

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.05.010

基于精细化河网水动力模型的长宁区除涝能力评估

高丽莎, 高程程, 汪 涛

(上海碧波水务设计研发中心, 上海 200233)

摘要:为全面细致地评估上海市长宁区的除涝能力, 基于翔实的基础资料构建了苏州河水系精细化河网水动力模型, 并对模型进行了率定和验证, 采用该模型模拟分析了现状和规划两种工况下, 长宁区的面平均最高水位的特征值和主要河道的最高水位。结果表明, 长宁区在现状工况下, 除涝能力为 10~20 年一遇; 在规划工况下, 除涝能力达到 20 年一遇, 但仍未达到上海市《治涝标准》要求的 30 年一遇标准。经过进一步分析计算, 建议增加 0.504 km² 临时滞蓄区来提高区域调蓄能力, 可使长宁区除涝能力达标。

关键词:精细化管理; 除涝能力评估; 苏州河水系; 河网水动力模型; 上海

中图分类号:TV212 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)05-0062-06

Assessment of waterlogging control capacity in Changning District based on refined river network hydrodynamic model // GAO Lisha, GAO Chengcheng, WANG Tao (Shanghai Bibo Water Design and Research Center, Shanghai 200233, China)

Abstract: To comprehensively and meticulously evaluate waterlogging control capacity in Changning District of Shanghai, a refined hydrodynamic model of Suzhou River network was constructed based on detailed basic data. The model was calibrated and verified. The model was used to simulate and analyze the characteristic value of average highest water level and the highest water level of main channels in Changning District under the current and planned conditions, respectively. The results indicate that under the current condition, the waterlogging control capacity of Changning District is up to 10-20 years' return period standard; and under the planned condition, the waterlogging control capacity is up to 20 years' return period standard, but it still fails to meet the 30-year return period standard required by *Standard for Waterlogging Control of Shanghai*. After further analysis and calculation, it is suggested to add 0.504 km² of temporary flood detention areas to make the waterlogging control capacity of Changning District meet the 30 years' return period standard.

Key words: delicacy management; assessment of waterlogging control capacity; Suzhou River network; hydrodynamic model; Shanghai

实现城市管理精细化成为全国大中型城市的一项重要任务。城市防洪除涝精细化管理是城市精细化管理的重要组成部分。加强城市防洪除涝精细化管理, 有助于全面提升城市防洪除涝能力, 是新时代水务管理的重要内容, 更是城市安全之所需。

近年来, 大中城市洪涝问题频发, 严重影响了城市正常运行和人民生产生活。贾绍凤^[1]指出我国城市雨洪管理近期应以除涝能力达标为重点。除涝能力评估已成为解决城市防洪除涝问题的前提和基础。近年来, 基于水动力模型的方法已成为评估城

市防洪除涝能力的常用方法, 国内外众多学者在这方面开展了大量研究^[2-9]。

平原河网地区河湖密布, 泵闸众多, 且调控复杂, 这对数值模拟提出了很高的要求。受模型计算条件和资料完整度的限制, 当前对于大型复杂感潮河网水动力的模拟不够精细化, 不能达到城市防洪除涝精细化管理的要求。如, 韩超等^[10-11]在利用河网模型分析嘉兴市洪水风险时, 只对圩外骨干河道进行了概化, 对圩内河道等规模较小的河道采用虚拟河道的方式进行处理, 并不能精细反映整个河网

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目 (16DZ1204800)

作者简介: 高丽莎 (1992—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事水利规划研究。E-mail: gaolsiao@163.com

通信作者: 高程程 (1986—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事水利与水环境规划研究。E-mail: gcc0108@163.com

的水流变化规律;杨振荣等^[12-13]在利用河网模型分别分析杭嘉湖东部平原和福州市主城区的洪涝问题时,只针对主要河道和其上水工建筑物等进行了概化;朱晓琳等^[14-16]用河网模型来研究河网水动力水质变化规律时,仅概化了镇级及以上河道,模拟结果不够精细,尤其是对于某些规模较小的河道来说,模拟结果不能反映其水流的变化规律。

