

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.06.003

基于SWMM的山丘城区防洪排涝能力分析

马 勇¹,顾正华¹,王庭辉¹,黄 培²,盛娇樱¹

(1. 浙江大学建筑工程学院,浙江 杭州 310058; 2. 南通和信工程勘测设计院有限公司,江苏 南通 226006)

摘要: 为了科学分析山丘城区防洪排涝能力及其提升措施,以江阴市敔山湾地区为例,运用SWMM建立了可考虑山洪和管网排水的山丘城区水文水动力模型,通过调查溢流点和综合径流系数法实现了无资料地区模型校准。将截洪沟离散化为10 m一段的计算单元,以泰森多边形法对截洪沟控制区域进行划分,实现对沿程变断面和多出水口的截洪沟模拟,计算的最大1 h洪峰流量平均值处于规范值建议范围内。采用整治后的截洪沟尺寸对下游核心规划区的防洪排涝能力进行了复核,提出了适当增加金井河泵站抽水能力并适当降低敔山湖控制水位来增加调蓄库容排涝能力的提升方案。

关键词: 山洪; 防洪; 排涝; 截洪沟; SWMM; 山丘城区

中图分类号: TV87 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2021)06-0499-07

Analysis of flood control and drainage capacity of
hilly city based on SWMM

MA Yong¹, GU Zhenghua¹, WANG Tinghui¹, HUANG Pei², SHENG Jiaoying¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
2. Nantong Hexin Project Survey and Design Institute Co., Ltd., Nantong 226006, China)

Abstract: To scientifically investigate the flood control capacity, the drainage capacity and their improvements in the hilly city, taking the Yushan Bay as an example, the hydrologic and hydrodynamic model of hilly city was established based on SWMM (storm water management model), which can consider the torrential flood and drainage network together. Aiming at the un-gauged area, the model calibration was realized through surveying historical overflow points and using the comprehensive runoff coefficient method. In this model, the flood-cutting channels were discretized into calculation units with each section length of 10 m, and their control zones were divided by the Tyson Polygon Method to realize the simulation of the flood-cutting channels with variable sections and multiple outlets. The calculated averages of the maximum one-hour discharge peaks were within the recommended range of the standard value. As the influences of previous rainfall in the study area and the discharge distributions in the flood-cutting channels were considered in the model, the rationality of calculating the discharge peaks of the flood-cutting channels was ensured. Then using the renovated dimensions of the flood-cutting channels, this study calculated the flood control and drainage capacity of the downstream core planning area, and presented an improvement scheme, which is increasing the pumping capacity of Jinjing River Pump Station and reducing the control water level of Yushan Lake to increasing its storage capacity.

Key words: torrential flood; flood control; drainage; flood-cutting channel; SWMM; hilly city

随着城市化进程的不断加快,城市地区水文过程发生了巨大的变化。人类活动使越来越多的自然陆域被不透水地面覆盖,天然水面锐减,径流系数增大,城市防洪排涝面临着巨大的风险,人民群众的生命财产安全受到威胁^[1-3]。城市防洪排涝压力一般来源于上游客水的洪水压力和城区降雨形成的排涝压力,对受山洪影响的山丘城区而言,山洪影响往往是这些城区的主要防洪压力。山丘城区暴雨强度大、汇流时间短,极易形成山洪灾害。因此合理分析山丘城区防洪排涝能力,研究其提升措施十分必要。

截洪沟是城市建设中常用的山洪防治设施之一^[4],现有截洪沟规模设计主要以公式法为主^[5-6]。公式

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1508104-3); 浙江省自然科学基金(LY20D010009); 江苏省“六大人才高峰”项目(JNHB-208)
作者简介: 马勇(1997—),男,硕士研究生,主要从事水资源与水环境研究。E-mail:21912089@zju.edu.cn
通信作者: 顾正华,副教授。E-mail:WISE@zju.edu.cn
引用本文: 马勇,顾正华,王庭辉,等. 基于SWMM的山丘城区防洪排涝能力分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(6):499-505.
MA Yong, GU Zhenghua, WANG Tinghui, et al. Study on the analysis and improvement of flood control and drainage capacity of hilly city based on SWMM[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(6):499-505.

