DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.11.050

平原新区雨洪模型的研究及其在国土空间规划中的应用

于星涛[1,2]
(1.济南市规划设计研究院,山东 济南 250101; 2.同济大学道路交通工程重点实验室,上海市 200092)

摘　要: 黄河在下游沿线地势平坦易涝,排水出路不畅。国空空间规划应以水动力模型为基础,有效评估现状洪涝灾害风险、促进空间布局和雨洪管理科学化。以济南新旧动能转换起步区为典型研究对象,采用 MIKE FLOOD 构建一二维水动力模型,模拟流域洪水演进过程,分析现状薄弱环节和问题,提出竖向和防洪相结合的规划对策,为国土空间防洪排水体系完善、规划用地和设施布局提供支撑。

关键词: 雨洪韧性;水动力模型;竖向规划;防洪规划;国土空间;平原新区
中图分类号: TV122　　**文献标志码:** B　　**文章编号:** 1009-7716(2023)11-0211-04

0 引　言

气候变化带来的洪涝灾害已成为当前国内外城市普遍需要系统解决的的安全隐患[1]。黄河下游段泥沙淤积,成为“地上悬河”[2];两岸冲积平原的地势十分平缓,存在历史洪涝灾害多、承载能力弱等问题[3]。为此,《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》明确提出:沿黄城市群规划、建设、管理中要贯穿全生命周期管理理念, 加强防洪减灾、排水防涝等公共设施建设,增强大中城市抵御灾害能力[4]。

黄河下游平原新区的国土空间规划应积极借鉴人与自然和谐共处的绿色发展理念, 科学统筹城市三维空间发展和防洪排涝安全两大任务。国内外学者利用洪涝模型对城市防洪排涝规划开展了大量研究[5],并在水文水动力模型耦合应用方面取得了一定进展[6]。但在平原新区国土空间规划的水模型应用方面存在诸多问题,如:与空间规划和竖向规划衔接不足,模型精度难以满足多尺度空间下的规划要求等。本文结合济南起步区实例, 探讨综合运用 DHI MIKE 专业软件, 构建精细化的一二维耦合的水系统模型,统筹优化平原新区的雨洪安全格局,通过全过程介入为国土空间规划提供专业性强,兼具系统性和实施性的竖向规划和防洪排列一体化解决方案。

收稿日期: 2023-03-04
作者简介: 于星涛(1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事城市道路交通和市政规划设计工作。

1 研究范围及目标

1.1 地形地貌特征。

研究区是当前正在建设的济南新旧动能转换起步区,位于济南市北部的黄河冲洪积平原上,其地貌形态受黄河影响较大[7]。由于黄河多次变迁冲刷淤积,区内地貌平缓低洼,现状地面高程多在 18~28 m 之间,制高点鹊山海拔约 110 m。整体地势南高北低,坡降约万分之二,属于平坦易涝地区。

1.2 雨洪特征分析

研究区的河道洪水主要由当地的集中暴雨形成,河道连续最大 4 个月天然径流量占全年径流量 85%~90%。由于流域现状坡降小,地表汇流速度慢,排水时间长,夏季集中降雨易形成复式洪峰或连续洪峰。黄河大坝堤顶和堤外高差在 10 m 以上, 区内涝水无法直接排入黄河。徒骇河作为主要排水出路,距离建设区较远(约 30 km),其上游有外洪汇入,下游平缓、排水不畅,易形成顶托并引发洪涝灾害。

1.3 水力模型构建的必要性及应用目标

研究区现状建设用地比例低, 地表透水率较好,地下水位较浅, 新区的规划建设将带来硬化面积增加。如何坚持城乡统筹,降低开发影响,确保用地防洪排水安全,是新区规划建设之初就应当重点协调解决的难点问题。在国土空间规划的初始阶段就引入水力模型,对用地空间布局、竖向规划、防洪排涝规划等领域的现状评估和划具编制有支撑作用。通过规划模型推演和校核, 有助于建立和优化新区的防洪排涝体系,对科学规划雨洪蓄滞和利用空间,增强城市蓝绿空间的韧性具有积极作用[8]。

