

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.05.005

洪泽湖中低水位下泄流能力数值模拟

薛联青^{1,2}, 成 诚¹, 汪 露³, 张 敏³, 张 开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. 江苏省洪泽湖水利工程管理处, 江苏 淮安 223100)

摘要:为研究淮河中下游发生中小洪水时洪泽湖的泄流能力,建立淮河蚌埠至洪泽湖出湖口三河闸段一二维耦合水动力模型,模拟分析了重点河段切滩对洪泽湖中低水位下泄流能力的影响及切滩前后的流域行洪过程。结果表明:在5年一遇洪水过程中,洪峰时刻淮河干流蚌埠、临淮关、香庙、浮山和洪山头水文站水位较切滩前分别下降0.02 m、0.07 m、0.21 m、0.55 m和0.70 m,漫滩时间分别减少1 d、4 d、9 d、9 d和17 d;洪泽湖三河闸站水位最高值为13.33 m,相比切滩之前升高0.07 m,湖泊对应的下泄流量为8300 m³/s,较切滩前增大800 m³/s,泄流能力提高11%。

关键词:行洪模拟;泄流能力;切滩工程;漫滩时间;水动力模型;洪泽湖

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)05-0032-07

Numerical simulation of discharge capacity under middle and low water levels of Hongze Lake//XUE Lianqing^{1,2}, CHENG Cheng¹, WANG Lu³, ZHANG Min³, ZHANG Kai³ (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. Jiangsu Hongze Lake Water Conservancy Project Management Office, Huaian 223100, China)

Abstract: In order to study the discharge capacity of Hongze Lake in the middle and lower reaches of Huaihe River during medium and small floods, a one-dimensional and two-dimensional coupling hydrodynamic model was established for the Sanhezha section from Bengbu of Huaihe River to the outlet of Hongze Lake. The impact of key river reaches cutting beach on discharge capacity under middle and low water levels of Hongze Lake and the flood discharge process in watershed before and after cutting beach were simulated and analyzed. The results show that under the five-year flood process, the water level of Bengbu, Linhuaiguan, Xiangmiao, Fushan and Hongshantou hydrologic stations in the main stream of Huaihe River decreased by 0.02 m, 0.07 m, 0.21 m, 0.55 m and 0.70 m, respectively after cutting beach during the flood peak period, and the floodplain time decreased by 1 day, 4 days, 9 days, 9 days and 17 days, respectively. The maximum water level of Sanhezha Station in Hongze Lake was 13.33 m, which was 0.07 m higher than that before cutting beach. The discharge volume corresponding to the lake was 8300 m³/s, which was 800 m³/s higher than that before cutting beach and the discharge capacity increased by 11%.

Key words: flood discharge simulation; discharge capacity; cutting beach project; floodplain time; hydrodynamic model; Hongze Lake

淮河流域位于我国东部,湖泊众多^[1],较大的湖泊有洪泽湖、高邮湖和邵伯湖等。地处九河下梢的洪泽湖是流域内最大的湖泊,为我国四大淡水湖之一,也是我国目前人工修筑的最大平原水库之一,承接淮河中上游约16万km²的全部来水^[2],最大入湖流量达1.98万m³/s(1931年)^[3],抗洪作用在整个流域具有举足轻重的地位。洪泽湖湖面是淮河中游的侵蚀基准面,由于淤积湖底不断抬高,湖区范围

因而不断沿河上溯,湖面上升引起淮河中游基准面上升,大部分泥沙特别是推移质泥沙淤积在中游河谷,使中游河道坡降变缓。目前淮河下游江苏省的洪泽湖湖底高程为10~11m,比淮河中游的蚌埠河底高程高出2m,从而使得淮河干流中下游河床出现倒比降^[4]。淮河干流全长约1000km,总落差约为200m^[5-6],淮河干流上游及淮南、淮北支流坡降大、汇流快,产生的洪水峰高历时短,但进入干流中

基金项目:国家自然科学基金(51779074);江苏省水利科技项目(2019031);安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2019A1279)

作者简介:薛联青(1973—),女,教授,博士,主要从事环境水文及生态水文研究。E-mail: lqxue@hhu.edu.cn

下游河床后,受倒比降限制,洪水过程变得平缓,一旦流域发生中小型洪水,洪泽湖处于中低水位下,泄流能力不足,洪水下泄时间大幅延长,加之流域平原洼地众多,平缓的洪水过程大幅延长了漫滩的时间,两岸涝灾严重^[7]。因此,对中低水位下洪泽湖的行洪能力进行分析,并根据分析结果制定合理的方案,对洪泽湖的洪涝治理具有重要的现实意义。

