

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.03.020

复杂河网地区气候-水文-水动力耦合模型模拟

付晓花^{1,2},董增川³,韩锐¹,王盼¹,程龙¹

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 2. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023; 3. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:以淮河流域中下游结合部的洪泽湖周边滞洪区为研究对象,基于紧耦合技术,将一维和二维水动力模型进行耦合,基于松耦合技术,将气候模型与水文模型、水文模型与水动力模型进行耦合,实现了流域、河网、蓄滞洪区和湖泊复杂系统气候-水文-水动力单向耦合,并对气候变化影响下的复杂河网地区水流演进进行了模拟。结果表明:构建的气候-水文-水动力耦合模型对洪泽湖周边滞洪区洪水演进具有较好的模拟能力和适应性;气候变化导致未来淮河流域洪水量级增加,加大了洪泽湖周边滞洪区的洪水风险。

关键词:气候模型;水文模型;水动力模型;耦合技术;复杂河网地区;淮河流域

中图分类号:P33 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)03-0162-08

Simulation of climate-hydrologic-hydrodynamic coupling model in complex river network area // FU Xiaohua^{1,2}, DONG Zengchuan³, HAN Rui¹, WANG Pan¹, CHENG Long¹ (1. Northwest Engineering Corporation Limited, Power China, Xi'an 710065, China; 2. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Taking the flood detention area around Hongze Lake at the junction of the middle and lower reaches of the Huaihe River Basin as the research object, the one-dimensional and two-dimensional hydrodynamic models are coupled based on the tight coupling technology. Based on the loose coupling technology, climate model is coupled with hydrological model and hydrodynamic model. The climate-hydrologic-hydrodynamic one-way coupling of the complex system of the basin, river network, flood storage and detention area and lake is realized, and the water flow evolution in the complex river network area under the influence of climate change is simulated. The results show that the constructed climate-hydrologic-hydrodynamic coupling model has good simulation ability and adaptability for flood routing in the flood detention area around Hongze Lake. Climate change will increase the magnitude of future floods in the Huaihe River Basin, and increase the flood risk in the flood detention area around Hongze Lake.

Key words: climate model; hydrological model; hydrodynamic model; coupling technology; complex river network area; Huaihe River Basin

受全球气候变化的影响,近年全球暴雨洪涝、台风、高温等频发。洪涝灾害号称“百害之首”,是很多自然灾害发生过程的链式效应中造成巨大损失的重要一环^[1]。全球气候变化在一定程度上改变了流域水文循环的时空格局,影响了极端水文事件发生的频率、强度和时空分布特征,加剧了洪水灾害的风险^[2-3]。洪泽湖作为淮河流域中下游最大的拦洪蓄水平原水库型湖泊,承泄淮河上中游 15.8 万 km² 流域面积的来水,洪泽湖周边滞洪区是淮河流域防

洪工程体系中重要的防灾减灾措施,气候变化引起的极端洪水事件对洪泽湖周边滞洪圩区的洪水管理和决策提出了新的挑战^[4-6]。

目前模拟复杂河网地区水流演进的主要方法有水文学方法^[7-8]、水动力学方法^[9-10]和水文水动力耦合方法^[11-12]。复杂河网地区河道内水流速度缓慢,多圩区打乱了流域产汇流规律,水文学方法计算容易忽略水流运动规律,降低出口断面洪水模拟的精度;水动力学方法着重于水流运动规律的精细化模

基金项目:江苏省水利厅科技计划项目(JSSL-SZY-2019003)

作者简介:付晓花(1990—),女,工程师,博士,主要从事流域水文水动力模拟和气候变化影响研究。E-mail: 739678443@qq.com

拟,可以反映河道内细微差别,一维水动力模型可以得到水位和流量这两个重要的水力参数,二维水动力模型还可以得到淹没范围、淹没水深、淹没历时、洪水流速和流向等重要的洪水风险要素,但二维水动力模型存在稳定性差、计算效率低等问题。水文模型和水动力模型两者耦合可以弥补各自的不足,实现复杂河网地区水流演进模拟^[13-14]。随着全球气候变化,极端洪水事件频发,有必要开展气候模型、水文模型和水动力模型三者的耦合研究,进而模拟气候变化影响下的复杂河网地区水流演进过程。

本文以洪泽湖周边滞洪区为研究对象,基于全球气候模式、水文模型和水动力模型构建复杂河网地区气候-水文-水动力单向耦合模型,开展气候变化影响下的洪泽湖周边滞洪区水流演进模拟研究,以期气候变化影响下区域防灾减灾和风险管理提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

洪泽湖位于淮河流域中下游,主要入湖河道有7条:淮河干流、徐洪河、怀洪新河、新睢河、老睢河、新汴河以及经女山湖从洪山头处汇入淮河干流的池河,其中淮河干流入湖流量占入湖总流量的70%。淮河上中游洪水经洪泽湖调蓄后,由入江水道、分淮入沂、入海水道和苏北灌溉总渠分别入江、入海。洪泽湖及周边滞洪区地理位置为东经118°8′~118°58′,北纬32°54′~33°45′(图1),包括洪泽湖大堤以西、废黄河以南、泗洪县西南高地以东以及盱眙县的沿湖、沿

