

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.05.003

基于 PCSWMM 模型的城市内涝风险评估

吴海春¹, 黄国如^{1,2}

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510640;

2. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 构建了基于 PCSWMM 的海甸岛城市雨洪模型, 采用 3 场次实测暴雨(20081013, 20101005 和 20111005)内涝淹没资料对模型进行验证, 结果表明所构建模型具有良好的精度和可靠性。以 1 a、2 a、5 a、10 a 和 20 a 5 种设计重现期降雨组合同频率设计潮位进行模拟计算, 对海甸岛现状排水能力进行评估, 结果表明, 海甸岛 84.8% 管网排水能力低于 1 年一遇。以 5 a、10 a、20 a、50 a 降雨组合同频率设计潮位对海甸岛进行内涝风险评估, 得到了海甸岛 4 种不同重现期暴雨的内涝风险等级划分状况。

关键词: PCSWMM 模型; 管网排水能力; 内涝风险评估; 海甸岛

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2016)05-0011-06

Risk assessment of urban waterlogging based on PCSWMM model

WU Haichun¹, HUANG Guoru^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: An urban rainstorm model based on PCSWMM for Haidian Island in Haikou City was developed. The model was verified by three measured rainfalls events and the corresponding tidal graph records in 20081013, 20101005, and 20111005. The simulated waterlogging submerged positions and depths are basically consistent with the actual investigation situation, which shows that the model has high precision and reliability. It respectively evaluated the present situation of drainage networks and the waterlogging risks in Haidian Island in Haikou City by using design rainstorms of return periods of 1, 2, 5, 10, 20, and 50 years with the corresponding tidal levels. The result shows that the present situation of 84.8% of the drainage networks in Haidian Island in Haikou City is less than 1-year design return period. Meanwhile, the waterlogging risk assessment of design rainstorms with 5, 10, 20, 50-year return periods and three measured rainstorms with the corresponding tidal levels are analyzed.

Key words: PCSWMM model; water discharge capacity of drainage networks; waterlogging risk assessment; Haidian Island

近年来我国城市化快速发展,加之受全球气候变化影响,暴雨等极端天气事件频发,内涝已成为阻碍城市可持续发展的重要因素。为了保障人民群众

的生命财产安全,提高城市的防灾减灾能力和安全保障水平,亟需开展城市内涝风险评估工作。《城市排水(雨水)防涝综合规划编制大纲》(建城

基金项目:水利部公益性行业科研专项(201301093, 201401048);广东省科技计划项目(2016A020223003);华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室自主研究课题项目(2014ZC09);广州市水务科技项目(GZSW-201401)

作者简介:吴海春(1988—),男,硕士研究生,研究方向为水文水资源。E-mail: whcscut@163.com

通信作者:黄国如,教授,博士生导师。E-mail: huanggr@scut.edu.cn

[2013]98号)和GB50014—2006《室外排水设计规范》(2014版)均推荐使用水力模型进行规划模拟,以获得雨水径流的流态、水位变化、淹没范围、淹没深度和淹没时间等信息,然后采用单一指标或多个指标叠加,综合评估城市内涝灾害的危险性^[1]。

在众多的城市排水模型中,以美国环保局于20世纪70年代开发并持续改进的SWMM模型应用最为广泛,但SWMM为一维水文水动力模型,无法计算溢出水量在地面的淹没范围和淹没水深^[2]。PCSWMM为加拿大水力计算研究所(Computational Hydraulics International, CHI)以SWMM为核心开发的水文水力学模型,已广泛应用于一维管道与二维洪泛区耦合模拟、排水管网设计和评估、滞洪蓄水设计与评估、洪水风险分析等领域^[3-6]。本文以海口市海甸岛为研究对象,构建PCSWMM城市雨洪模型,并对海甸岛进行内涝风险评估。