1 研究区概况

淮河中游(图1)上起安徽蚌埠,下至洪泽湖出湖口三河闸,地处 $32^{\circ}85'N \sim 33^{\circ}94'N$ 、 $117^{\circ}42'E \sim 118^{\circ}94'E$ 之间,位于亚热带季风气候和温带季风气候的分界处。洪泽湖位于淮河中游末端,承接淮河中上游约 16万 km^2 的来水,淮河干流入流量占总流量的70%以上^[8]。湖区年平均降水量为 925.5 mm ,最大年降水量为 1240.9 mm ,最小年降水量为 532.9 mm 。降水年内分布极不均匀,一般集中在汛期6—9月^[9],多年平均降水量为 605.9 mm ,占年总降水量的65.5%,集中程度从南向北递增。年降水量的空间分布从北向南、自西向东逐渐增多。湖区多年平均蒸发量为 1592.2 mm ,旱涝灾害的发生较为频繁^[10]。洪山头至老子山河段为洪泽湖的入湖河道,阻水滩群较多,主要的滩地如图1所示。腰东滩位于洪山头下游 1.5 km 处,滩地面积约为 20 km^2 ,高程 $12.2 \sim 14.0 \text{ m}$,全滩为圈圩;中港滩位于老子山上游 10 km 处,滩地面积约为 17 km^2 ,高程 $10.8 \sim 11.6 \text{ m}$,以圈圩为主;附淮滩位于老子山下游 1 km 处,滩地面积约为 11 km^2 ,高程 $12.2 \sim 12.7 \text{ m}$,大部分为圈圩;新滩位于附淮滩以北 3 km 处,滩地面积约为 9 km^2 ,高程 $11.9 \sim 13.3 \text{ m}$,大部分为圈圩。

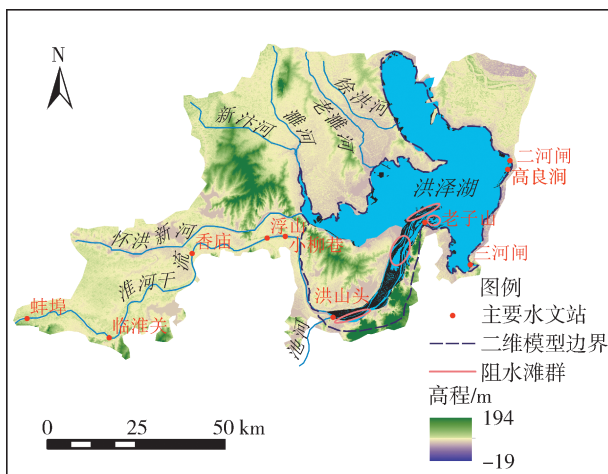


图1 研究区域概况

Fig.1 Overview of study area

淮河中游蚌埠至洪山头河段全长约 140 km ,河道坡降较缓,部分河段呈倒比降。两岸洼地众多,高

程一般为 $15 \sim 20 \text{ m}$,低于河道设计洪水位 $4 \sim 6 \text{ m}$,低洼地特别是沿河洼地排涝困难^[11]。

2 模型构建

2.1 数据来源

根据建模实际要求,利用已有的高程点及断面资料,并参考相关文献与卫星地图,收集淮河干流蚌埠至老子山河段34个断面数据作为一维模型的断面资料,考虑淮河干流断面形态变化,在浮山至洪山头的倒比降河段设置18个断面,蚌埠至临淮关、临淮关至浮山河段分别设置7个和9个断面;二维模型中,由于洪泽湖的地形较为平坦,地形资料选取 90 m 的DEM数据,再根据洪泽湖实际湖底高程将湖区散点重采样为 1000 m ,其余区域地形资料为 30 m 的DEM数据。模拟所需的水文资料包括洪泽湖主要水文站的日尺度出入湖流量和水位;气象资料来源于中国气象数据网,包括模拟时段洪泽湖地区的逐日降雨和蒸散发数据、日平均温度、日最高温度、日最低温度及平均风速与风向。淮河干流断面一般比较规则,因此节点平滩水位采用断面宽深比(b/H)曲线最低点时节点水位,并考虑沿程水位衔接,由此确定如表1所示的5个主要断面的平滩水位,再由内插法得到淮河蚌埠以下沿岸的平滩水位。

表1 淮河干流主要断面平滩水位

Table 1 Flat beach water level of main sections of the main stream of the Huaihe River

断面名称	与蚌埠闸的距离/km	平滩水位/m
蚌埠	0	18.23
临淮关	35	17.53
香庙	82	16.59
浮山	101	15.46
洪山头	137	15.11

2.2 一二维耦合模型构建

在进行模型构建时,要充分考虑耦合模型的收敛性。影响耦合模型收敛性的因素众多,包括模型时间步长、二维模型网格尺寸、地形坏点、耦合边界地形匹配程度、初始条件、糙率以及耦合边界连接方式等,需对上述可能出现的问题进行逐一排除。首先将一维河网模型调试稳定,调整时间步长;在二维模型中,需对部分网格进行局部加密并充分平滑过渡,删除地形坏点,避免局部死水区导致的计算发散;在一维模型和二维模型均调试稳定后,要重点解决耦合边界处可能导致的发散问题,耦合边界应设于地形变化较为平顺的区域,对于模型耦合界面附近的地形作适当修正以避免出现较大的地形突变;最后,适当调整耦合模型各部分的初始条件以及糙