法首先求取截洪沟控制区域的最大洪峰流量,然后设计截洪沟断面使其过流能力大于或等于该洪峰流量。但公式法忽略了截洪沟上下游控制面积的不同,且无法对沿程变断面或多出水口的截洪沟进行计算。现有公式法如 GB 50014—2006《室外排水设计规范》(2016 年版)采用降雨强度、汇水面积以及径流系数的乘积来计算截洪沟控制区域最大洪峰流量,但由于前期降水量对区域产流影响巨大^[7-9],径流系数也不相同,单纯根据经验选取某单一径流系数来计算径流量是不准确的。此外公式法还忽略了计算时段内截洪沟流量过程的分配,且多出水口截洪沟的计算涉及非恒定流的计算,这时公式法已不适用。

对于山丘城区的防洪排涝模拟,建立防洪排涝模型的上边界条件需要提供山洪的流量过程,现有模拟方法往往以初损后损法计算产流、单位线法计算汇流来提供上游的边界条件,该方法忽略了截洪沟对山区汇水的影响。此外,城市是受人类活动高度影响的地区^[10],对于上游产汇流条件发生较大变化的地区,其下游的防洪排涝措施应根据上游改变后的产汇流条件重新计算校核。本文以江阴市敌山湾地区为例,基于 SWMM (storm water management model) 建立了考虑截洪沟影响的山丘城区水文水动力模型,在校核了现有截洪沟规模和区域防洪排涝能力的基础上,提出了截洪沟整治方案和核心区排涝改进方案。

1 研究区域概况

敌山湾地处江阴市中心城区与东部三大经济区——江阴国家高新区、云亭街道、周庄镇之间的衔接点上,东起定山,西至白屈港,北至芙蓉大道,南至名豪山庄,核心区总面积 5.17 km²,设金云、迎瑞两个社区,由敌山(耙齿山)、定山、羊头山三山合围而成。敌山湾地区位于湿润季风区,雨量充沛,主汛期为每年 5—9 月,汛期平均降水量为 546.7 mm,最大梅雨量为 902 mm(1991 年)。

敌山湖位于敌山湾核心区域的中心,湖泊通过金井河、北横河与白屈港河连接。与金井河连接处建有混凝土溢流坝,与北横河连接处建有橡胶坝;金井河与白屈港河连接处为带有泵站的金井河节制闸,闸孔净宽 10 m,抽水泵站排涝设计流量为 1 m³/s;北横河与白屈港河连接处为北横河闸站,闸孔净宽 8 m,抽水泵站排涝设计流量为 9 m³/s。由于区域内长山大道改道影响,拟将金井河混凝土溢流坝拆除,代以控制闸,并规划建设金井河与北横河连接的南北向河道,河宽 12 m。

敌山湾核心区外为山丘地形,其产生的山洪通过核心区与山区之间的截洪沟排入雨水系统,再通过雨水系统进入敌山湖。核心区雨水通过雨水管网排入敌山湖、北横河或金井河。根据 2020 年江阴敌山湾开发发展有限公司防汛应急预案,敌山湾核心区警戒水位为 4.7 m,在应急响应状态下,闸站管理部门可以降低北横河橡胶坝高度,将敌山湖水位预降至 4.2 m。当白屈港水位处于 4.3 m 以上时,将北横河橡胶坝高度降到最低(敌山湖水位与北横河水位持平),直接用北横河闸门控制水位。当内河水位高于外河水位 5 cm 时,自然泄洪;当内河水位高于外河水位不足 5 cm 时,流量较小,为防止后续外河水位上涨引起倒灌,闸站管理部门关闭金井河闸门、北横河闸门,开启排涝水泵强排。由于金井河混凝土溢流坝的拆除,需要对原防汛应急方案进行补充:在应急响应状态下,金井河与敌山湖相连处的闸门处于完全打开状态。

敌山湾汛情主要表现为来水快、涨势猛、退水慢、持续时间长、排洪困难、容易出现内涝,分析其原因主要有:(a)白屈港(敌山湾唯一泄洪通道)为太湖泄洪通道之一,汛期高水位持续时间长,容易造成行洪不畅;(b)规模建设用地增加了土地利用面积,但相应减少了调蓄面积,调蓄能力降低;(c)山地面积多,短时间的强降雨或持续降雨,很容易造成敌山湖水位迅速上涨,形成大范围区域内涝;(d)辖区防洪设计标准偏低;(e)原设计水系未建设到位。这些因素决定了敌山湾防洪排涝工作的重要性、长期性和复杂性^[11]。