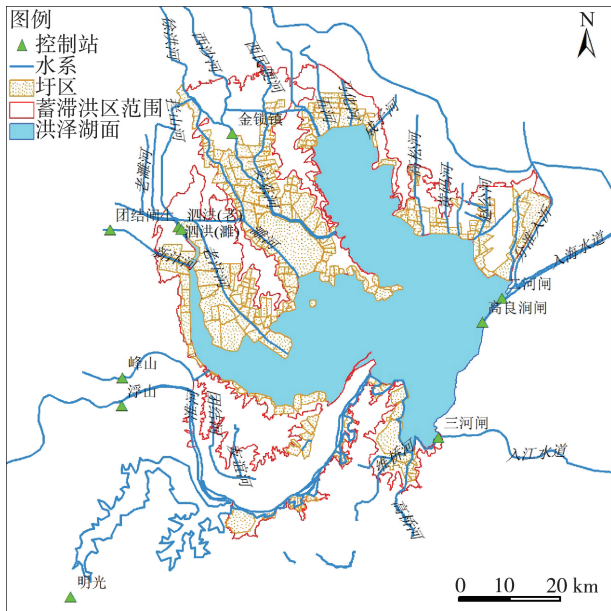


图1 洪泽湖水系及滞洪区分布

Fig.1 Distribution of water system and flood detention area of Hongze Lake

淮地面高程16.81 m(1985国家高程基准)以下地区^[15]。洪泽湖汛限水位12.31 m,相应容量32.43亿m³;设计洪水位15.81 m,相应容量112.13亿m³;校核水位16.81 m,相应容量135亿m³。现状防洪标准100年一遇,设计防洪标准300年一遇。洪泽湖多年平均水位为12.18 m,历史最高水位为15.04 m,历史最低水位为9.49 m。

1.2 数据来源

本文采用的实测数据资料包括淮河流域1961—2018年的逐日降水量、逐日气温和逐日流量序列。选用淮河流域上中游具有1961—2018年完整逐日序列的17个气象站数据,来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。逐日流量资料来自淮河干流的2个主要控制站(王家坝站和蚌埠站),数据来源于水文年鉴。其中,王家坝水文站为淮河上游的主要控制站,控制流域面积30630 km²,流域范围内有4个气象站;蚌埠水文站为淮河中游的主要控制站,控制流域面积121330 km²,流域范围内有13个气象站。

SWAT模型需要输入大量的空间数据和属性数据^[16],包括流域数字高程、土地利用数据、土壤数据、水文气象数据、水库数据等。数字高程数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)SRTMDEM 90 m分辨率原始高程数据;土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>);土壤数据来源于联合国粮食及农业组织(<http://www.fao.org/soils-portal/data-hub/en/>)的HWSD数据;历史实测气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>);未来气象数据来源于耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)(<http://esgf-node.llnl.gov/search/esgf-llnl/>)发布的全球气候模式HadGEM2-AO、HadGEM-ES和MIROC-ESM;水文和水库资料来源于水文年鉴。

水动力模型需要水文资料、历史洪水资料、地形数据、土地利用数据、河网数据、断面数据、线性构筑物数据和水工建筑物数据等,资料主要来源于江苏省水文局、淮河水利委员会、江苏省防汛防旱指挥部办公室、水利普查和现场踏勘等。

2 复杂河网地区气候-水文-水动力耦合模型构建

2.1 模型框架

气候-水文-水动力耦合模型由前端输入部分的气候模型、水文模型和核心部分洪的水动力模型组成,重点是三者的耦合。河道与蓄滞洪区的水量交互频繁,河道水位上涨超过堤防高度或堤防溃决时

水流会漫溢至蓄滞洪区,蓄滞洪区水量亦会汇入河道,故河道与蓄滞洪区的水量交互采用紧耦合技术^[17]连接。入湖河道与湖泊的水量交互频繁,河道水量进入湖泊会导致湖泊水位上涨,而湖泊水位上涨又会对河道造成顶托作用,无法忽略两者的相互影响,故河道与湖泊的水量交互采用紧耦合技术连接。河道采用闸、堰等与蓄滞洪区之间进行水体交换时采用标准连接,河道某段与蓄滞洪区之间自由漫溢时采用侧向连接,河道与湖泊之间水量交互采用标准连接^[18]。气候模型与水文模型、水文模型与水动力模型耦合基于松耦合技术,即将气候模型的输出结果作为水文模型的输入条件,将水文模型的输出结果作为水动力模型的输入条件,实现流域、河网、蓄滞洪区和湖泊复杂系统气候-水文-水动力模型耦合,进而实现气候变化影响下复杂河网地区的水流演进模拟。具体模型框架如图2所示。

2.2 模型构建

2.2.1 全球气候模式

CMIP5 发布了 50 多种全球气候模式^[19],包括对历史气候的模拟和在 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5 情景下对未来气候变化的预测。本文选取时期 I (1961—2005 年) 作为历史时期,时期 II

(2006—2050 年) 和时期 III (2051—2095 年) 作为未来时期的两个时段,来预估这两个时段下淮河流域的气候变化。考虑到所用模式与研究时段的一致性,选取了同时完成 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 4 种情景下预测试验并且终止年份超过 2095 年的 12 个模式,基本信息见表 1。