本文基于翔实的数据资料,构建了精细化的苏州河水系水动力模型,用来评估上海长宁区在现状和规划条件下的除涝能力,据此为长宁区除涝工作提供建议,为上海防洪除涝精细化管理提供示范。

1 研究区概况

1.1 基本情况

长宁区位于上海中心城区西部,北靠苏州河,是淀北水利片的一部分,属于典型的平原感潮河网区,总面积 38.30 km²。区域地形总体西高东低,中西部地面高程不低于 3.2 m(吴淞高程,下同),东部最低 2.0 m 左右,如图 1 所示。区域地处亚热带季风区北部,温和湿润,多年平均降水量 1 143.5 mm,汛期(6—9 月)降雨较为集中,其中 6 月多年平均降水量达 176.1 mm。

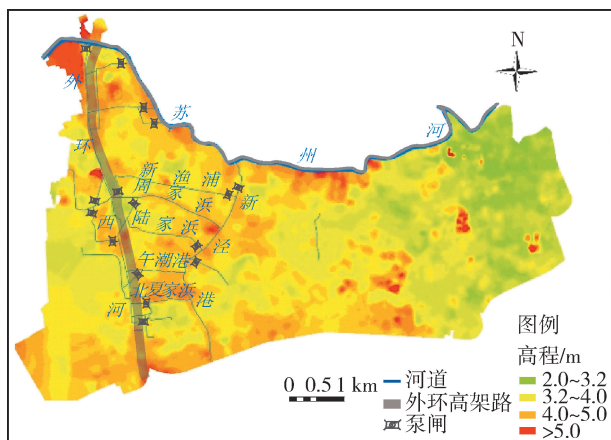


图 1 长宁区地面高程

Fig. 1 Ground elevation in Changning District

1.2 除涝系统存在的问题

当前长宁区除涝系统存在的问题主要有:①河道分布不均。区域有大小河汉 32 条,集中于区域境内西部,并且以东西向居多,南北向仅有新泾港和外环西河,数量偏少。②泵闸工程分布集中。区域 32 条河道上有 17 个泵闸,分布集中,河道规模小、瓶颈段制约多,在一定程度上阻碍了水系的畅通性。③河湖水面率低。根据《2018 年上海市河道(湖泊)报告》,区域河道总长 45.74 km,河网密度 1.19 km/km²,河湖总面积 1.10 km²,河湖水面率仅为 2.88%,区域可调蓄能力有限。

2 精细化河网水动力模型构建

根据平原感潮河网地区河道密布、受潮汐作用和泵闸调控等影响显著的特点,上海市水务规划设计研究院自主研发了数字河网水动力水质模型。经过 40 多年的不断改进和完善,该模型能够真实客观地反映感潮河网在多因素影响、多动力作用下的水流和水质变化规律,已广泛应用于上海的防洪排涝^[4,17]、水环境综合整治^[18]、水资源利用与保护^[19]等方面的课题研究、规划设计以及调度管理工作中。

2.1 模型原理

降雨径流模型将下垫面分为水面(包括河道、湖泊等水面)、水田(鱼塘)、旱地、绿地和城镇道路等类型,按照水文学的原理和方法并结合圩区和非圩区的特点,分别计算不同下垫面的产汇流。

水动力模型的基本方程采用圣维南方程组^[20](式(1)),数值离散采用成熟的四点线性隐式差分格式,使用矩阵标识法求解河网节点水位方程组。

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} + B_w \frac{\partial Z}{\partial t} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + 2u \frac{\partial Q}{\partial x} + (gA - Bu^2) \frac{\partial Z}{\partial x} - \\ \left(u^2 \frac{\partial A}{\partial x} \right)_z + g \frac{n^2 |Q| Q}{AR^{1.333}} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: t 为时间坐标; x, z 为空间坐标; Q 为流量, m³/s; Z 为水位, m; u 为断面平均流速, m/s; n 为糙率系数; A 为过流断面面积, m²; B 为主流断面宽度, m; R 为水力半径; q 为旁侧入流流量, m³/s; B_w 为水面宽度(包括主流宽度 B 及起调蓄作用的附加水面宽度), m; g 为重力加速度, m/s²。