2 模型的建立

2.1 原理

采用美国环境保护署(Environmental Protection Agency,EPA)开发的暴雨洪水管理模型 SWMM 来建立研究区水文水动力模型。SWMM 是一款动态的降水-径流模拟模型^[12],被广泛应用于城市排涝能力研究^[13-15]。赵冬泉等^[16]选取澳门雅廉坊小区作为研究区域,应用 SWMM 进行了流量预测;宋耘等^[17]基于 SWMM 模型进行了南京典型易涝区的暴雨内涝模拟;Park 等^[18]对韩国蔚山广域市构建了 SWMM 模型进行调蓄池的设计。此外 SWMM 还被用于气候变化^[19]、土地利用变化^[20]对径流产生的影响以及城市区域的洪水流量预测。

SWMM 首先将研究区划分为多个子汇水区,在每个汇水区内分别进行地表产流和汇流计算,其中子汇水区又可分为透水地面和不透水地面。地表径流经坡面汇流汇集到管道的节点,从而进入管道,再通过管道进行河道汇流到排水区出口,SWMM 的径流计算模块结构概化如图 1 所示。SWMM 采用超渗产流进行产流计算,产流计算方法包括 Horton 下渗模式、Green-Ampt 下渗曲线法以及 SCS 径流曲线法,其中 Horton 下渗模式被广泛应用;采用非线性水库法计算坡面汇流;利用质量和动量守恒方程计算管道中的恒定流和非恒定流,计算方法分为恒定流法、运动波法以及动力波法,其中动力波法通过有限差分法求解完整的一维非恒定流 Saint-Venant 方程组来进行河道演算,理论上结果是最准确的。本次模拟选择 Horton 下渗模式和动力波法进行计算。

2.2 网格与计算条件

选择敌山湾核心区及上游山体区域为计算范围,建立上游山区的水文水动力模型以及总研究区域的水文水动力模型(图 2)。考虑到雨水管道改变了城区汇流方式,无法根据高程数据进行区域汇水拓扑关系的划分,故在按照一定拓扑关系的前提下使用泰森多边形法划分子汇水区域。此外,根据雨水管网与检查井数据建立管道流向拓扑关系。在对敌山湖外圈截洪沟进行校核时将其离散化为每 10 m 一段的计算单元,通过 A ~ R 共 18 个出水口进入核心区雨水管道体系,最后对建立的水文水动力模型进行修正,删除未汇入敌山湖的区域。共建立子汇水区域 1 725 个,管道(河道)1 759 段,检查节点 1 752 个,模拟区域地形概化见图 2。

截洪沟无蓄水功能,故校核规模计算不考虑下游回水顶托的影响,上游山区水文水动力模型的下游边界条件即将截洪沟出水口出流条件设为自由出流;根据文献[21]所选代表雨型与江阴市 1970—2020 年的实测最大 1 h、3 h、6 h、12 h、24 h 雨量资料,采取同频率放大法得到江阴市 20 年一遇的设计暴雨过程作为降雨条件。

研究区域水文水动力模型计算下游边界条件为外河百年一遇设计洪水位 5.17 m,初始条件为内河水位 3.8 m、敌山湖水位 4.2 m,江阴市 20 年一遇的设计暴雨过程为降雨条件。考虑到敌山湖蓄水需求,排涝过程中将北横河泵站和金井河泵站设置成敌山湖水位高于控制水位时运行,低于控制水位时关闭。计算过程中橡胶坝高度全程降到最低,金井河和北横河闸门全程关闭,金井河和敌山湖连通处闸门全程开启。

2.3 模型校准

SWMM 子汇水区域参数主要包括子汇水区面积、汇流宽度、不透水率、坡度、透水区地表洼蓄量、不透水区地表洼蓄量、透水区曼宁系数、不透水区曼宁系数等。这些参数分为校准参数和非校准参数,汇水区面积、汇流宽度、坡度均通过 ArcGIS 软件根据地形分析直接得出,不透水率根据土地利用类型查阅 SWMM 手册提供的推荐值得到,透水区地表洼蓄量、不透水区地表洼蓄量、透水区曼宁系数、不透水区曼宁系数等参数均根据该地区土地利用情况及 SWMM 手册推荐得出,下渗参数通过模型校准得出。节点和管道参数大多为非校准参数,管道曼宁系数为校准参数,采用 SWMM 手册推荐值。