率等,尽量避免初始条件与边界条件相差过大以及倒比降河段糙率过小等情况。

依据水力学特性,将一维水动力模型的范围设置为淮河干流蚌埠至洪山头河段,起到输水及流量分配的作用,全长约 137 km,沿线控制断面 34 个。一维河网上游边界为蚌埠,采取流量进行控制;下游边界选取洪山头,此处为一二维模型耦合断面,根据模型模拟原理,将此处边界条件设置为名义水位边界,即给予边界任意水位值,不影响模型计算结果。

洪山头至老子山河段长约 40 km,为洪泽湖的入湖河道,河道分为三汉,各汉之间设置有可漫顶的生产圩,流态复杂,且该河段呈倒比降,洪山头河底高程约为 8 m,老子山约为 10 m,壅水严重。考虑实际计算需要与模型稳定性,设定二维模型计算范围为洪山头至洪泽湖出口三河闸段,并包括部分圈圩及行洪区,起到行洪与调蓄的作用。格网设置为非结构化网格,包含 62 319 个网格,32 894 个节点。模型除耦合断面外共有 9 个开边界,其中池河、怀洪新河、新汴河、濉河、徐洪河、老濉河为上边界,采用流量控制;三河闸、二河闸、高良涧为下边界,采用水位流量关系曲线进行控制;同时考虑计算精度,在入湖河道及各开边界处网格加密为 200 m,其余区域网格设置为 1 000 m。

一维河网模型中,区间降雨选取淮河干流小柳巷站实测降雨资料,二维网格模型气象条件的设定采用洪泽湖附近盱眙站实测资料。由于模拟工况选择中小型洪水,对研究区域其余行蓄洪区及部分水工建筑物不进行特殊设置,洪泽湖周边生产圈圩按照堤防建筑物的形式在二维模型中设置,高程为 16 m,当水位超过圩顶时,按堰流公式计算水位。

模型通过 Mike Flood 软件实现耦合^[12-13],Mike Flood 采用动态解法,通过定义一维水流计算节点和二维计算网格的连接方式,可以实现不同情景的模拟,其中标准连接多用于模拟河湖连通水量交换,将多个 Mike21 网格与 Mike11 河段底端相连, Mike11 计算模型的流量传递给 Mike21, Mike21 将耦合边界水位返回到 Mike11 中,两者结合进行模拟。因此,本文选择标准连接进行模型的耦合。

3 模型率定与验证

为研究中低水位下洪泽湖的行洪能力,根据 1951—2017 年实测流量资料,对淮河干流洪峰流量及最大洪量进行频率分析,绘制淮河干流蚌埠站、小柳巷站洪峰流量的频率曲线,确定蚌埠站 5 年一遇

洪峰流量为 $6\,300\text{ m}^3/\text{s}$,小柳巷站 5 年一遇洪峰流量为 $6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。由于淮河中下游的洪水过程较为平缓,一次洪水过程可长达 30 d 甚至更长时间,在此情况下,对蚌埠站和小柳巷站最大 30 d 洪量进行频率分析,确定两水文站 5 年一遇 30 d 最大洪量分别为 156 亿 m^3 与 144 亿 m^3 。同时因为淮河流域防洪规划的不断推进,选取较新的洪水过程进行率定验证。综合考虑,选择率定时间为 2015 年 6 月 26 至 8 月 22 日,蚌埠站实测洪峰流量为 $5\,700\text{ m}^3/\text{s}$,小柳巷站实测洪峰流量为 $5\,500\text{ m}^3/\text{s}$,30 d 最大洪量为 120 亿 m^3 ;验证期为 2017 年 9 月 1 日至 11 月 1 日,蚌埠站实测洪峰流量为 $5\,000\text{ m}^3/\text{s}$,小柳巷站实测洪峰流量为 $4\,600\text{ m}^3/\text{s}$,30 d 最大洪量为 128 亿 m^3 。

水动力模型率定的关键参数为模拟区域的糙率^[14-18],由于模型范围较大、影响因素复杂,考虑到模型包括河网与湖泊,故率定水文站选取淮河干流蚌埠站和小柳巷站、洪泽湖入湖口老子山站及洪泽湖出湖口三河闸站。率定方式采用整体与局部相结合的方法,首先对一维河网和二维网格模型分别进行率定,在确定子模型的糙率后将模型进行耦合,依据耦合结果对各部分糙率进行调整。本次率定对不同区域赋值不同的糙率,通过对糙率的反复率定,确定淮河干流蚌埠至临淮关、临淮关至浮山、浮山至洪山头河段的糙率分别为 0.024、0.029 和 0.027,洪泽湖滩地圈圩的糙率为 0.033,湖区为 0.02。