采用径向基函数法^[20]对淮河流域降水和气温进行空间插值,利用泰勒图^[21]来评估全球气候模式对淮河流域历史气候变化的模拟效果,为淮河流域不同气象要素选取模拟效果最好的气候模式。在此基础上,采用改进的分位数映射法^[22]对未来气候情景模拟值进行偏差校正,重建气象要素的未来情景。

2.2.2 水文模型

水文模型建模范围为蚌埠水文站以上流域。将数字高程数据输入 SWAT 模型,并将实际河网数字化水系通过 SWAT 模型中的“burn-in”命令来辅助生成河网水系,将流域划分为 107 个子流域,结果如图 3 所示。输入流域土地利用数据、土壤数据,并对坡度进行划分,按照模型要求进行重分类,设定阈值后进行叠加,最终将流域划分为 2 856 个响应单元。

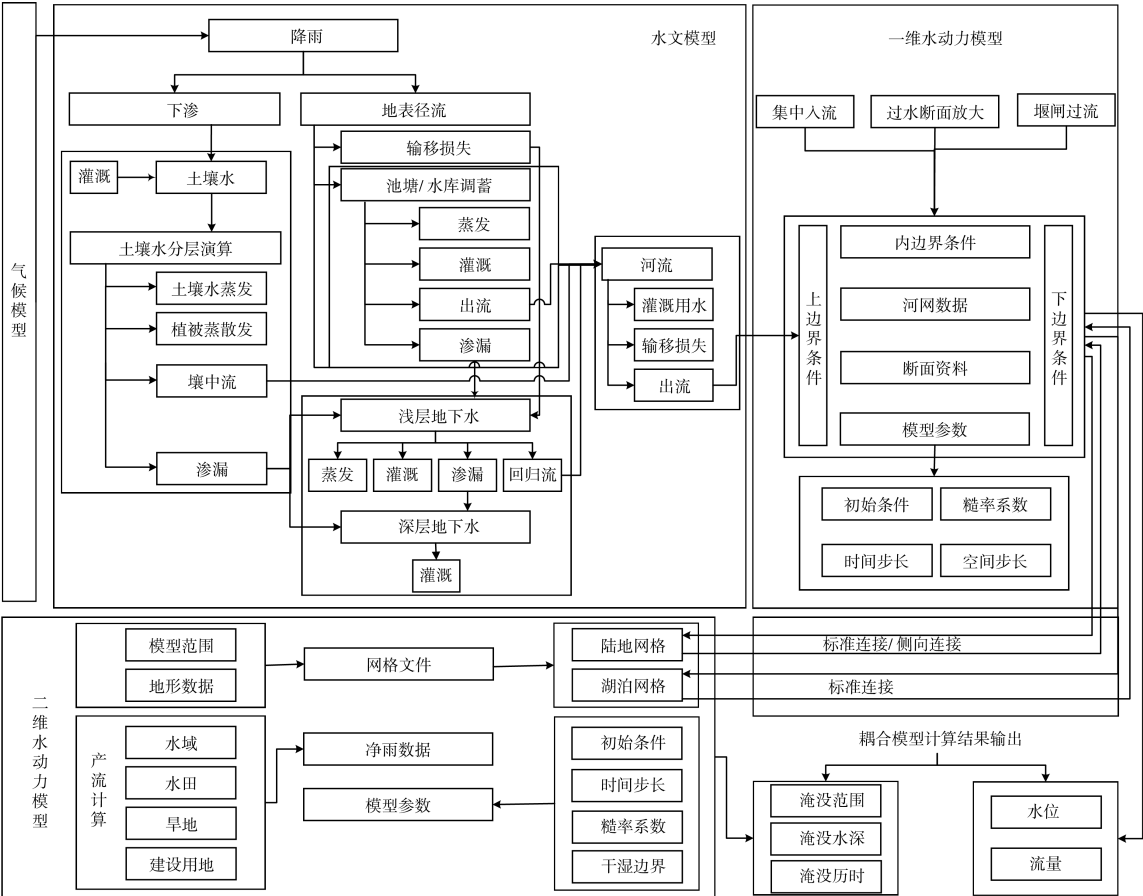


图2 耦合模型框架

Fig.2 Framework of coupling model

表 1 12 个 CMIP5 全球气候模式基本信息

Table 1 Basic information of 12 CMIP5 global climate models

气候模式	科研机构	所属国家	分辨率/(°)
CSIRO-Mk3.6.0	联邦科学与工业研究组织-昆士兰气候变化卓越中心	澳大利亚	1.88 × 1.87
GFDL-CM3	美国地球物理流体动力学实验室	美国	2.50 × 2.00
GFDL-ESM2G	美国地球物理流体动力学实验室	美国	2.50 × 2.02
GFDL-ESM2M	美国地球物理流体动力学实验室	美国	2.50 × 2.02
HadGEM2-AO	国家气象研究所	韩国	1.88 × 1.25
HadGEM2-ES	英国气象局哈德利中心	英国	1.88 × 1.25
IPSL-CM5A-LR	皮埃尔-西蒙 拉普拉斯研究所	法国	3.75 × 1.89
IPSL-CM5A-MR	皮埃尔-西蒙 拉普拉斯研究所	法国	2.50 × 1.27
MIROC5	日本海洋地球科学技术处-大气海洋研究所和国家环境研究所	日本	1.41 × 1.40
MIROC-ESM	日本海洋地球科学技术处-大气海洋研究所和国家环境研究所	日本	2.81 × 2.79
MIROC-ESM-CHEM	日本海洋地球科学技术处-大气海洋研究所和国家环境研究所	日本	2.81 × 2.79
MRI-CGCM3	日本气象研究所	日本	1.13 × 1.12