模型校准采用综合径流系数法^[22-23]。根据该地区土地利用类型查阅 SWMM 手册不同土地利用类型的不透水率,加权平均计算得到研究区域的不透水面积比率为 39.94%,参照 GB 50014—2006《室外排水设计规范》(2016 年版),该地区综合径流系数应处于 0.4~0.6 之间。通过无锡市暴雨强度公式结合芝加哥雨型生成 2 a 重现期 180 min 的降雨数据,输入模型计算得到径流系数为 0.54;再以上述方法生成 1 a 重现期和 3 a 重现期 180 min 的降雨数据,输入模型计算得到径流系数分别为 0.48 和 0.57,因此可以认为模型是可靠的。

由于山洪是敌山湖地区主要的致灾因素之一,需对该地区的截洪沟规模进行校核。截洪沟校核选取 20

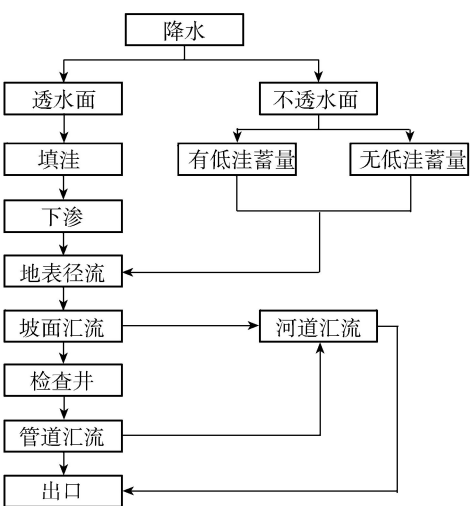


图 1 SWMM 径流计算模块结构概化
Fig.1 Structure generalization diagram of runoff calculation module of SWMM

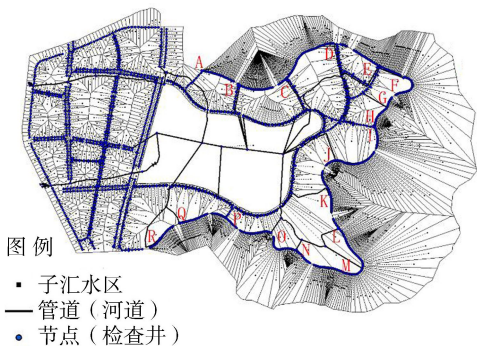
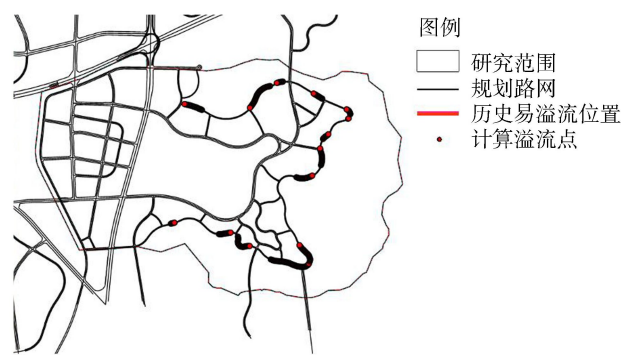


图 2 地形概化
Fig.2 Terrain generalization

年一遇暴雨为设计工况,模型参数和计算方法同模型校准过程,截洪沟出水口设置边界条件为自由出流,计算结果中发生溢流的位置如图 3 所示。对比敌山湖历史易溢流位置调查结果,历史易溢流位置均在模型计算结果中出现,进一步证明了模型的可靠性。由于敌山湾核心区处于建设进程中,实际建设完成情况和规划有较大区别,因此不对该区域的溢流位置进行验证。



(a) 敌山湖历史易溢流位置调查结果



(b) 模型计算结果中发生溢流的位置

图 3 计算溢流点与历史易溢流位置

Fig. 3 Calculated overflow points and historical overflow points

3 分析与讨论

3.1 截洪沟整治方案研究

计算结果表明,敌山湾地区现有截洪沟大多不满足该地区防洪需要,需对现有截洪沟规模提出整治方案。在模拟过程中考虑到误差,若只有少量溢流节点短时间最大溢流深度小于 10 cm 可认为没有发生溢流,截洪沟整治方案见表 1,现状出水口和整治方案出水口流量见表 2。

