有达到这个理想范围。因此,除了通过多水源补给之外,还需综合局部推流、地形营造等其他手段来共同改善淀区水动力条件。

40 卷



图 7 南水北调东线应急补水对白洋淀湿地水动力的改善情况

Fig.7 Hydrodynamic improvement of Baiyangdian wetland under the water replenishment scenarios of the eastern route of the south-tonorth water diversion project

Table 3      Hydrodynamic condition improvement area and overall improvement in different scenarios					
情景 Scenarios	水动力提升区域 Improvement area	改善情况 Improvement effect			
2—1	小白河入口	整体改善效果不佳,改善范围仅占淀区面积的15%左右。			
2—2	小白河和潴龙河入口	改善效果不佳,没有在淀区西南角和东南角区域形成水体连通流动。			
3—1	淀区西北角	淀区整体水动力改善效果最好,淀区平均流速从 0.003 m/s 提高到 0.006 m/s。西北角 平均流速从 0.003 m/s 提高到 0.01 m/s。			
3—2	淀区西北角	淀区水动力条件整体都有所提升,但和情景 3—1 相比改善效果稍差。淀区平均流速从 0.003 m/s 提高到 0.005 m/s,西北角平均流速从 0.003 m/s 提高到 0.007 m/s。			
4—1	淀区南部	淀区平均流速从 0.003 m/s 提高到 0.005 m/s。淀区南部平均流速从 0.003 m/s 提高到 0.006 m/s。			
4—2	淀区南部	淀区平均流速从 0.003 m/s 提高到 0.004 m/s,淀区南部平均流速从 0.003 m/s 提高到 0.005 m/s。			
5	小白河入口	淀区东南部水动力情况改善较大,东南部平均流速从 0.0035 m/s 提高到 0.0053 m/s			

表 3 不同情景下水动力提升区域及整体改善情况

通过优化淀区水动力条件,能够提高水体自净能力、增加水体透明度、改善水质、提高生物多样性。在此 基础上进一步调整和优化水生生物群落结构,以最终达到增强湿地整体景观效果以及改善和恢复湿地生态系 统功能的目的。因此,研究分析多水源补给条件下白洋淀湿地水动力优化情况不仅对于保障白洋淀湿地水资 源和水生态安全具有重大意义,同时也是构建雄安新区蓝绿交织、清新明亮、水城共融的生态城市的必然 要求。

2.6.2 模拟结果适宜性及不确定性分析

本文分别从数据来源靠谱、情景设置合理和模型选择适宜三个角度判断模拟结果的合理性。

①数据来源靠谱。数据主要来自河北省水利厅、中国气象数据网和项目组实测,实测地形数据与文献报 道的地形数据比对后基本一致。

② 情景设置合理。各情景下的刚性需水和弹性需水量主要依据《白洋淀水资源保障规划(2017—2030 年)》、《南水北调东线一期工程向北延伸应急供水方案研究报告》及文献报道值确定。 ③ 模型选择适宜。MIKE 21 是常用的水动力水质模型,已广泛应用于港口、河流、湖泊、河口及海岸的水动力模拟研究。2.1 节中详细描述了模型率定验证过程,结果表明白洋淀湿地实测水位与模拟水位吻合较好,入流、出流、降雨和蒸发之间有很好的水量平衡关系,模拟误差控制在模型计算要求范围内,该模型适宜于白洋淀的水动力模拟。

根据以上3点可以判断模型预测结果合理,模拟结果的不确定性主要来自两个方面:一是模型本身的不确定性。主要包括参数、边界条件等导致的模拟结果不确定,一般采用拉丁超立方体抽样—广义似然不确定性估计(LHS—GLUE)和 SCEM—UA 方法分析水动力学模型的不确定性。本文研究重点在于探究多水源补给对白洋淀湿地水动力的影响,模型只是作为分析工具,通过率定验证后适用于白洋淀水动力模拟即可,因此此处不再对模型本身的不确定性开展系统研究。二是实际补水情景的不确定性。目前补水方案的设置是建立在以往实际补水情景和各规划补水方案的基础上,将来实际补水方式和补水量不一定和情景设置完全吻合,但各情景模拟结果对于多水源补给对白洋淀湿地水动力影响程度仍具有重要参考价值,研究结果为白洋淀湿地水资源保障和促进淀区水体循环流动提供了科学依据。

#### 3 结论

本研究针对近年来白洋淀湿地水资源供给严重不足导致的大面积河道断流、湖泊萎缩、淀泊水动力丧失 等问题,分析不同水源补水情景下对淀区水动力条件的改善效果。结果表明:(1)不补水时白洋淀湿地整体 水动力条件不佳,淀区平均流速仅0.003 m/s,尤其是西南角马棚淀等区域水体几乎不流动,易形成死水区。 (2)引黄人冀补淀对小白河人口处水动力有明显改善,但对淀区水动力整体改善效果不佳,影响范围仅占淀 区面积的15%左右。即使建设小白河—潴龙河连通工程从小白河、潴龙河双径入淀也无法在淀区西南角和 东南角区域形成水体连通流动。(3)南水北调中线相机补水对西北角水动力改善最为明显,同时对淀区平均 流速的提升最大。(4)上游水库联合向淀区补水的方式由于入淀口分散,对淀区整体水动力循环流动的促进 效果最好。(5)南水北调东线应急补水最终入淀线路与引黄入冀补淀一致,对淀区水动力的改善效果也和引 黄入冀补淀类似,在最大入淀流量下主要对淀区东南部水动力情况改善较大。