为对模拟结果进行定量化评价,选用纳什效率系数(NSE)作为模拟的评价标准。率定期和验证期两场洪水模拟结果如图 2 和图 3 所示,率定期小柳巷站流量模拟的纳什效率系数达到了 0.98,蚌埠站、老子山站、三河闸站的水位模拟的纳什效率系数分别达到了 0.96、0.91 和 0.94;验证期小柳巷站流量纳什效率系数为 0.99,蚌埠站、老子山站、三河闸站的水位模拟纳什效率系数分别为 0.92、0.97 和 0.94,说明模型可以很好地模拟中低水位下洪泽湖的行洪过程。

4 模型模拟结果与分析

4.1 现状条件下泄流能力

根据实测资料,2012 年蚌埠站洪峰流量为 $6\,800\text{ m}^3/\text{s}$ (7 月 5 日),30 d 最大洪量为 156 亿 m^3 ,与 5 年一遇洪水过程最为接近,故选取 2012 年洪水过程进行模拟。各入湖河道流量过程如图 4 所示。

模拟结果显示,在蚌埠站洪峰流量 $6\,800\text{ m}^3/\text{s}$ 的情况下,淮河干流的水位普遍较高,随着河道断面与蚌埠闸距离的增加,漫滩时间逐渐加长,此时洪泽湖水位较低,泄流能力差。淮河干流各水文站日均