2　模型原理及构建

2.1　设计暴雨

济南市年平均降水量 671.1 mm，存在降水时间和空间分布不均的现象。降水集中在汛期（419～568 mm），并由东南山区往西北平原逐渐减少。

徒骇河干流段无水文站，邻近水文站有宫家闸、堡集闸水文站，研究区内及邻近有垛石、刘家庄、吴家铺、黄台桥、孙耿、大陈家庄、夏口、雀许闸等雨量站。对宫家闸水文站（1970—2012 年）实测最大洪峰流量和孙耿站（1965—2016 年）实测短历时暴雨进行经验频率分析，对宫家闸实测洪水和孙耿实测暴雨进行遭遇分析，选定 50 a 一遇平原涝水遭遇徒骇河干流 20 a 一遇洪水作为水文边界。

徒骇河的设计洪水过程计算采用瞬时单位线参数公式 M1=1.34F0.463。根据历史数据统计分析，借鉴《中国暴雨统计参数图集》和《山东省水文图集》推算起步区设计暴雨参数，计算各个频率的年最大 24 h 降雨量见表 1。

表 1　研究区 24 h 设计暴雨

参数			频率 /%			
均值	C_v	C_s/C_v	2	5	1	0.5
95.0 mm	0.55	3.5	246.0 mm	199.0 mm	281.3 mm	316.6 mm

降雨过程选取“鲁北及小清河流域”设计雨型，确定起步区的 20 a 一遇和 50 a 一遇降雨过程。

2.2　河网水动力学模型

2.2.1　控制方程

利用 DHI MIKE 11 对研究区相关河网水流进行一维的长时间序列的模拟计算，采用圣维南方程组：

$$\begin{cases} \dfrac{\partial A}{\partial t}+\dfrac{\partial Q}{\partial x}=q \\ \dfrac{\partial Q}{\partial t}+\dfrac{\partial}{\partial x}(\alpha Q^2/A)+gA\dfrac{\partial h}{\partial x}+\dfrac{gQ|Q|}{C^2AR}=0 \end{cases}$$

式中：x、t 分别为计算点距离和时间；Q 为流量；h 为水位；q 为侧向入流流量；R 为水力半径；α 为动量校正系数；g 为重力加速度；A 为过水断面面积；C 为谢才系数[9]。

2.2.2　定解条件

初始条件设置为断面测量时的水位，流量设置为零。根据《海河流域综合规划》，确定徒骇河上游边界控制点为老赵牛河入河口，下游边界控制点为李美生上入河口。上游边界条件结合徒骇河流量设置，下游边界条件由设计水位进行控制。

模型入流边界，现状工况采用研究区 50 a 一遇和 20 a 一遇 120 h 的平原涝水过程；规划工况采用考虑建设区下垫面变化后研究区 50 a 一遇和 20 a 一遇 120 h 的平原涝水过程。

模型下游水位边界，现状工况及规划工况均采用徒骇河 20 a 一遇和 10 a 一遇 120 h 设计洪水位过程。

现状工况平原河网综合糙率采用 0.03，规划工况的平原河网综合糙率采用 0.028，基本符合冲积平原地区河道糙率系数取值规律。

2.2.3　水系概化

模型概化骨干河道见图 1，包括：六六河、齐济河、牧马河、垛石河、大寺河、青宁河、大王庙干渠、牧鹊河及徒骇河等重要河道。模型中的河道实测断面间隔为 500 m。概化重要水闸包括：六六河闸、齐济河闸、牧马河闸、垛石河闸及大寺河闸等。