2.2 模型构建

2.2.1 河网概化

历次苏州河治理的经验^[21]表明,苏州河水系具有较强的整体性,因此为准确模拟区域河网的水流运动规律,本文将河网模型的构建范围扩展到整个苏州河水系。按照概化河网输水能力和调蓄能力与实际情况一致的原则,基于高精度河网水系、泵闸分布、河道断面等数据进行了河网概化,将村级及以上河道均在模型中进行了体现,并根据各水利片的实际水面率对模型进行了校核。

精细化河网模型共包含河道 6 875 条,水工建筑物(泵、闸、桥、涵等)1 464 个,外边界 25 个,分别为墅沟闸(外)、吴淞口、马家宅、嘉善、枫围、东团、金泽、河祝、淀浦河西闸(外)、赵屯 10 个实测水(潮)位边界和 15 个插值边界,具体见图 2。

2.2.3 模型验证

选择 2017 年 7 月实测水位(潮位)数据对模型进行验证,部分站点的水位计算值与实测值对比如图 4 所示。并选用均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)、平均绝对百分比误差(MAPE)来度量模型的误差大小,结果见表 1。

表 1 模型误差统计

Table 1 Model error statistics

站名	RMSE/cm	MAE/cm	MAPE/%
吴淞(蕴)	8.1	6.6	3.71
浏旬	2.9	2.3	0.79
许渔河外河	5.2	4.3	1.57
南渔浦支流外河	4.5	4.9	1.58

由图 4 和表 1 可知,模型水位计算值与实测值变化趋势基本一致,MAE 最大值为 6.6 cm, MAPE 最大值为 3.71%。总体来看,模型误差较小,可用来模拟研究区域的水流规律。

3 长宁区除涝能力评估

3.1 方案设计

为准确评估长宁区除涝能力,分析了现状和规划两种工况。现状工况即在现状河道和泵闸规模基础上,组合 5 年一遇、10 年一遇、20 年一遇、30 年一遇 4 种重现期的降雨,共设计 4 个计算方案;规划工况是依据中心城区河道蓝线编制方案和淀北片除涝规划方案,在规划河道和泵闸规模基础上,组合 20 年一遇、30 年一遇两种重现期的降雨,共设计 2 个计算方案。与现状工况相比,规划工况打通新渔浦上 4 个缩窄断面,同时对河道进行疏浚,并新增南新泾泵闸(流量 $40 \text{ m}^3/\text{s}$)、中横沥北闸(流量 $40 \text{ m}^3/\text{s}$)、西界河泵闸(流量 $15 \text{ m}^3/\text{s}$)、扩大龙华港泵闸(流量



图 2 苏州河水系河网概化图

Fig. 2 Generalized graph of Suzhou river network

2.2.2 模型率定

选用区域内 2017 年 8 月 18 个站点的实测水位(潮位)数据,对模型进行率定。模型中泵闸调度规则按照实际调度规则确定,初始水位设为 2.5 ~ 2.8 m,计算时间步长为 5 min。经过率定,黄浦江及其主要支流糙率系数为 0.015 ~ 0.035,苏州河糙率系数为 0.025 ~ 0.035,其他河道糙率系数为 0.0225 ~ 0.032。部分站点的水位计算值与实测值对比如图 3 所示,可以看出,典型断面水位计算值与实测值吻合较好,平均误差约为 5 cm。