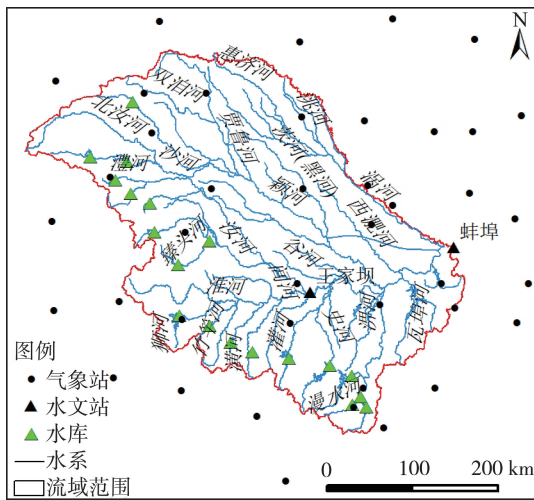


图 3 SWAT 生成水系及水文站和气象站分布

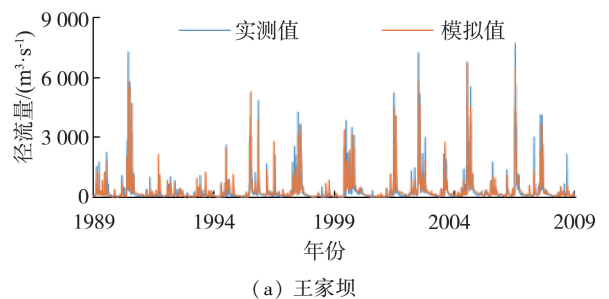
Fig.3 Water system generated by SWAT and distribution of hydrometeorological stations

采用淮河流域实测历史数据模拟淮河干流王家坝站和蚌埠站的逐日径流过程。其中,2000—2009 年资料用于模型参数率定,为了降低初始条件对模型的影响,1997—1999 年用于模型预热;1990—1999 年资料用于模型验证及适用性评价,1987—1989 年用于模型预热。模型输入为流域内各气象站实测降水和气温逐日数据,模型输出为逐日径流量。

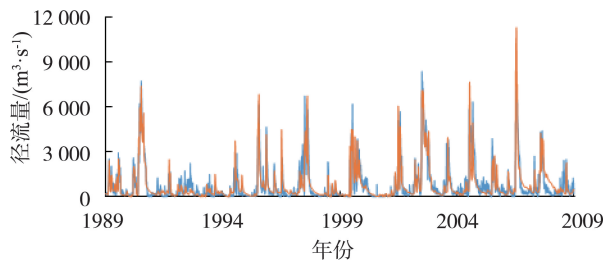
采用 SWAT-CUP 的 SUFI2 算法进行参数敏感性分析和率定。在全球敏感性分析中,采用 t 检验和 P 值检验两种方法判断参数敏感性,确定对模型较为敏感的 10 个参数,然后对模型进行参数率定分析,最终确定模型参数。选用决定系数 R^2 和纳什效率系数 (NSE) 来评价模型在率定期和验证期的模拟性能。

率定期和验证期王家坝站和蚌埠站日径流量实

测值与模拟值对比如图 4 所示, R^2 和 NSE 均在 0.78 以上,可见淮河流域日径流量模拟取得了较好的结果,SWAT 模型对淮河流域日径流过程具有较好的模拟能力和适应性。



(a) 王家坝



(b) 蚌埠

图 4 淮河流域日径流量实测值与模拟值对比

Fig.4 Comparison between measured value and simulated value of daily runoff in Huaihe River Basin

2.2.3 水动力模型

利用 MIKE FLOOD^[18,23] 建立一、二维耦合的水动力模型,其中洪泽湖主要入湖河道均有水文控制站点,控制站点以上入流为 SWAT 模型计算结果,作为一维水动力模型的上边界条件,出湖河道的水位流量关系作为一维水动力模型的下边界条件。控制站点以下至洪泽湖入湖口位置为蓄滞洪区,与洪泽湖整体构建二维水动力模型。水动力模型建模区域及基本地理信息如图 5 所示。