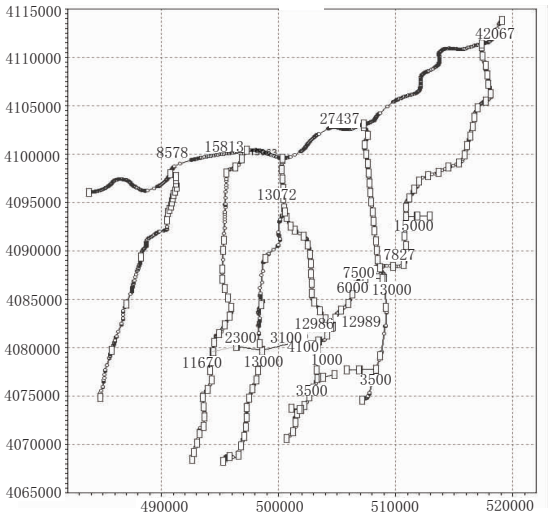

图 1　研究区河网模型概化图

2.3　一、二维耦合水动力模型

2.3.1　参数设置

在二维潮流数值模拟中，将研究区的空间细分为四边形小单元，在保证计算精度的情况下，模拟研究区超标准洪水洪泛情况，结合研究区范围内各类空间的多样化组合选取合适的糙率，设定糙率考虑略高于一维河道糙率。

2.3.2　精细化地表模型构建

研究区属于平原河网区，河道汇流出口不清晰，地形 DEM 需要精细化建模。根据高精度地形资料，建立研究区域二维地形文件，网格精度为 20 m×20 m，真实体现复杂地形特征及水流边界。同时，将建筑物、水系、坑塘和排水沟刻画到 DEM 中，例如赋予房屋建筑一定实体高度，实现屋面雨水下排和建筑、道

路等实体阻水效果。

2.3.3　一、二维耦合水动力模型

本文河道采用一维模型（MIKE11），平原洪泛区采用二维模（MIKE21），并利用 MIKE Flood 将二者动态耦合。一维模型可实现对各水闸进行灵活控制，并对河道水位及流量进行计算；利用二维模型模拟洪水漫堤后在宽浅平原洪泛区的演进。

3　雨洪模拟及应用

3.1　国土空间规划中的雨洪模型应用重点

平原新区国土空间规划应坚持“形与流”的有机一、相互协调和互为反馈。“形”是国土空间规划城乡三维空间形态，“流”包括水流、气流和生物流等要素[11]，本文主要是指河流。所谓“形流合一”，就是以高精度数字地形模型[12]和水文水动力模型为支撑[13]，合理选择和利用地形条件，有序构筑开放式大排水体系[14]；通过分区排水、分类施策、分级管控，建立和传导“生态、安全、经济、多元”的城市雨洪安全格局和管控传导机制，从而有序推动空间形态优化，切实增强洪涝安全和城市韧性，实现生态特色保护和城乡高质量发展的耦合协调[15]。

3.2　现状洪涝模拟及应用

（1）现状河道排水能力及淹没分析

目前，研究区段的黄河大堤防洪标准可满足 11 000 m^3/s 流量，徒骇河起步区段可满足 50 a 一遇的防洪标准。当研究区遭遇 50 a 一遇暴雨时，易淹河段主要为：大寺河中下游、齐济河全段、牧马河中游、垛石河全段、青宁河全段及六六河全段。

通过耦合研究区的一维水动力学模型及二维地形模型，分析得出现状二维易淹没范围见图 2，淹没区域主要在齐济河、牧马河及大寺河中、下游，建设区用地布局应尽量避开这些易淹没区域。50 a 一遇工况下，当内河水系遭遇徒骇河高水位，排涝不畅时，内涝范围主要分布在太平、孙耿、崔寨、济阳和桑梓店等行政区域。其中，太平片区和济阳片区受淹范围最广，淹没水深约 1~3 m；其余行政区受淹水深约 0.5~1 m。

（2）以内涝风险评估为基础优化建设用地选择

综合运用 GIS 和倾斜摄影等技术支撑，建立高精度数字地形模型进行综合评估。结合农业、生态、城镇空间的多样化组合类型特征[16]，通过内涝风险综合分析，顺应南高北低的平原地形，合理布局“南城、北田、中蓄”的城乡三维布局形态。维护北部自然地形和田园风貌，强调“山水林田城乡”等要素的三