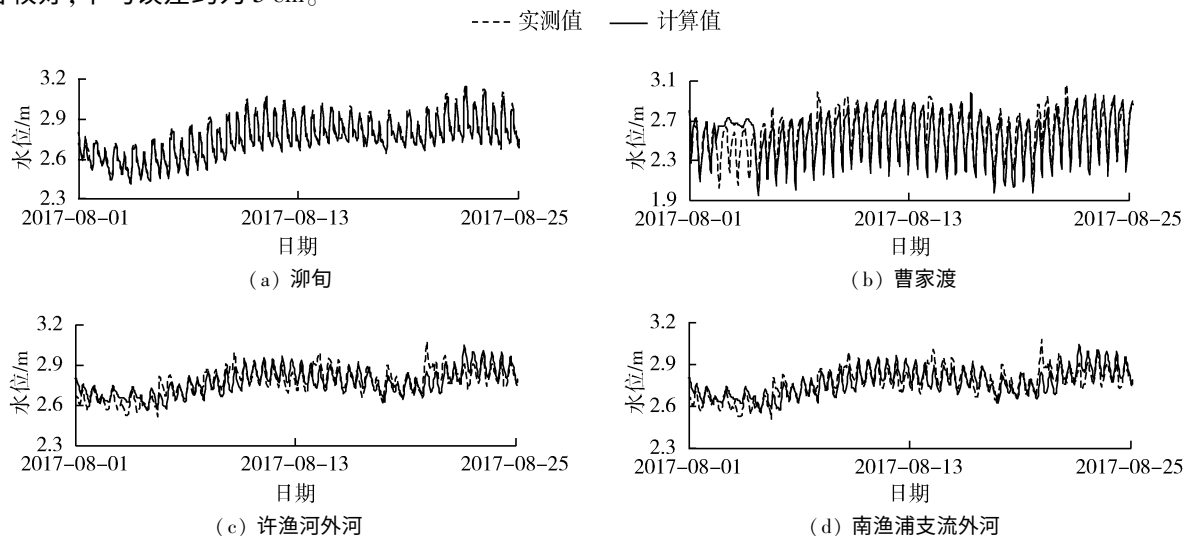


图 3 2017 年 8 月代表站点水(潮)位率定结果

Fig. 3 Calibration results of water level at representative stations in August 2017