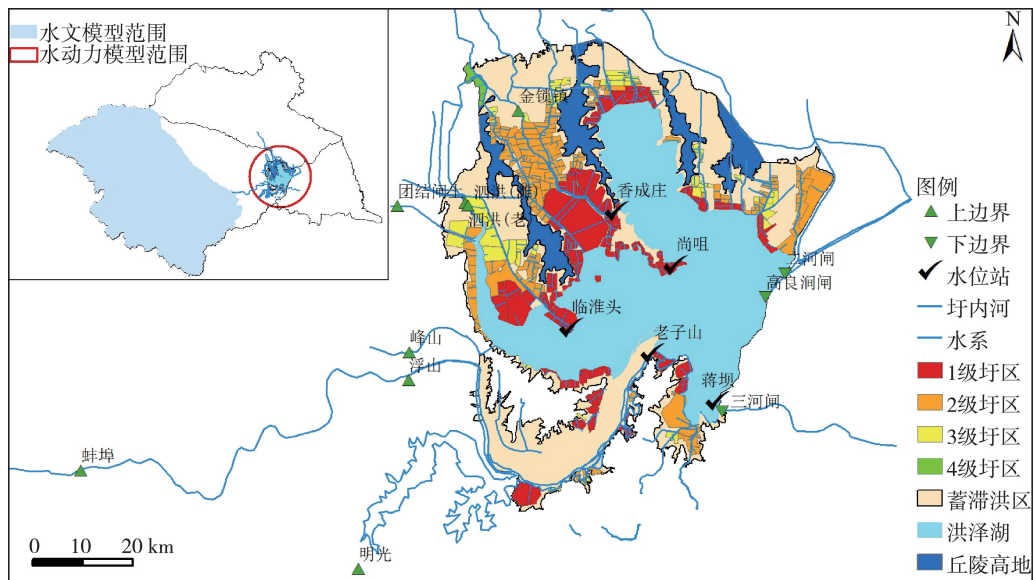


图5 水动力模型建模区域及基本地理信息

Fig.5 Modeling area and basic geographic information of hydrodynamic model

用于水动力学模型构建的河道包括 128 条实测河道和 322 条概化圩内河道,利用实测资料、水利普查资料以及影像资料,共创建 1 491 个实测河道断面和 644 个圩内河道概化断面。地形数据包括原始 1:10 000 的 DEM 数据及河道、堤防和道路等勘查数据,线性构筑物概化得到 47 条县道及县道以上道路、1 634 条县道以下道路、738 段堤防。通过圩区内部河网概化、外排出口概化和排水泵站的合并,得到 322 个水工建筑物共创建闸门和 241 个泵站,基本能反映实际情况。土地利用类型共分为 9 类(稻田、旱地、草地、绿地、林地、园地、鱼塘、水系、居民地),用于创建糙率分区,并设置相应的糙率值。采用非结构化不规则网格对洪泽湖及周边滞洪区建模区域进行网格剖分,洪泽湖周边滞洪区最大网格面积不超过 0.1 km²,洪泽湖面最大网格面积不超过 1 km²,为充分反映线性建筑物的阻水作用,对具有阻水作用的线性建筑物网格适当加密,共剖分 85 894 个网格。

利用 1991 年和 2006 年蒋坝站、老子山站、临淮头站、香成庄站和尚咀站 5 个水位站的水位过程对水动力模型参数进行率定,2003 年和 2007 年这 5 个水位站的资料对模型进行验证。选取 1991 年 6 月 28 日至 7 月 27 日、2006 年 6 月 28 日至 7 月 21 日、2003 年 6 月 26 日至 7 月 31 日、2007 年 7 月 1 日至 8 月 3 日的实测降雨过程、洪泽湖入湖流量过程和出湖水位过程输入模型进行模拟计算。结果显示实测值与模拟值最大误差均在 0.2 m 以内,水位变化趋势基本一致,说明构建的水动力模型对洪泽湖河网洪水演进具有较好的模拟能力和适应性。

3 复杂河网地区水流演进模拟

基于水文模型模拟得到的径流量,利用考虑历史特大值情况下拟合的最优分布函数分别计算时期 I、时期 II 和时期 III 100 年一遇和 300 年一遇最大 30 d 洪量(时期 II 和时期 III 均选取变化最显著的排放情景)。选择 2003 年作为典型年,采用同倍比放大法获得洪泽湖入湖设计洪水过程,作为水动力模型的上边界条件,同时,选择规划期洪泽湖出湖控制站水位-流量关系作为下边界条件,蒋坝站水位达到 14.31 m 时破圩滞洪,对洪泽湖及周边滞洪区 3 个时期 100 年一遇和 300 年一遇设计洪水进行水流演进模拟。不同时期各边界对应的入流、出流过程和蒋坝站水位过程如图 6 所示。

由图 6 可见,在 100 年一遇设计洪水条件下,时期 I 洪泽湖最大入湖流量为 22 888 m³/s,最大出湖流量为 18 647 m³/s,模型运行至第 12 天,蒋坝水位最高,达到 14.48 m;时期 II 洪泽湖最大入湖流量为 26 710 m³/s,最大出湖流量为 21 548 m³/s,耦合模型运行至第 13 天,蒋坝水位最高,达到 15.07 m;时期 III 洪泽湖最大入湖流量为 30 006 m³/s,最大出湖流量为 22 876 m³/s,模型运行至第 13 天,蒋坝水位最高,达到 15.70 m。在 300 年一遇设计洪水条件下,时期 I 洪泽湖最大入湖流量为 27 558 m³/s,最大出湖流量为 21 893 m³/s,模型运行至第 13 天,蒋坝水位最高,达到 15.22 m;时期 II 洪泽湖最大入湖流量为 34 546 m³/s,最大出湖流量为 25 400 m³/s,模型运行至第 13 天,蒋坝水位最高,达到 16.44 m;时期 III 洪泽湖最大入湖流量为 38 451 m³/s,最大出湖流量