图 2　遭遇徒骇河高水位情况下50 a一遇暴雨现状易涝区分析

维空间融合。按照“建高地、蓄洼地”的原则，优先利用南部地势较高（高于 21.2 m）、洪涝灾害轻的场地进行集中建设，沿黄河两岸形成带状组团式布局。结合黄河下游平原沟渠水网特色，形成疏密有度、蓝绿围合的“岛屿式”竖向组团发展模式，应对历史涝灾频繁的难题。

3.3　规划洪涝模拟及应用

3.3.1　模型应用思路

在起步区现状河道模型基础上，叠加规划用地条件，分析城市化后大面积建设用地实施对地区排涝形势影响，找准现状河道淹没较重的薄弱环节。在起步区规划用地条件基础上，针对现状河网评估结论，对部分河段进行断面拓宽或底泥清淤，增加必要的规划河道，形成规划河网，按照 50 a 一遇的城市防洪标准，初步添加调蓄体和闸门等调蓄节制设施，模拟 50 a 一遇降雨强度。根据模拟结果优化河道断面、调蓄体布局、闸门布局等方案，确定防洪排涝工程的最终合理布局。

3.3.2　规划排涝整治方案评价

起步区规划排涝整治方案主要包括主干河道清淤、疏浚及拓宽整治、增设调蓄体和拓宽内河水系排涝口门规模等方面。结合现状排涝问题和水动力模型计算结果，利用蓝绿空间用地增设 6 个调蓄空间，总蓄滞容积为 2 207 万 m^3；同时，增设大寺河与牧马河交汇处排涝控制闸等闸门工程方案。根据模拟结果反复调整河道断面、河道纵坡、蓄滞体和闸门的空间布局、规模等参数，同时兼顾桥梁净空要求、规划用地限制及河道性质改变等多方面因素，使得起步区城建区满足 50 a 一遇排涝要求，非城建区满足 20 a 一遇排涝要求。

3.3.3　开放式排水体系构建

疏通大寺河、垛石河、牧马河、牧鹊河、齐济河、

六六河等排涝河道,维护河道生态岸线,利用现有沟渠水系,构筑间距合理(1 ~ 1.5 km)、相互连通的平原水网。降低沿线绿化及生态用地高程,构筑开放式城乡排水系统。结合地表径流和汇水分区,以蓝绿网络围合成汇水单元。结合上下游边界条件和汇水分区[17],以水文、水动力模型为支撑进行洪涝分析[18],确定防洪河道、排涝河道、行泄通道等蓝绿廊道的规划功能、水位和断面。蓝绿廊道网络的间距一般在 1 ~ 2 km,雨季作为蓄滞空间和排水通道,提高内涝防治能力,旱季为绿化等生态、游憩用地。同时可以协调土地利用布局,分区实现雨水就近排放,在保障城市雨洪安全的前提下,有效降低填挖工程造价。

3.3.4　河道规划水位控制

规划在内部河道衔接徒骇河、小清河防洪水位基础上,采用水力坡度推算、水力模型校验、竖向高程校核等方法,综合确定内部排涝河道主要节点的排涝水位,作为后续规划设计的水位管控依据,并提取设计除涝水位,绘制主干排涝河道规划河道水面线(见图 3)。