SWMM 的水动力计算模块为一维计算,无二维水动力过程,通过简化的溢流来保证水量平衡,故对现状规模不满足防洪要求的截洪沟,其整治方案洪峰流量应大于现状洪峰流量。根据表 2,除 D、G 两个出水口,整治方案洪峰流量均大于现状洪峰流量。C、D 对应的截洪沟相连,现状模拟情况下 C 对应的截洪沟溢流,D 对应的截洪沟受 C 对应截洪沟水位顶托的影响,出现 D 出水口整治方案洪峰流量小于现状洪峰流量的情况,此外 G、H、I 为同一段截洪沟不同出水口,现状未考虑建设 H 出水口,整治方案中 H 对 G 对应截洪沟的排水起到分流作用。

表 1 建议整治方案

Table 1 Recommended renovating scheme

截洪沟	原宽度/m	比降	长度/m	出水口	整治宽度/m	截洪沟	原宽度/m	比降	长度/m	出水口	整治宽度/m
A ₁ A ₂	0.6	0.005 0	160	A	0.9	J ₂ J ₃	1.0	0.012 5	160	J	1.2
A ₂ A ₃	0.6	0.010 0	140		0.9	J ₃ J ₄	1.0	0.005 0	140		1.2
C ₁ C ₂	0.6	0.008 0	90	C	1.4	J ₄ J ₅	0.6	0.040 0	100		1.2
C ₂ C ₃	0.6	0.006 5	110		1.4	M ₂ M ₃	0.8	0.005 5	160	M	1.0
C ₃ C ₄	0.6	0.003 0	140		1.4	M ₃ M ₄	1.0	0.004 0	60		1.8
C ₄ C ₅	0.6	0.001 5	80		1.4	M ₄ M ₅	1.0	0.002 5	60		1.8
D ₁ D ₂	0.6	0.006 0	100	D	1.4	M ₅ M ₆	0.8	0.004 5	140		1.2
D ₂ D ₃	0.6	0.009 0	60		1.4	M ₆ M ₇	0.6	0.008 0	120		1.0
E ₁ E ₂	0.6	0.005 0	100	E	0.7	M ₇ M ₈	0.6	0.010 0	140		1.0
E ₂ E ₃	0.6	0.006 0	160		0.7	N ₂ N ₃	0.8	0.004 0	300	N	1.1
E ₃ E ₄	0.6	0.005 5	220		0.7	O ₁ O ₂	0.8	0.001 5	160	O	1.6
F ₁ F ₂	0.8	0.001 8	140	F	0.9	O ₂ O ₃	0.6	0.004 5	120		0.8
H ₁ H ₂	0.6	0.003 0	20	H	2.0	Q ₂ Q ₃	0.8	0.002 5	140	Q	0.9
I ₁ I ₂	0.6	0.008 0	120	I	2.0						
I ₂ I ₃	0.6	0.060 0	80		2.0						

表 2 整治前后出水口洪峰流量

Table 2 Peak discharge at exit point before and after regulation

出水口	流量/(m ³ ·s ⁻¹)		出水口	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	
	现状	整治方案		现状	整治方案
A	1.13	1.46	J	5.61	5.99
B	1.74	1.74	K	1.73	1.73
C	2.77	3.69	L	0.44	0.44
D	1.68	1.61	M	13.15	13.74
E	2.61	2.64	N	4.34	4.62
F	7.46	7.47	O	1.93	1.94
G	1.41	1.37	P	1.03	1.03
H		1.68	Q	1.40	1.44
I	1.49	1.58	R	0.93	0.93

根据公式法计算的截洪沟洪峰流量未考虑流量过程的分配和前期降雨的影响,不同前期雨量过程会对研究区的洼地填蓄情况和土壤下渗速率有较大的影响,从而影响地表径流,故采用单一的径流系数来衡量截洪沟的洪峰流量大小未必合理。此外未考虑流量过程分配的公式法可能会低估截洪沟洪峰流量。以出水口为 Q 的截洪沟 Q₁Q₂、Q₂Q₃为例,该控制区域平均坡度为 0.21,控制面积 6.967 hm²,20 年一遇最大 1 h 降水量为 83.4 mm。参照 GB 51018—2014《水土保持工程设计规范》,选取地表种类为起伏的山地,推荐径流系数值为 0.6~0.8,计算得到出水口流量为 0.97~1.29 m³/s,小于计算结果的最大洪峰流量 1.44 m³/s,而计算的最大 1 h 平均流量 1.13 m³/s 在此范围内,进一步说明了本文计算结果的合理性。