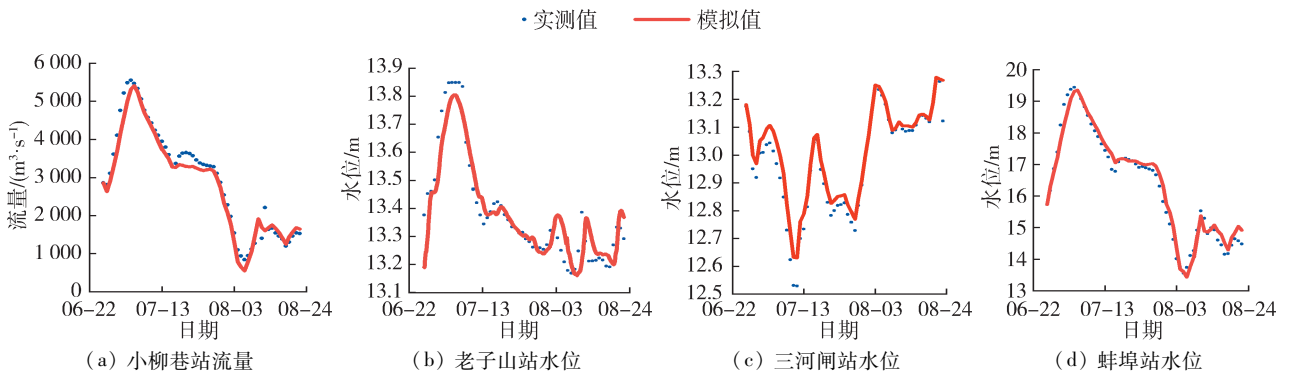


图2 率定期模型水文要素模拟结果

Fig. 2 Simulation results of hydrological elements in calibration periods

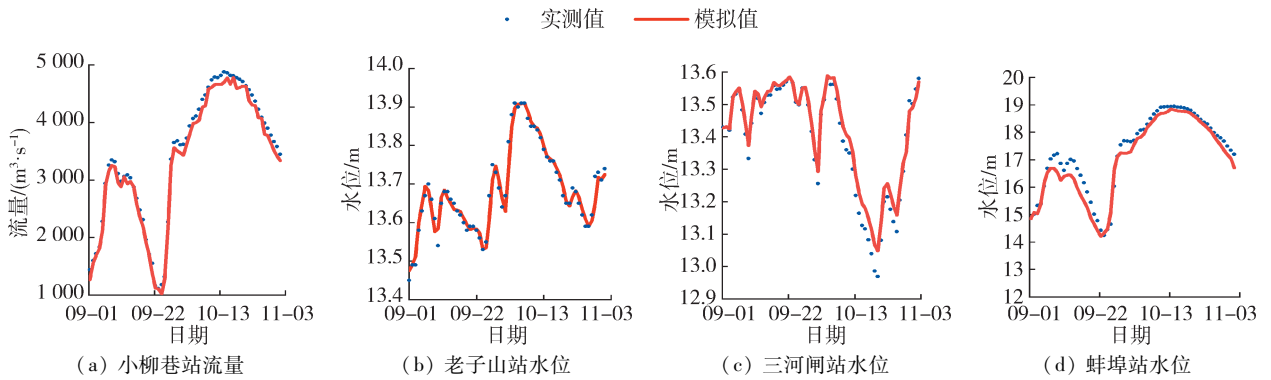


图3 验证期模型水文要素模拟结果

Fig. 3 Simulation results of hydrological elements in validation periods

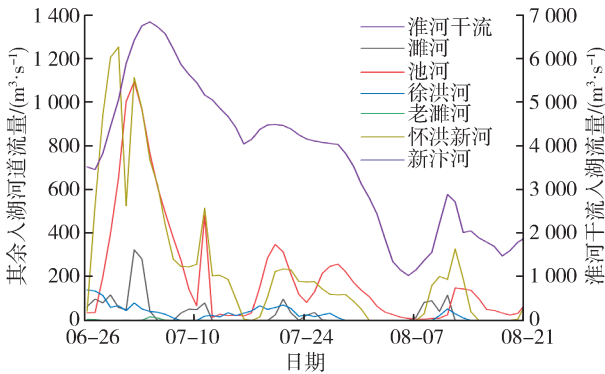


图4 2012年5年一遇洪水洪泽湖各入湖河流流量过程

Fig. 4 Discharge process of rivers entering Hongze

Lake once in five years flood in 2012

水位于7月5日到达最大值,蚌埠站最高水位为20.10 m,高出平滩水位1.87 m,漫滩时间17 d;临淮关站最高水位为19.51 m,高出平滩水位1.98 m,漫滩时间26 d;香庙站最高水位为18.02 m,高出平滩水位1.43 m,漫滩时间25 d;浮山站最高水位为17.28 m,高出平滩水位1.82 m,漫滩时间34 d;洪山头站最高水位为16.08 m,高出平滩水位0.97 m,漫滩时间33 d。模拟的水位与漫滩时间表明,淮河干流洪水在流域中下游过程变得平缓,下泄不畅,漫滩时间加长,为流域的排涝带来困难。洪泽湖在应对中小洪水时存在行洪能力不足的情况,因此,通过整

治提高洪泽湖的行洪能力十分关键。

4.2 拟定切滩方案下研究区域泄流能力复核

导致洪泽湖泄流能力不足的主要原因是湖区水位偏低,此时洪泽湖下泄流量小,难以达到下泄要求的水位,加之洪泽湖入湖河道沿程滩地圈圩众多,增大了阻水面积与糙率,更加大了洪泽湖泄洪的困难。根据《洪泽湖保护规划报告》^[19],洪泽湖入湖河段为规划保护的片区,部分滩地需要实行切滩还湖。因此,结合实际要求,本文设置切除洪泽湖入湖河道腰东滩、中港滩、附淮滩、新滩方案,对比切滩前后研究区域水动力过程。

考虑入湖河道的河床变化情况,上游洪山头处河底高程约为8 m,下游老子山处河底高程约为10 m,现将切滩方案设定为腰东滩、中港滩、附淮滩及新滩的高程分别切滩至9 m、9 m、10 m和10 m。

对于切滩后的糙率确定,参考相关研究^[20],将切滩等同于河道水位上升的情况,此时切滩导致的下垫面形状的改变对糙率的变化影响较小,故糙率可参考切滩前的滩地糙率进行赋值,同时考虑到切滩对于滩地植物的生长抑制,最终设置滩地糙率高于河道糙率0.01。因此,切滩后,腰东滩和中港滩的糙率为0.028,附淮滩和新滩的糙率为0.021。

切滩前后模型的计算结果对比如图 5 所示,切滩后淮河干流的水位整体下降,越靠近湖区下降的幅度越大,如 7 月 5 日淮河干流洪峰时刻,蚌埠、临淮关、香庙、浮山、洪山头站水位分别下降 0.02 m、0.07 m、0.21 m、0.55 m 和 0.70 m,河道漫滩时间分别减少 1 d、4 d、9 d、9 d 和 17 d,河道整体漫滩时间明显缩短。

图 6 为三河闸站水位最高时刻(7 月 13 日)洪

泽湖水位与流速变化,切滩后,湖区水位较切滩前整体升高 0~0.08 m,入湖河道水位较切滩前下降 0~0.07 m;切滩后,入湖河道与湖区流速明显增大。从二维模型水位变化来看,切滩后湖区水位整体上升,河道水位下降,有效减轻了河道的洪涝灾害;从流速变化来看,二维模型流速整体增大,洪水下泄速度加快。

由于三河闸站是洪泽湖重要的水位控制站,对其进行水位变化与流速变化(图 7)的单独分析。从

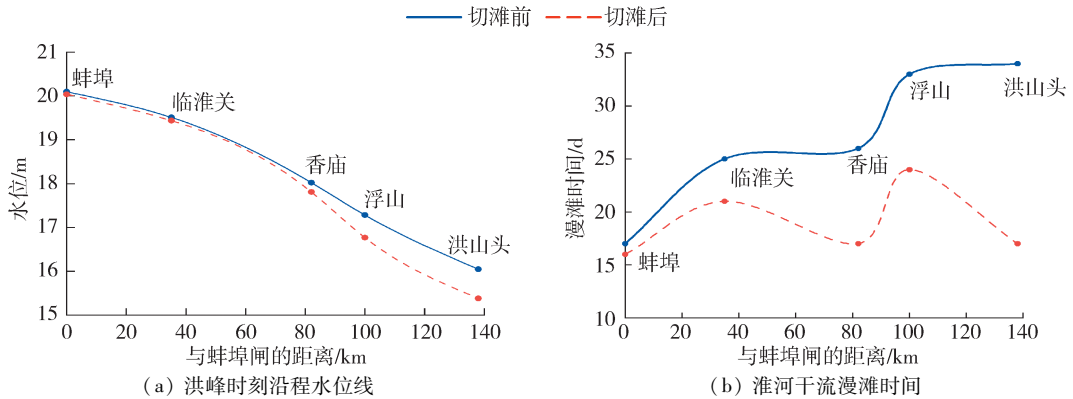


图 5 切滩前后淮河干流沿程水位线与漫滩时间变化

Fig. 5 Variation of water level and floodplain time along the main stream of Huaihe River before and after cutting beach