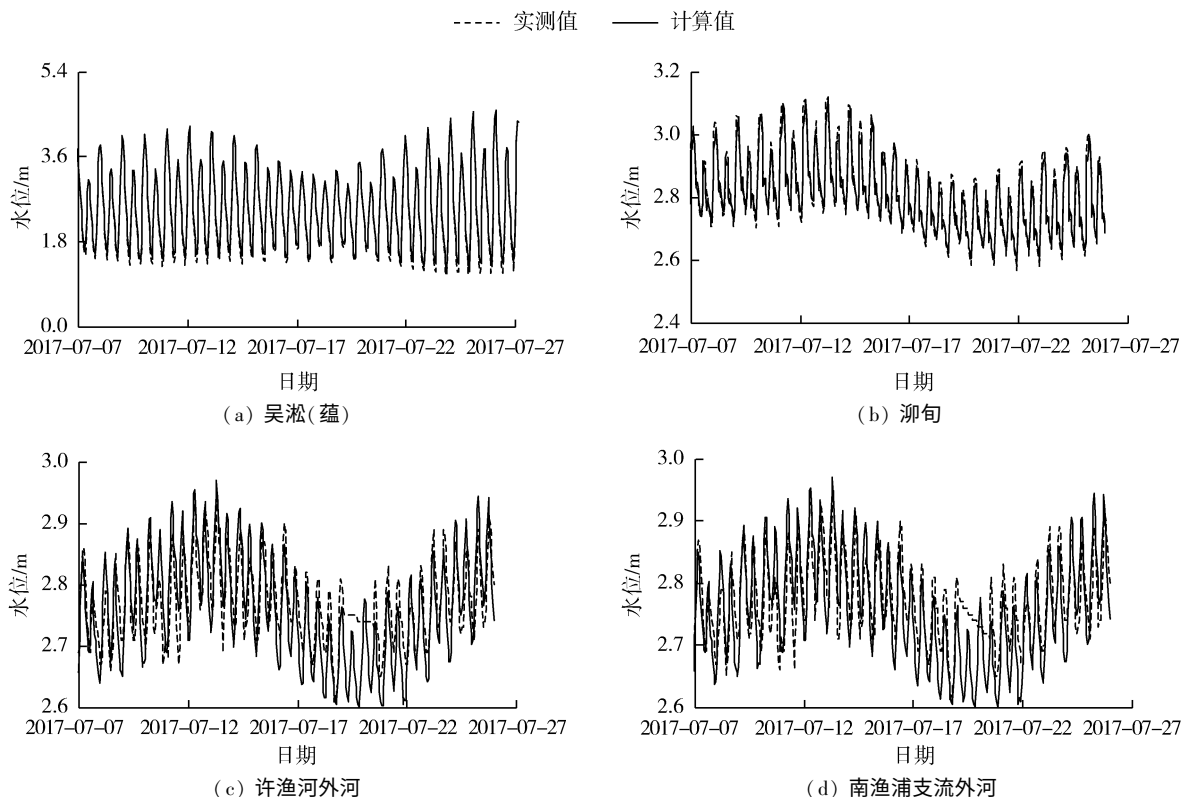


图 4 2017 年 7 月代表站点水(潮)位验证结果

Fig. 4 Verification results of water level at representative stations in July 2017

增至 $90 \text{ m}^3/\text{s}$) 和张家塘港泵闸(流量增至 $60 \text{ m}^3/\text{s}$)。根据 DB31/T 1121—2018《治涝标准》,各方案降雨均选取“63·9”雨型最大 24 h 面暴雨,各方案潮(水)位边界相同,均选取 1963 年 9 月 10 日 8:00 ~ 9 月 15 日 23:00 同步实测潮(水)位过程,预降最低水位均为 2.00 m,各方案具体情况见表 2。

表 2 计算方案

Table 2 Calculation schemes

方案	河道和泵闸规模	重现期	降水量/mm
1	现状规模	5 年一遇	135.9
2		10 年一遇	170.7
3		20 年一遇	204.8
4		30 年一遇	223.2
5	规划规模	20 年一遇	204.8
6		30 年一遇	223.2

3.2 结果分析

上海各区域的除涝能力主要用除涝面平均最高水位来衡量。根据 DB31/T 1121—2018《治涝标准》,长宁区所在淀北水利片除涝标准应达到 30 年一遇,相应的除涝面平均最高水位控制为 3.80 m。图 5 为不同方案下长宁区面平均水位变化过程。

表 3 为各方案面平均最高水位特征值,表 4 为各方案主要河道最高水位。

通过分析各方案面平均最高水位可知,在现状工况下,长宁区除涝能力能够达到 10 年一遇,不到 20 年一遇,不满足 DB31/T 1121—2018《治涝标准》30 年一遇的要求;在规划工况下,长宁区除涝能力能够达到 20 年一遇,不到 30 年一遇,仍然不满足 DB31/T 1121—2018《治涝标准》的要求(图 5)。通