3.2 敌山湾核心区排涝能力分析

由于敌山湾地区排涝受上游山洪影响较大,故在对敌山湾核心区的防洪排涝能力进行分析时截洪沟规模采用整治方案。

防洪排涝能力分析计算条件与 2.2 节相同,控制水位为 4.2 m,整个模拟过程持续时间为降雨开始以后 48 h,模拟结果如图 4 所示。由于外河水位超过核心区警戒水位,故两闸门处于完全关闭状态,区域排水均通过泵站进行强排,外河水位对计算过程无影响。从图 4 可以看出,应急状态下敌山湖与北横河、金井河水位快速持平,在外河水位为设计洪水位 5.17 m 的情况下,敌山湖出现超警戒水位情形。由于该工况下北横河、金井河闸门关闭,排涝完全由北横河泵站和金井河泵站承担,所以认为敌山湖存在的主要排涝问题是敌山湖蓄水能力不足或泵站抽水能力不足。针对超大洪水应考虑增加敌山湖蓄水能力(扩大库

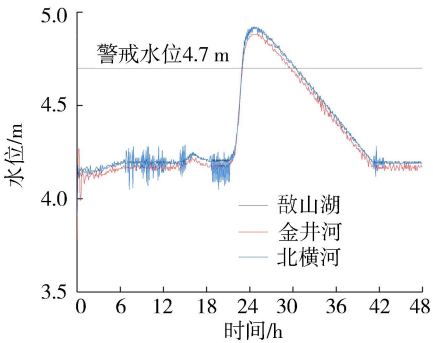


图 4 原排涝方案模拟结果

Fig.4 Simulation results of original drainage scheme

容、降低敌山湖控制水位)或增加排涝泵站抽水能力来保证防洪排涝安全。

3.3 核心区排涝改进方案

考虑到北横河泵站抽水能力提升空间有限,研究排涝改进方案时增加泵站抽水能力是通过增加金井河泵站抽水能力来实现的。以将敌山湾地区水域水位控制在警戒水位4.7 m 以下为目标,保持北横河泵站抽水能力为9 m³/s 不变,通过模拟得到4 种不同敌山湖控制水位为4.2 m、4.1 m、4.0 m、3.9 m 条件下金井河泵站所需最小流量分别为20 m³/s、9 m³/s、4 m³/s 和1 m³/s,相应防洪排涝能力模拟结果见图5。

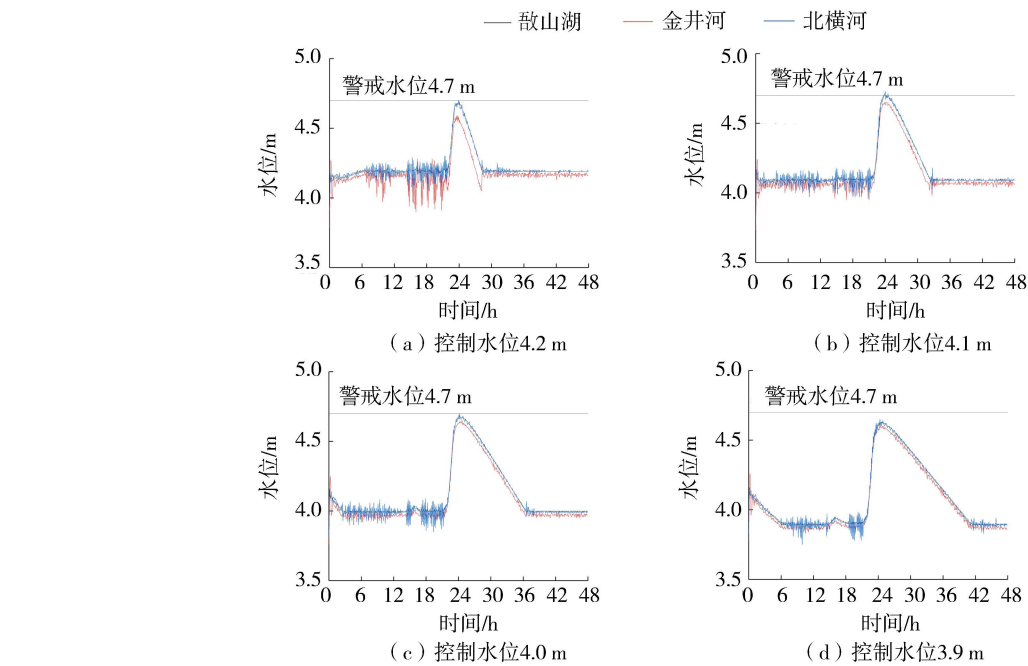


图5 排涝改进方案模拟结果

Fig.5 Simulation results of improved drainage scheme

根据图5,结合敌山湖地区设计降雨可知,该地区洪峰流量较大,洪水总量不大,单纯通过增加泵站抽水能力来保障该地区防洪排涝安全所需泵站规模较大,故增加泵站抽水能力的同时适当预降水位以增加湖区蓄水能力的改进方案更为合理。