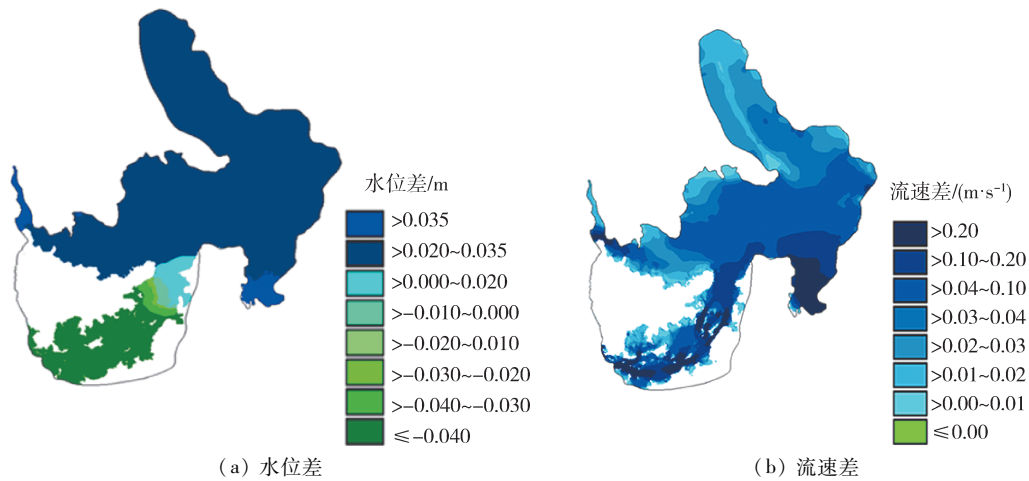


图 6 切滩前后洪泽湖湖区水位差与流速差

Fig. 6 Water level difference and velocity difference of Hongze Lake before and after cutting beach

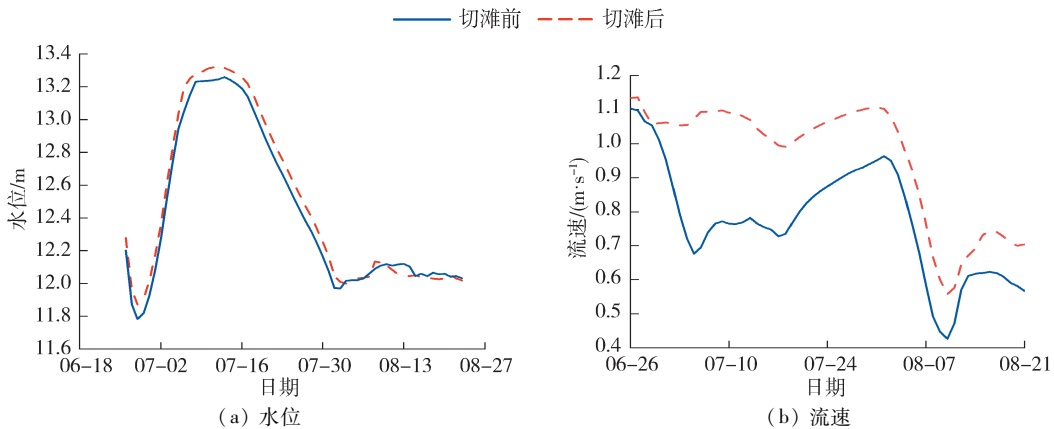


图 7 切滩前后三河闸站水位与流速变化

Fig. 7 Variation of water level and velocity at Sanhezha station before and after cutting beach

全洪水过程来看,切滩前后三河闸站水位变化趋势一致,时间上也基本吻合,这是由于只对洪泽湖入湖河道进行了切滩处理,使得洪水在入湖河道下泄顺畅,并不影响洪水在淮河干流的演进,对整体洪水过程影响较小。在开始时刻,因为洪水入湖需要时间,切滩前后三河闸站水位均处于下降状态,但由于入湖较为顺畅,洪水流量较大,切滩后三河闸站水位的下降幅度小于切滩前。随着入湖流量的增大,切滩前后三河闸站水位均在不断上升,切滩后的水位始终高于切滩前,两者在7月13日同时达到最大值,切滩前三河闸站水位最高值为13.26 m,此时洪泽湖对应的下泄流量为7500 m³/s;切滩后水位最高值为13.33 m,相比切滩前升高0.07 m,此时洪泽湖对应的下泄流量为8300 m³/s,较切滩前增大800 m³/s,行洪能力提高11%。随着入湖流量的降低,三河闸站水位开始降低,在8月5日后,由于入湖流量较小,切滩前入湖河道的行洪能力已满足过水需求,切滩前后的水位趋于一致。切滩后三河闸站的流速整体增大,增加值在0.03~0.48 m³/s之间,这说明洪水下泄速度加快,洪泽湖的行洪能力有所提升。