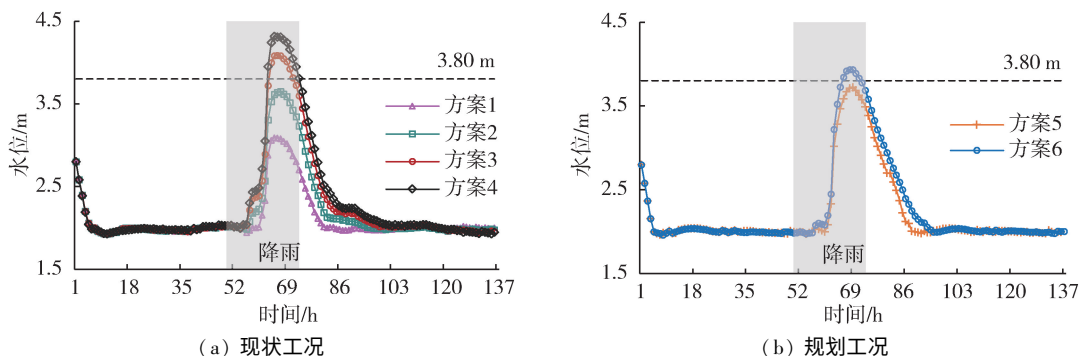


图 5 长宁区面平均水位变化过程

Fig. 5 Average water level hydrograph in Changning District

表3 各方案面平均最高水位特征值

Table 3 Characteristic values of average highest water level for each scheme

方案	最高水位/m	达到水位3.80 m 时间/h	降水峰值与最高水位出现的时间差/h	超过3.80 m 时长/h
1	3.09		3	0
2	3.65		5	0
3	4.09	64	4	8
4	4.32	63	3	11
5	3.73		7	0
6	3.94	66	7	6

表4 各方案主要河道最高水位

Table 4 Highest water levels of main channels for each scheme

方案	最高水位/m					
	新泾港	外环西河	周家浜	陆家浜	午潮港	北夏家浜
1	3.33	3.22	3.21	3.24	3.43	3.39
2	3.88	3.85	3.85	3.86	3.91	3.91
3	4.37	4.34	4.34	4.35	4.39	4.38
4	4.61	4.58	4.58	4.59	4.63	4.63
5	3.97	3.96	3.97	3.97	3.97	3.97
6	4.19	4.19	4.19	4.19	4.20	4.20

过对比方案3和5、方案4和6可知,与现状工况相比,规划工况下面平均最高水位显著降低,面平均水位达到3.80 m 时间有所推迟,降水峰值与最高水位出现的时间差有所增加,超过3.80 m 时长显著缩短(表3);主要河道最高水位显著下降,下降值均在40 cm 左右,与面平均最高水位下降幅度基本一致(表4)。由此可见,规划工况下长宁区的除涝能力有了显著提高,由不足20年一遇提高到了不足30年一遇,说明打通河道瓶颈段、对河道进行疏浚、新增或扩大泵闸规模,能显著提高区域的排涝能力。但是在规划工况下长宁区仍未达到30年一遇的目标,需进一步提高其除涝能力。

考虑到长宁区河湖水面率(2.88%)相对较低,雨洪调蓄能力较差,建议增加临时滞蓄区来提高区域的除涝能力。从现状地物构成来看,外环高架路纵穿长宁区西部,其下是面积约0.94 km²的下沉式绿地(地面高程约3.30 m),且与区域大部分东西向河道均相交,具备作为临时滞蓄区的基本条件。

在不改变地面高程条件下,当河道水位达3.30 m 时,启用临时滞蓄区进行雨洪调蓄。通过分析计算,当临时滞蓄区面积为0.504 km²时,长宁区面平均水位变化过程如图6所示,可见长宁区可满足区域除涝30年一遇的要求。