4 结 语

- a. 相对于公式法,SWMM 计算方法可对沿程变断面和多出水口截洪沟进行模拟计算。
- b. 公式法计算的设计洪峰流量是根据径流系数来取值的,SWMM 计算的设计洪峰流量可考虑前期降雨造成的洼地填蓄和土壤下渗速率减小;公式法未考虑山洪的流量过程分配,SWMM 计算方法可提供流量过程,其洪峰值从原理上更为准确。
- c. 山丘城区下游排涝设施应与上游防洪措施配套,单独解决某一个问题的都可能造成资源浪费或洪涝灾害。
- d. 敌山湖地区的主要问题是洪峰流量较大,洪水总量不大,单纯通过增加泵站抽水能力来保障该地区防洪排涝安全所需泵站规模较大,结合适当预降水位来增加湖区蓄水能力的排涝改进方案更为合理。

参考文献:

[1] 刘鹏飞,许有鹏,周才钰,等.平原集水区城镇化对暴雨洪水影响研究:以常州市双桥浜为例[J].长江流域资源与环境,2020,29(9):2082-2089. (LIU Pengfei,XU Youpeng,ZHOU Caiyu,et al. Impact of urbanization change on flood process in the plain catchment:a case study of Shuangqiaobang Community in Changzhou City[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2020,29(9):2082-2089. (in Chinese))

[2] 陈华,徐坚,盛晟,等.面向流域防洪安全的态势图谱构建及可视化方法[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):498-505. (CHEN Hua,XU Jian,SHENG Sheng,et al. Construction and visualization methods of situation map for flood control in river basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(6):498-505. (in Chinese))

[3] 许怡,吴永祥,王高旭,等. 伦敦城市洪水风险管理的启示[J]. 水利水电科技进展,2019,39(4):13-18. (XU Yi,WU Yongxiang,WANG Gaoxu,et al. Enlightenments of urban flood risk management in London[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2019,39(4):13-18. (in Chinese))

[4] 辛璐,陈旭,赵云皓,等. 北京某区域截洪及调蓄设施设计探讨[J]. 给水排水,2019,55(10):69-74. (XIN Lu,CHEN Xu,ZHAO Yunhao,et al. Discussion on the design of urban interception and storage facilities in a certain area of Beijing[J]. Water & Wastewater Engineering,2019,55(10):69-74. (in Chinese))

[5] 王春华. 城市排水防涝流域治理分析与工程实践[J]. 中国给水排水,2016,32(1):86-89. (WANG Chunhua. Analysis of watershed management and engineering practice for urban drainage and waterlogging prevention[J]. China Water & Wastewater, 2016,32(1):86-89. (in Chinese))

[6] 陈萌,翁朝晖,范杨臻,等. 小流域截洪沟洪峰流量计算方法研究与比较[J]. 南水北调与水利科技,2018,16(3):51-58. (CHEN Meng,WENG Zhaohui,FAN Yangzhen,et al. Study and comparison of calculation methods for flood peak discharge of cut-off ditch in small watershed[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2018,16(3):51-58. (in Chinese))

[7] PATHIRAJA S,WESTRA S,SHARMA A. Why continuous simulation? The role of antecedent moisture in design flood estimation [J]. Water Resources Research,2012,48(6):1-15.