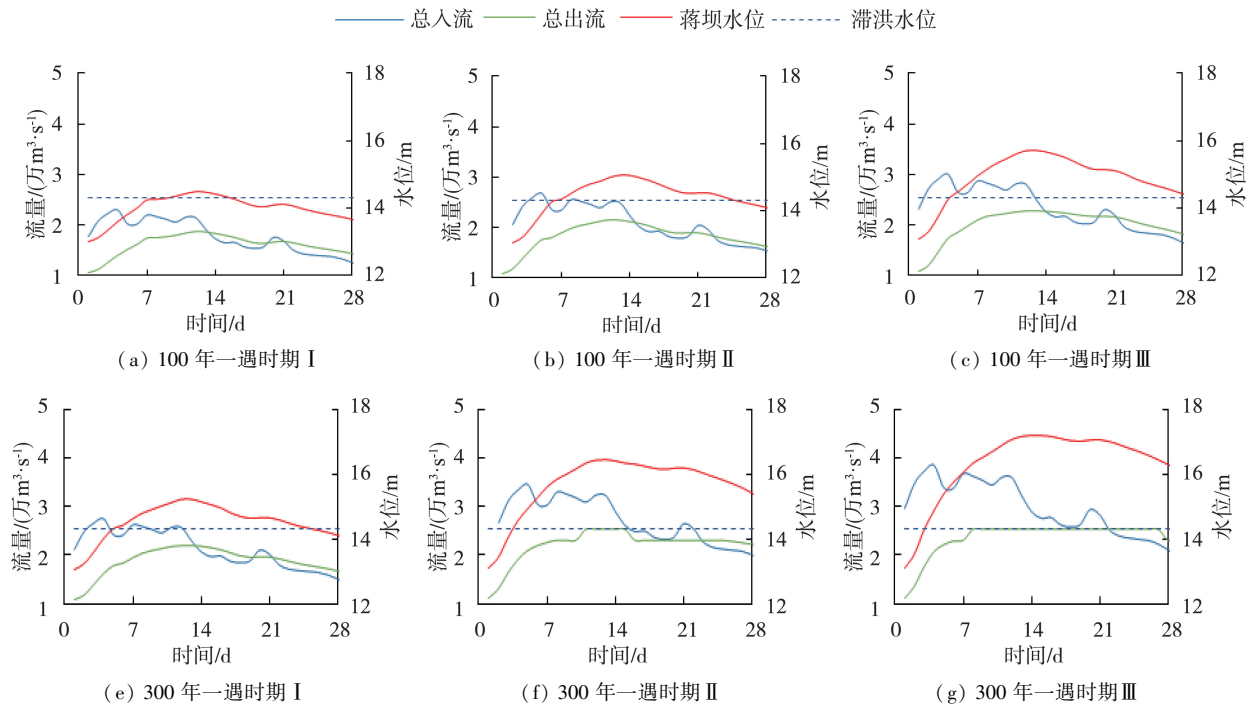


图6 不同条件下洪泽湖总入流、总出流及蒋坝水位过程

Fig. 6 Total inflow and outflow of Hongze Lake and water level process of Jiangba Station under different conditions

为 $25400 \text{ m}^3/\text{s}$, 模型运行至第 14 天, 蒋坝水位最高, 达到 17.17 m 。时期 II 100 年一遇的设计入湖洪量已接近时期 I 300 年一遇的设计入湖洪量, 时期 III 100 年一遇的设计入湖洪量已超过时期 I 300 年一遇的设计入湖洪量。300 年一遇设计洪水条件下, 时期 II 洪泽湖最高水位超过设计洪水位, 时期 III 洪泽湖最高水位超过校核洪水位。可见, 气候变化导致未来淮河流域洪水量级增加, 加大了洪泽湖及周

边滞洪区的洪水风险, 将会对该区域生产生活构成威胁。

表 2 为各时期不同淹没水深对应的淹没面积, 表 3 为各时期不同淹没历时对应的淹没面积。由表 2 和表 3 可见, 在 100 年一遇设计洪水条件下, 时期 I、时期 II 和时期 III 最大淹没面积分别为 1055.09 km^2 、 1257.50 km^2 、 1491.43 km^2 ; 在 300 年一遇设计洪水条件下, 时期 I、时期 II 和时期 III 最大淹没面积分别

表 2 各时期不同淹没水深对应的淹没面积

Table 2 Inundation area corresponding to different inundation depths in different periods

重现期	时期	淹没面积/ km^2					合计
		0.05 ~ 0.3 m	> 0.3 ~ 0.5 m	> 0.5 ~ 1.0 m	> 1.0 ~ 2.0 m	> 2.0 m	
100 年一遇	I	25.35	36.28	176.33	285.46	531.67	1055.09
	II	23.16	34.97	162.48	367.74	669.14	1257.50
	III	29.21	48.51	170.67	349.56	893.48	1491.43
300 年一遇	I	24.11	37.73	161.19	376.83	709.83	1309.69
	II	26.93	43.77	192.62	420.89	1167.62	1851.82
	III	35.96	57.36	228.87	514.50	1492.71	2329.40

表 3 各时期不同淹没历时对应的淹没面积

Table 3 inundation area corresponding to different inundation durations in different periods