4 结 语

本文构建了精细化河网水动力模型,实现了对

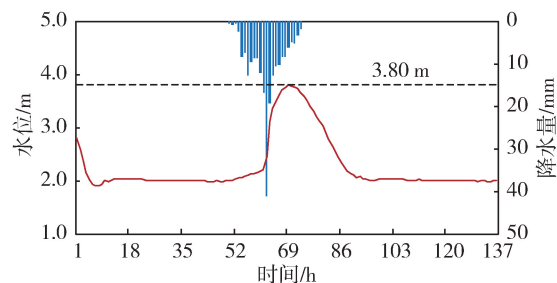


图6 临时滞蓄区面积0.504 km²时长宁区面平均水位变化过程

Fig. 6 Average water level hydrograph in Changning

District with temporary detention basin area of 0.504 km²

苏州河水系从市区级到镇村级河道的精细模拟。该模型能反映苏州河水系的河网水流规律。长宁区在现状和规划工况下均未达到 DB31/T 1121—2018《治涝标准》30年一遇的除涝标准,通过进一步增加临时滞蓄区,提高调蓄能力,可促进长宁区除涝能力达标。在中心城区河道蓝线编制方案和淀北片除涝规划方案的基础上,建议利用长宁区外环高架路下现有的下沉式绿地,构建0.504 km²的临时滞蓄区,既可满足景观生态需求,同时也可作为应急滞蓄雨水,从而保障长宁区防洪除涝安全。

参考文献:

- [1] 贾绍凤. 我国城市雨洪管理近期应以防涝达标为重点[J]. 水资源保护, 2017, 33(2): 13-15. (JIA Shaofeng. China should prioritize waterlogging prevention for recent urban storm water management [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2): 13-15. (in Chinese))
- [2] ZHONG Guihui, LIU Shuguang, HAN Chao, et al. Urban flood mapping for Jiading City based on hydrodynamic modeling and GIS analysis [J]. Journal of Coastal Research, 2014, 68(sup1): 168-175.
- [3] HAN Chao, LIU Shuguang, ZHONG Guihui, et al. Influence analysis of downstream tide on flood processes in Jiading [C]// Proceedings of the 11th Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium. Shanghai: [s. n.], 2014: 356-361.
- [4] 徐贵泉, 陈庆江, 陈长太, 等. 吴淞江分洪对上海防洪除涝影响及其对策研究[J]. 城市道桥与防洪, 2007(5): 193-195. (XU Guiquan, CHEN Qingjiang, CHEN Changtai, et al. Influence of flood diversion of Wusong River on flood control and waterlogging prevention in Shanghai and its countermeasures [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2007(5): 193-195. (in Chinese))
- [5] 高程程, 陈祖军. 海平面上升对上海市大陆片防洪除涝的影响分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(12): 110-113. (GAO Chengcheng, CHEN Zujun. Influence analysis of sea level rise on flood control and surface drainage in