洪泽湖切滩前后日均下泄流量的变化如图8所示,总体过程与水位相似,与入湖流量变化呈正相关关系,不同点在于7月7—16日由于切滩后湖区水位升高至13.30 m以上,二河闸开闸泄流,洪泽湖下泄流量增大较为明显。

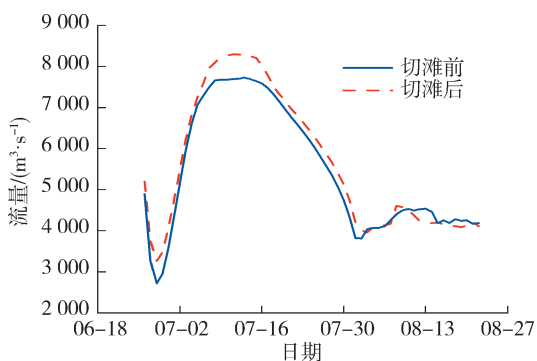


图8 切滩前后洪泽湖日均下泄流量

Fig.8 Average daily discharge volume of Hongze Lake before and after cutting beach

图5~8的模拟结果表明,随着河道与湖区距离的增加,河道水位对切滩工程的敏感度逐渐降低,蚌埠站水位下降仅0.02 m,洪峰时刻淮河干流主要水文站水位高于平滩水位,在发生中小洪水时仍有漫滩风险,这可能与淮河干流浮山至洪山头河段河道狭窄、坡降为负有关。但对洪泽湖入湖河道的部分滩地进行切滩,可在流域发生中小洪水时有效降低淮河干流水位,减少河道漫滩时间,增强洪泽湖泄流能力。因此,将洪泽湖入湖河道的切滩工程与浮山

至洪山头河段的河道疏浚相结合对淮河中下游洪涝灾害的治理至关重要。

5 结论

a. 基于Mike Flood软件,将一维模型Mike11和二维模型Mike21耦合,建立淮河中下游蚌埠至洪泽湖出湖口三河闸段一二维耦合模型,选取2015年与2017年实测洪水过程对模型进行了率定与验证,模拟结果较为精确,模型适用性好。选用2012年5年一遇洪水过程对洪泽湖行洪过程进行模拟,模拟结果显示,淮河干流的水位普遍较高,随着河道断面与蚌埠闸距离的增加,漫滩时间逐渐加长,此时洪泽湖水水位较低,泄流能力差,在应对中小洪水时存在泄流能力不足的情况。

b. 为增强洪泽湖的泄流能力,减少淮河中下游漫滩时间,减轻沿淮洼地的排涝困难,对洪泽湖入湖河道腰东滩、中港滩、附淮滩、新滩分别切滩至9 m、9 m、10 m和10 m,运用耦合模型重新对2012年洪水过程进行切滩后的行洪分析。结果表明,切滩后洪峰时刻淮河干流各水文站的水位明显下降,越靠近湖区下降的幅度越大,沿程漫滩时间显著减少;洪泽湖水水位明显升高,湖泊下泄能力增强;二维模型区域流速整体加快,洪水下泄通畅。

c. 随着河道与湖区距离的增加,河道水位对切滩工程的敏感度逐渐降低,切滩后淮河干流主要水文站洪峰时刻水位仍高于平滩水位,淮河干流在流域发生中小洪水时仍有漫滩风险。因此,为进一步减轻淮河中下游的洪涝灾害,需要将洪泽湖入湖河道的切滩工程与浮山至洪山头河段的河道疏浚相结合。

参考文献:

- [1] 李晓英,吴淑君,王颖,等. 淮河流域陆地水储量与干旱指标分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 80-85. (LI Xiaoying, WU Shujun, WANG Ying, et al. Analysis of terrestrial water storage and drought indices in the Huaihe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 80-85. (in Chinese))
- [2] 薛联青,沈海岑,张敏,等. 洪泽湖换水能力的时空分布特征[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 13-20. (XUE Lianqing, SHEN Haicen, ZHANG Min, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of water exchange capacity in Hongze Lake [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 13-20. (in Chinese))
- [3] 张瑞娟. 1931年江淮流域水灾及其救济研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2006.
- [4] 郭庆超,关见朝,韩其为,等. 冯铁营引河对淮河干流洪