重现期	时期	淹没面积/ km^2					合计
		$\leq 12 \text{ h}$	> 12 ~ 24 h	> 1 ~ 3 d	> 3 ~ 7 d	> 7 d	
100 年一遇	I	0.20	0.03	1.03	7.46	1046.37	1055.09
	II	0.14	0.06	1.10	8.71	1247.49	1257.50
	III	0.16	0.01	2.20	16.03	1473.03	1491.43
300 年一遇	I	0.15	0.00	1.53	9.12	1298.89	1309.69
	II	0.02	0.02	1.37	8.88	1841.53	1851.82
	III	0.00	0.04	3.13	22.91	2303.32	2329.40

为 1309.69 km²、1851.82 km²、2329.40 km²。由于滞洪区有 84% 的范围为高程低于 14.31 m 的圩区,在遭遇 100 年一遇和 300 年一遇最大 30 d 洪量的典型洪水时,破圩滞洪后淹没水深主要集中在 1 m 以上,淹没历时主要集中在 7 d 以上。对比同一时期,除时期 I 在淹没水深 0.05 ~ 0.3 m 和 0.5 ~ 10 m 出现洪水量级提高、淹没面积减少的情况,其他均随着入湖洪水量级的提高,淹没面积均相应增大,淹没水深也相应增加;对比不同时期同一设计洪水频率条件下,除淹没水深在 0.05 ~ 0.3 m、0.3 ~ 0.5 m 和 0.5 ~ 10 m 出现时期 II 的淹没面积相较于时期 I 是下降的情况,其他均为时期 III 淹没面积最大、时期 I 淹没面积最小。对于出现随着入湖洪水量级的提高,部分淹没水深对应的淹没面积减少的情况,进一步说明了不同淹没水深对应的淹没面积除了受洪水量级的影响的同时还受其他因素的影响,比如破圩时机、下边界过程、地形等。

4 结 论

a. 构建的气候-水文-水动力耦合模型对洪泽湖周边滞洪区水流演进具有较好的模拟能力和适应性。

b. 100 年一遇设计洪水条件下,时期 I、时期 II 和时期 III 最大淹没面积分别为 1 055.09 km²、1 257.50 km²、1 491.43 km²;300 年一遇设计洪水条件下,时期 I、时期 II 和时期 III 最大淹没面积分别为 1 309.69 km²、1 851.82 km²、2 329.40 km²。淹没水深主要集中在 1 m 以上,淹没历时主要集中在 7 d 以上。气候变化导致未来淮河流域洪水量级增加,加大了洪泽湖及周边滞洪区的洪水风险,将会对该区域生产生活构成威胁。

c. 研究区淹没范围和淹没水深除了受洪水量级的影响,还受破圩时机、地形及下边界过程等因素的影响,建议开展气候变化影响下的蓄滞洪区优化运用研究,提升洪泽湖周边滞洪区的滞洪效果。

参考文献:

- [1] DOBLER C, BURGER G, STOTTER J. Assessment of climate change impacts on flood hazard potential in the Alpine Lech Watershed[J]. Journal of Hydrology, 2012, 460-461: 29-39.
- [2] BELLPRAT O, GUEMAS V, DOBLAS-REYES F, et al. Towards reliable extreme weather and climate event attribution[J]. Nature Communications, 2019, 10: 1732.
- [3] 岳伟鹏, 张合理, 陈峰, 等. 中亚瓦赫什河上游源区气候水文要素演变特征[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 57-64. (YUE Weipeng, ZHANG Heli, CHEN Feng, et al.

- Evolution characteristics of climatic and hydrological elements in the upper source area of the Vakhsh River, Central Asia[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 57-64. (in Chinese))
- [4] 邓鹏, 孙善磊, 黄鹏年. 气候变化对鄱阳湖流域径流的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 39-45. (DENG Peng, SUN Shanlei, HUANG Pengnian. Influence of climate change on runoff in Poyang Lake Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(1): 39-45. (in Chinese))
- [5] 刘永志, 唐雯雯, 张文婷, 等. 基于灾害链的洪涝灾害风险分析综述[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 20-27. (LIU Yongzhi, TANG Wenwen, ZHANG Wenting, et al. Review of flood disaster risk analysis based on disaster chain[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 20-27. (in Chinese))
- [6] 刘志雨, 刘玉环, 孔祥意. 中小河流洪水预报预警问题与对策及关键技术应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 1-6. (LIU Zhiyu, LIU Yuhuan, KONG Xiangyi. Problems, strategies and key technology research of flood forecasting and early warning for small and medium-sized rivers [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(1): 1-6. (in Chinese))
- [7] 赖正清. 平原河网区分布式水文建模与水文模拟研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2017.
- [8] 杨悦莹, 朱志华, 蔡宴朋, 等. 城市流域径流峰值对降雨时空异质性的响应[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 27-33. (YANG Yueying, ZHU Zhihua, CAI Yanpeng, et al. Response of peak runoff to temporal and spatial heterogeneity of rainfall in urban watershed [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 27-33. (in Chinese))
- [9] 张大伟, 权锦, 马建明, 等. 应用 Godunov 格式模拟复杂河网明渠水流运动[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(6): 1088-1096. (ZHANG Dawei, QUAN Jin, MA Jianming, et al. Flows simulation in complex open channel networks using Godunov method [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23(6): 1088-1096. (in Chinese))
- [10] 刘强. 基于异构并行计算的流域洪水模拟理论与方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [11] 朱敏喆, 王船海, 刘曙光. 淮河干流分布式水文水动力耦合模型研究[J]. 水利水电技术, 2014, 45(8): 27-32. (ZHU Minzhe, WANG Chuanhai, LIU Shuguang. Study on distributed and coupled hydrological and hydrodynamic numerical model for main stream of Huaihe River [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45(8): 27-32. (in Chinese))
- [12] 徐天奕, 刘克强, 李琛, 等. 太湖流域大尺度洪涝淹没仿真模型的建立及应用[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(4): 40-45. (XU Tianyi, LIU Keqiang, LI Chen, et