[8] 黄津辉,王超,范泽华. 天津市设计暴雨雨型的演变[J]. 水资源保护,2020,36(1):38-43. (HUANG Jinhui,WANG Chao,FAN Zehua. Evolution of design rainfall pattern in Tianjin[J]. Water Resources Protection,2020,36(1):38-43. (in Chinese))

[9] 刘淑雅,江善虎,任立良,等. 基于分布式水文模型的山洪预警临界雨量计算[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(5):384-390. (LIU Shuya,JIANG Shanhu,REN Liliang,et al. Calculation of critical rainfall for early-warning of mountain flood based on distributed hydrological model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2017,45(5):384-390. (in Chinese))

[10] 徐宗学,任梅芳,陈浩. 我国沿海城市洪潮组合风险分析[J]. 水资源保护,2021,37(2):10-14. (XU Zongxue,REN Meifang,CHEN Hao. Analysis on urban flooding risk caused by flood tide combination in coastal cities[J]. Water Resources Protection,2021,37(2):10-14. (in Chinese))

[11] 2020 年江阴敌山湾开发发展有限公司防汛应急预案[R]. 江阴:江阴敌山湾开发发展有限公司,2020.

[12] 梅超,刘家宏,王浩,等. SWMM 原理解析与应用展望[J]. 水利水电技术,2017,48(5):33-42. (MEI Chao,LIU Jiahong,WANG Hao,et al. Introduction of basic principle and application prospect for SWMM[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2017,48(5):33-42. (in Chinese))

[13] NIAZI M ,NIETCH C ,MAGHREBI M ,et al. Storm water management model: performance review and gap analysis[J]. Journal of Sustainable Water in the Built Environment,2017,3(2):04017002.

[14] 曾家俊,麦叶鹏,李志威,等. 广州天河智慧城 SWMM 参数敏感性分析[J]. 水资源保护,2020,36(3):15-21. (ZENG Jiajun,MAI Yepeng,LI Zhiwei,et al. Sensitivity analysis of SWMM parameters in Guangzhou Tianhe Wisdom City[J]. Water Resources Protection,2020,36(3):15-21. (in Chinese))

[15] 朱寒松,董增川,曲兆松,等. 基于 SWMM 模型的城市工业园区低影响开发效果模拟与评估[J]. 水资源保护,2019,35(2):32-36. (ZHU Hansong,DONG Zengchuan,QU Zhaosong,et al. Simulation and evaluation of low impact development effect of urban industrial park based on SWMM[J]. Water Resources Protection,2019,35(2):32-36. (in Chinese))

[16] 赵冬泉,陈吉宁,佟庆远,等. 基于 GIS 构建 SWMM 城市排水管网模型[J]. 中国给水排水,2008(7):88-91. (ZHAO Dongquan,CHEN Jining,TONG Qingyuan,et al. Construction of SWMM urban drainage network model based on GIS[J]. China Water & Wastewater,2008(7):88-91. (in Chinese))

[17] 宋耘,李琼芳,牛铭媛,等. 基于 SWMM 模型的南京典型易涝区暴雨内涝模拟[J]. 水利水电科技进展,2019,39(6):56-61. (SONG Yun,LI Qiongfang,NIU Mingyuan,et al. Rainstorm and waterlogging simulation in typical inundated districts of Nanjing based on SWMM[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2019,39(6):56-61. (in Chinese))

[18] PARK D,JANG S,ROESNER L A. Evaluation of multi-use stormwater detention basins for improved urban watershed management[J]. Hydrological Processes,2014,28(3):1104-1113.

[19] DASGUPTA S,GOSAIN A K,RAO S,et al. A megacity in a changing climate:the case of Kolkata[J]. Climatic Change,2013,116(3/4):747-766.

[20] CAMORANI G,CASTELLARIN A,BRATH A. Effects of land-use changes on the hydrologic response of reclamation systems[J]. Physics and Chemistry of the Earth,2005,30(8-10):561-574.

[21] 江阴市青阳镇水系规划(锡澄运河以东)[R]. 江阴:江阴市水利农机局,2015.

[22] 王立辉,陈欣,闫福恩. 基于 GIS 和 SWMM 的雨洪模型构建方法研究[J]. 市政技术,2020,38(4):183-188. (WANG Lihui,CHEN Xin,YAN Fuen. On construction method of storm model based on GIS and SWMM[J]. Municipal Engineering Technology,2020,38(4):183-188. (in Chinese))

[23] 石小芳,赵明洁,杨青青,等. 基于降雨情景模拟的城市社区尺度暴雨内涝研究[J]. 水利水运工程学报,2021(1):26-35. (SHI Xiaofang,ZHAO Mingjie,YANG Qingqing,et al. Study on rainstorm waterlogging on urban community scale based on rainstorm scenario simulation[J]. Hydro-Science and Engineering,2021(1):26-35. (in Chinese))