- 水位及河床演变影响的研究[J]. 泥沙研究, 2018, 43(6):1-7. (GUO Qingchao, GUAN Jianzhao, HAN Qiwei, et al. Effect of Fengtieying diversion channel on flood level and riverbed processes of Huaihe River[J]. Journal of Sediment Research, 2018, 43(6):1-7. (in Chinese))
- [5] 李致家, 梁世强, 霍文博, 等. 淮河上中游复杂流域洪水预报[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(1):1-6. (LI Zhijia, LIANG Shiqiang, HUO Wenbo, et al. Study on the flood forecasting in complex basins of upper and middle reaches of Huaihe River[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(1):1-6. (in Chinese))
- [6] 李志伟, 丁凌峰, 唐洪武, 等. 淮河干流污染物分布及变化规律[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(1):29-38. (LI Zhiwei, DING Lingfeng, TANG Hongwu, et al. Distribution and variation of pollutants in main stream of Huaihe River[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(1):29-38. (in Chinese))
- [7] 邓恒. 洪泽湖与淮河河湖关系及其调蓄能力研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [8] 彭兆亮, 汪院生, 胡维平, 等. 洪泽湖风生流对风场和水位变化响应特征[J]. 湖泊科学, 2021, 33(6):1925-1939. (PENG Zhaoliang, WANG Yuansheng, HU Weiping, et al. Responses of wind-driven circulation to wind field and water level variations in Lake Hongze[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(6):1925-1939. (in Chinese))
- [9] 李波, 濮培民. 淮河流域及洪泽湖水质的演变趋势分析[J]. 长江流域资源与环境, 2003(1):67-73. (LI Bo, PU Peimin. Study on the evolution tendency of water quality in Huai River Basin and Hongze Lake[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2003(1):67-73. (in Chinese))
- [10] 叶正伟, 朱国传. 洪泽湖流域洪涝灾害演变趋势及其与EL Niño事件关系[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(11):1086-1092. (YE Zhengwei, ZHU Guochuan. Changing trends of floods and its relationship with EL Niño event in Hongze Lake Catchment, China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(11):1086-1092. (in Chinese))
- [11] 李燕, 夏广义. 淮河中游易涝洼地涝灾特性及成因研究[J]. 水利水电技术, 2012, 43(6):93-96. (LI Yan, XIA Guangyi. Study on characteristics and causation of waterlog disaster of waterlogging depressions along mid-reach of Huaihe River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(6):93-96. (in Chinese))
- [12] 施露, 董增川, 付晓花, 等. Mike Flood在中小河流洪涝风险分析中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(4):350-357. (SHI Lu, DONG Zengchuan, FU Xiaohua, et al. Application of Mike Flood to analysis of flood and waterlogging risks of medium and small rivers[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2017, 45(4):350-357. (in Chinese))
- [13] 栾震宇, 金秋, 赵思远, 等. 基于MIKE FLOOD耦合模型的城市内涝模拟[J]. 水资源保护, 2021, 37(2):81-88. (LUAN Zhenyu, JIN Qiu, ZHAO Siyuan, et al. Simulation of urban waterlogging based on MIKE FLOOD coupling model[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2):81-88. (in Chinese))
- [14] 施明新, 吴发启, 田国成. 地表糙率对坡面流速影响的试验研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(6):117-124. (SHI Mingxin, WU Faqi, TIAN Guocheng. Experimental study on effect of surface roughness on overland flow velocity[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(6):117-124. (in Chinese))
- [15] 倪培桐, 王扬, 陈卓英. 东江下游及三角洲河道糙率分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(6):155-159. (NI Peitong, WANG Yang, CHEN Zhuoying. Analysis of river roughness in downstream of Dongjiang River and delta[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2018, 16(6):155-159. (in Chinese))
- [16] 顾峰峰. 芦苇阻力系数物模及湿地水流数模研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [17] 叶荣辉, 宋志尧, 吴小明, 等. 浅水方程模拟中确定糙率的回归系数法[J]. 水科学进展, 2013, 24(4):574-580. (YE Ronghui, SONG Zhiyao, WU Xiaoming, et al. A regression coefficient method for calibrating Manning's coefficients in shallow water flow modeling[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(4):574-580. (in Chinese))
- [18] 方神光, 张文明, 张康, 等. 西江中游干支流河道糙率研究[J]. 泥沙研究, 2016(2):20-25. (FANG Shengguang, ZHANG Wenming, ZHANG Kang, et al. Study on roughness in the middle reaches of Xijiang River with main tributaries[J]. Journal of Sediment Research, 2016(2):20-25. (in Chinese))
- [19] 江苏省洪泽湖水利工程管理处. 洪泽湖保护规划报告[R]. 淮安: 江苏省洪泽湖水利工程管理处, 2006.
- [20] 张雨山, 王双银, 臧聪敏, 等. 基于原型观测的输水渠道糙率取值及变化分析[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(1):24-29. (ZHANG Yushan, WANG Shuangyin, ZANG Congmin, et al. Variation analysis of roughness coefficient value for water conveyance channels based on prototype observation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(1):24-29. (in Chinese))

(收稿日期:2021-08-20 编辑:熊水斌)