- al. Establishment and application of large-scale flood inundation simulation model for Taihu Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(4): 40-45. (in Chinese))
- [13] 杨甜甜. 大沽夹河流域水文水动力耦合模型研究及应用[D]. 大连:大连理工大学, 2015.
- [14] 曾志强, 杨明祥, 雷晓辉, 等. 流域河流系统水文-水动力耦合模型研究综述[J]. 中国农村水利水电, 2017(9): 72-76. (ZENG Zhiqiang, YANG Mingxiang, LEI Xiaohui, et al. A review of hydrological-hydrodynamic coupling models for river-basin systems[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(9): 72-76. (in Chinese))
- [15] 周洁, 董增川, 朱振业. 洪泽湖周边滞洪区洪水风险分析[J]. 水电能源科学, 2017, 35(4): 63-66. (ZHOU Jie, DONG Zengchuan, ZHU Zhenye. Flood risk analysis of flood retarding basin around Hongze lake[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(4): 63-66. (in Chinese))
- [16] 李泽君, 黄本胜, 邱静, 等. 变化环境下韩江生态流量演变特征分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 22-29. (LI Zejun, HUANG Bensheng, QIU Jing, et al. Analysis on evolution characteristics of ecological flow of Hanjiang River under changing environment[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 22-29. (in Chinese))
- [17] 梅超. 城市水文水动力耦合模型及其应用研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2019.
- [18] 衣秀勇. DHI MIKE FLOOD 洪水模拟技术应用与研究[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2014.
- [19] 田烨. 气候变化对极端径流影响评估中的不确定性研究[D]. 杭州:浙江大学, 2013.
- [20] 张锦明, 游雄, 万刚. 径向基函数算法中插值参数对 DEM 精度的影响[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2013, 38(5): 608-612. (ZHANG Jinming, YOU Xiong, WAN Gang. Effects of interpolation parameters in multi-log radial basis function on DEM accuracy[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 38(5): 608-612. (in Chinese))
- [21] TAYLOR K E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(D7): 7183-7192.
- [22] LI H, SHEFFIELD J, WOOD E F. Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching [J]. Journal of Geophysical Research, 2010(D10): 115.
- [23] 傅春, 付耀宗, 肖存艳, 等. 基于 MIKE FLOOD 模型的鹰潭市内涝弹性分析[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(1): 33-39. (FU Chun, FU Yaozong, XIAO Cunyan, et al. Analysis of urban waterlogging resilience based on MIKE FLOOD Model in Yingtan City[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1): 33-39. (in Chinese))

(收稿日期:2022-04-05 编辑:王芳)

(上接第 147 页)

- [18] 朱永华, 张生, 赵胜男, 等. 气候变化与人类活动对地下水埋深变化的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 199-205. (ZHU Yonghua, ZHANG Sheng, ZHAO Shengnan, et al. Effects of climate change and human activities on changes in groundwater depth[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 199-205. (in Chinese)).
- [19] 马玉艳. 河口浮游动物群落生态健康评价方法及应用[D]. 大连:大连海事大学, 2008.
- [20] 张丰, 张海燕, 胡波, 等. 济宁市非煤矿山地质环境影响综合评价[J]. 山东国土资源, 2021, 37(7): 70-74. (ZHANG Feng, ZHANG Haiyan, HU Bo, et al. Comprehensive assessment of the geological environment impact of non-coal mines in Jining City[J]. Shandong Land and Resources, 2021, 37(7): 70-74. (in Chinese)).
- [21] 唐利涛, 杨舟, 李刚. 基于软件度量技术的计量终端软件质量量化评价方法研究[J]. 广西电力, 2019, 42(4): 29-33. (TANG Litao, YANG Zhou, LI Gang. Research on quantitative evaluation method of measurement terminal software quality based on software measurement technology [J]. Guangxi Electric Power, 2019, 42(4): 29-33. (in Chinese)).
- [22] 房绍艳. 临朐县城区浅层热能开发利用适宜性研究及资源评价[D]. 青岛:山东科技大学, 2021.
- [23] 赵敏. 基于层次分析法的地下水压采效果评价[J]. 人民黄河, 2022, 44(增刊 2): 83-85. (ZHAO Min. Effect evaluation of underground water pressure mining based on analytic hierarchy process [J]. Yellow River, 2022, 44(Sup2): 83-85. (in Chinese))
- [24] 李一鸣. 柴达木盆地典型流域地下水循环模式对比研究[D]. 西安:长安大学, 2018.

(收稿日期:2022-04-11 编辑:王芳)