- Shanghai continental plate [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(12): 110-113. (in Chinese))
- [6] 钱真, 贾卫红. 基于 GIS 的感潮地区城市区域除涝能力评估[J]. 水电能源科学, 2014, 32(3): 85-87. (QIAN Zhen, JIA Weihong. Urban zonal water logging control evaluation in tidal region based on GIS [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(3): 85-87. (in Chinese))
- [7] 丁国川. 大泖港及上游河道整治工程的防洪除涝能力分析研究[J]. 上海水务, 2012, 28(2): 29-31. (DING Guochuan. Analysis and research on flood control and waterlogging capacity of Damaogang River and its upstream rivers [J]. Shanghai Water, 2012, 28(2): 29-31. (in Chinese))
- [8] 钟桂辉, 刘曙光, 娄厦, 等. 苏锡常排涝对江南运河产生的洪涝转移特征[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(5): 40-47. (ZHONG Guihui, LIU Shuguang, LOU Sha, et al. Flood dispatching characteristics of Jiangnan Canal caused by drainage from Suzhou, Wuxi and Changzhou [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(5): 40-47. (in Chinese))
- [9] 季永兴, 刘水芹. 平原感潮地区雨型潮型组合对除涝规模的影响[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(5): 22-27. (JI Yongxing, LIU Shuiqin. Study on rainfall-tide-combinations impacting on the drainage scales in a plain tidal area [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(5): 22-27. (in Chinese))
- [10] 韩超, 梅青, 刘曙光, 等. 平原感潮河网水文水动力耦合模型的研究与应用[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2014, 29(6): 706-712. (HAN Chao, MEI Qing, LIU Shuguang, et al. Research and application on a coupled hydrological and hydrodynamic model in plain tidal river network [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2014, 29(6): 706-712. (in Chinese))
- [11] 叶爱民, 刘曙光, 韩超, 等. MIKE FLOOD 耦合模型在杭嘉湖流域嘉兴地区洪水风险图编制工作中的应用[J]. 中国防汛抗旱, 2016, 26(2): 56-60. (YE Aimin, LIU Shuguang, HAN Chao, et al. Application of MIKE FLOOD coupling model in flood risk mapping at Jiaxing area of Zhejiang Province [J]. China Flood and Drought Management, 2016, 26(2): 56-60. (in Chinese))
- [12] 杨振荣, 钟名军. 杭嘉湖东部平原嘉北地区防洪能力分析[J]. 中国防汛抗旱, 2010, 20(1): 21-23. (YANG Zhenrong, ZHONG Mingjun. Analysis on flood control capability of Jiabei Region in east Hangjiahu Plain [J]. China Flood and Drought Management, 2010, 20(1): 21-23. (in Chinese))
- [13] 徐奎, 马超. 福州市主城区洪涝灾害成因分析及对策研究[J]. 水利水电技术, 2011, 42(10): 113-118. (XU Kui, MA Chao. Causal analysis on flood and waterlogging disaster in main urban area of Fuzhou with study on its countermeasure [J]. Water Resource and Hydropower Engineering, 2011, 42(10): 113-118. (in Chinese))
- [14] 朱晓琳, 李一平, 许益新, 等. 时间尺度对平原感潮河网水动力水质模拟精度的影响[J]. 水资源保护, 2020, 36(3): 67-75. (ZHU Xiaolin, LI Yiping, XU Yixin, et al. Effects of time scale on simulation accuracy of hydrodynamic water quality of plain tidal river network [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(3): 67-75. (in Chinese))
- [15] 许益新, 李一平, 罗育池, 等. 引水改善平原感潮河网水质效果评估[J]. 水资源保护, 2019, 35(6): 124-130. (XU Yixin, LI Yiping, LUO Yuchi, et al. Effect evaluation of water diversion to water quality improve in plain tidal river network [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 124-130. (in Chinese))
- [16] 陈庆江, 丁瑞, 赵海. 平原河网区活水畅流对水动力和水质的改善效果[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(3): 8-13. (CHEN Qingjiang, DING Rui, ZHAO Hai. Improvement effect of hydrodynamics and water quality by flowing water in plain river network area [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(3): 8-13. (in Chinese))
- [17] 唐迎洲, 徐贵泉. 平原感潮河网地区防汛减灾能力评价指标体系研究: 以上海市为例[J]. 中国水利, 2014, (5): 49-51. (TANG Yingzhou, XU Guiquan. Index system for assessment of flood control and disaster reduction capability in plain tidal river network: a case study of Shanghai [J]. China Water Resources, 2014(5): 49-51. (in Chinese))
- [18] 徐贵泉, 褚君达, 吴祖扬, 等. 感潮河网水环境容量数值计算[J]. 环境科学学报, 2000, 20(3): 263-268. (XU Guiquan, CHU Junda, WU Zuyang, et al. Numerical computation of aquatic environmental capacity for tidal river network [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, 20(3): 263-268. (in Chinese))
- [19] 徐贵泉, 唐迎洲. 崇明岛引清调水方式优化研究[J]. 中国农村水利水电, 2011(2): 4-7. (XU Guiquan, TANG Yingzhou. Research on the optimization of clean water diversion on Chongming Island [J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(2): 4-7. (in Chinese))
- [20] 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))
- [21] 季永兴, 刘水芹. 苏州河水环境治理 20 年回顾与展望[J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 25-30. (JI Yongxing, LIU Shuiqin. Review and prospect of Suzhou Creek water environment treatment in 20 years [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 25-30. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-05-25 编辑: 雷 燕)