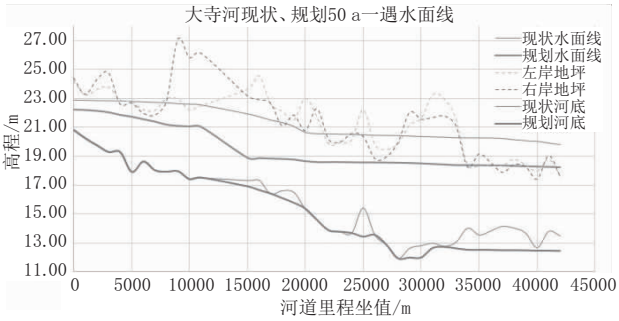

图 3　大寺河水面线

在竖向规划高程设计中,竖向排水方向应结合水模型规划汇水分区进行设计。两者相互衔接和协调统一,最大程度上保证区域填挖的经济性。道路最低标高应不小于相邻河道控制点 20 a 一遇水位加 1.5 m,且不小于 50 a 一遇水位,重要节点最低标高不小于 50 a 一遇水位加 0.5 m,保证沿河路不对地表径流形成阻隔。

4　结　语

国土空间规划中的水模型构建和应用需要遵循生态安全、洪涝安全与城市建设共同迭代进步的思路,紧密结合现状薄弱点和不断变化的发展需求,将城市防洪排涝及竖向系统一体化设计、一体化建设,加强河道系统的优先建设,形成防御外洪与治理内涝并重的防灾系统。后续可依托水动力学模型,构建防洪排涝调度决策管理系统。

参考文献:

[1] Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED).Human cost of disasters: an overview of the last 20 years[M].Geneva:The United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR),2020.

[2] 中共中央国务院.黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要[J].中国水利,2021(21):3-16.

[3] 贠元璐.黄河下游防洪工程:构筑黄淮海平原的安全防线[J].中国工程咨询,2020(1):35-37.

[4] 任保平,豆渊博.黄河流域生态保护和高质量发展研究综述[J].人民黄河,2021,43(10):30-34.

[5] Wenchao Qi,Chao Ma,Hongshi Xu,et al.A review on applications of urban flood models in flood mitigation strategies[J].Natural Hazards,2021(prepublish).

[6] 黄国如,陈文杰,喻海军.城市洪涝水文水动力耦合模型构建与评估[J].水科学进展,2021,32(3):334-344.

[7] 宫玮,梁浩,龚维科,等.济南新旧动能转换起步区绿色城市建设方案研究[J].建设科技,2021(19):39-43.

[8] 杨帆,唐菲儿.河网型城市雨洪生态空间规划:方法体系与控制框架—以岳阳市雨洪生态空间规划为例[J].城市发展研究,2019,26(8):23-30.

[9] 王领元. 丹麦 MIKE11 水动力模块在河网模拟计算中的应用研究[J].中国水运,2007(2):108-109.

[10] 崔继昌,郭贯成,张辉.黄河下游平原区典型城市“三生”国土空间特征分析[J].人民黄河,2022,44(6):105-110.

[11] 吕圣东. 环境模拟技术支持下城市生态廊道构建—以郑州市中牟文创区为例[J].中外建筑,2019(2):122-125.

[12] 贠法长,李旺民.城市高精度 DEM 建模方法研究[J].测绘与空间地理信息,2019,42(1):80-82,87.

[13] 王江海,于星涛,邱妍妍,等.SWMM 模型全过程融入海绵城市规划的研究—以济南市某新区为例[C]// 活力城乡 美好人居—2019 中国城市规划年会论文集(01 城市安全与防灾规划),2019.

[14] 程小文,凌云飞,贾玲玉,等.城市大排水系统的规划方法与案例实践[J].给水排水,2019,55(S1):60-63.

[15] 任保平.黄河流域生态环境保护与高质量发展的耦合协调[J].人民论坛·学术前沿,2022(6):91-96.

[16] 崔继昌,郭贯成,张辉.黄河下游平原区典型城市“三生”国土空间特征分析[J].人民黄河,2022,44(6):105-110.

[17] 左俊杰,蔡永立.平原河网地区汇水区的划分方法—以上海市为例[J].水科学进展,2011,22(3):337-343.

[18] 徐天奕,刘克强,单玉书,等.杭嘉湖平原河网地区防洪形势分析及对策研究[J].中国农村水利水电,2019(2):123-125.