#### 参考文献(References):

- [1] 夏军,张永勇. 雄安新区建设水安全保障面临的问题与挑战. 中国科学院院刊, 2017, 32(11): 1199-1205.
- [2] 张铁军,张海生. 白洋淀缺水分析及补水对策. 海河水利, 2009, (5): 11-12.
- [3] 黄轶康,李一平,邱利,薛偲琦,章双双.基于 EFDC 模型的长江下游码头溢油风险预测.水资源保护,2015,31(1):91-98.
- [4] Shchepetkin A F, McWilliams J C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. Ocean Modelling, 2005, 9(4): 347-404.
- [5] 景胜元. 汾河水库水质模拟与污染控制研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2004.
- [6] Hamidi-Razi H, Mazaheri M, Carvajalino-Fernúndez M, Vali-Samani J. Investigating the restoration of Lake Urmia using a numerical modelling approach. Journal of Great Lakes Research, 2019, 45(1): 87-97.
- [7] 宫雪亮,孙蓉,芦昌兴,孙秀玲. 基于 MIKE21 的南四湖上级湖水量水质响应模拟研究. 中国农村水利水电, 2019, (1): 70-76, 82-82.
- [8] 贾瑞鹏,窦明,米庆彬,赵培培,孟猛,张建岭.基于 MIKE21 的万宝湖二维水环境数值模拟.环境污染与防治,2018,40(5):527-532.
- [9] 窦明, 贾瑞鹏. 基于环境自净能力的龙凤湿地水质改善优化调控模型. 环境科学学报, 2018, 38(6): 2418-2426.
- [10] 龚然,徐进,徐力刚,祁琳琳. 基于 EFDC 城市景观湖泊水动力模拟研究. 环境工程, 2015, 33(4): 58-62, 91-91.
- [11] 郁片红. 基于 MIKE21 水动力模型的琵琶湖内循环方案. 净水技术, 2018, 37(7): 108-113.
- [12] 路洪涛, 路洪波, 刘金光. 基于 MIKE21 的城市湖泊人工水循环流场数值模拟. 环保科技, 2013, 19(2): 44-48.
- [13] 熊鸿斌, 陈雪, 张斯思. 基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法. 环境科学, 2017, 38(12): 5063-5073.
- [14] Li X J, Huang M T, Wang R H. Numerical simulation of donghu lake hydrodynamics and water quality based on remote sensing and MIKE 21.
  ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020, 9(2): 94.
- [15] El Kafrawy S B, Ahmed M H. Monitoring and protection of egyptian northern lakes using remote sensing technology//Elbeih S, Negm A, Kostianoy A, eds. Environmental Remote Sensing in Egypt. Cham: Springer, 2020; 231-284.

- [16] Li Y L, Zhang Q, Cai Y J, Tan Z Q, Wu H W, Liu X G, Yao J. Hydrodynamic investigation of surface hydrological connectivity and its effects on the water quality of seasonal lakes: insights from a complex floodplain setting (Poyang Lake, China). Science of the Total Environment, 2019, 660: 245-259.
- [17] 杨永森,高鹏杰.基于二维水动力模型的湿地生态补水研究与应用.湿地科学与管理,2015,11(3):58-62.
- [18] 胡广鑫. 二维水动力—水质耦合模型对东昌湖生态补水的研究与应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [19] 赵通阳, 王民, 范磊. 白沙象湖水动力模型分析. 水利科技与经济, 2017, 23(11): 11-18.
- [20] Gurumoorthi K, Venkatachalapathy R. Hydrodynamic modeling along the southern tip of India: a special emphasis on Kanyakumari coast. Journal of Ocean Engineering and Science, 2017, 2(4): 229-244.
- [21] Acharyulu P S N, Gireesh B, Venkateswarlu C, Apparao A P V, Prasad1 K V S R. The circulation and flow regime of upputeru, outlet channels of Kolleru Lake, India. International Journal of Lakes and Rivers, 2019, 12(1): 53-65.
- [22] Lopes J F, Silva C I, Cardoso A C. Validation of a water quality model for the Ria de Aveiro lagoon, Portugal. Environmental Modelling & Software, 2008, 23(4): 479-494.
- [23] Ahmed F. A hydrodynamic model for the Lower Rideau River. Natural Hazards, 2010, 55(1): 85-94.
- [24] 徐菲,赵彦伟,杨志峰,陈彬. 白洋淀生态系统健康评价. 生态学报, 2013, 33(21): 6904-6912.
- [25] 庄长伟,欧阳志云,徐卫华,白杨.近 33年白洋淀景观动态变化. 生态学报, 2011, 31(3): 839-848.
- [26] 高彦春, 王金凤, 封志明. 白洋淀流域气温、降水和径流变化特征及其相互响应关系. 中国生态农业学报, 2017, 25(4): 467-477.
- [27] 徐卫华, 欧阳志云, van Duren I, 郑华, 王效科, 苗鸿, 曹全虎. 白洋淀地区近 16 年芦苇湿地面积变化与水位的关系. 水土保持学报, 2005, 19(4): 181-184, 189-189.
- [28] 崔保山. 白洋淀沼泽化驱动机制与调控模式. 北京: 科学出版社, 2017.
- [29] 孙玲玲, 王树谦, 石宝红, 李苏. 基于 MIKE21FM 的黄壁庄水库水动力模拟研究. 人民珠江, 2017, 38(9): 64-68.
- [30] 李娜, 叶闵. 基于 MIKE21 的三峡库区涪陵段排污口 COD 扩散特征模拟及对下游水质的影响. 华北水利水电学院学报, 2011, 32(1): 128-131.
- [31] 杨泽凡, 胡鹏, 赵勇, 曾庆慧. 新区建设背景下白洋淀及入淀河流生态需水评价和保障措施研究. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(6): 563-570.
- [32] 果有娜, 刘顺萍, 梁学玉. 南水北调东线一期工程北延应急供水方案研究. 海河水利, 2018, (3): 1-3.