1 PCSWMM 模型基本原理

1.1 PCSWMM 模型结构

PCSWMM是以SWMM为核心开发的都市雨洪模型,其主要计算原理、计算方法与SWMM基本一致,但相对SWMM而言,PCSWMM增强了前后处理能力和可视化等内容^[3-6]。

PCSWMM模型概化思路为大小双层排水系统,即地表二维排水系统(或称大排水系统)和地下一维排水系统(或称小排水系统)。传统城市雨洪模型只有一套排水系统,该系统可以看成是由输水管道、具有蓄水和衔接功能的节点以及出口组成,其主要核心是将城市地面概化成一个一个“水库”,“水库”与“水库”仅能通过排水管网进行水量交换^[7]。后来,Djordjevic等^[8]认为道路也具有行洪作用,于是在传统城市雨洪模型中加入道路排水体系,称为“只考虑了道路”的双层排水系统。但“只考虑了道路”的双层排水系统忽略了雨水在道路之外的其他地表二维的淹没过程,精度达不到理想的地表二维模拟状况。大小双层排水系统将地面概化为“大排水系统”,除了在道路上方建立排水系统,在非道路部分也建立一套排水系统,另外考虑到建筑物等对水流的阻挡作用,在建筑物上不建立排水系统^[3-6]。大小双层排水系统示意图见图1。

1.2 PCSWMM 建模步骤

a. 绘制阻碍层。创建二维网格前需绘制阻碍层,以考虑建筑物等对水流的阻挡作用,即在遥感影像图上将这些区域圈出,不在此区域内创建网格。

b. 绘制边界层。在城市区域,地表类型主要包括道路、草地和河道等。由于道路和草地的糙率不

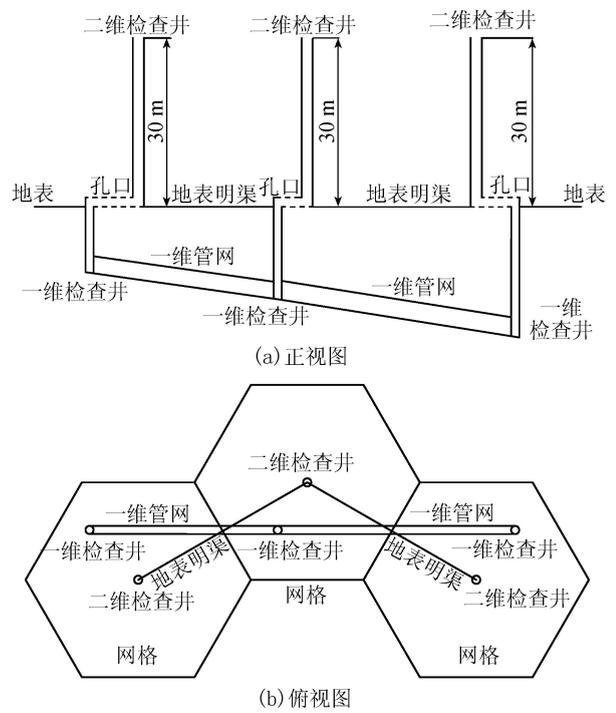


图1 PCSWMM大小双层排水系统示意图

同,河道、道路等对水流的引导作用不同,因此,需绘制不同类型地表边界,构成3种地表类型边界层。

c. 基本设置。①网格类型:PCSWMM网格类型主要有六角形、定向、矩形和自适应等4种类型,其中定向网格主要用于窄长类型边界,如河流和道路等,而且对定向网格还需绘制该边界中心线,用于确定导流方向;自适应类型网格主要用于自行添加二维节点,或直接将CAD提取出的高程点作为二维节点类型;其他边界可根据使用情况选择六角形或矩形。②采样因子 m :采样因子 m 用于生成标高点,每个网格内生成 m 个标高点,取 m 个标高点的高程平均值作为网格和二维检查井的井底标高。③网格分辨率、糙率等其他参数。

d. 创建二维检查井。根据DEM生成二维节点,在每个二维节点位置生成一个二维检查井。为保证二维检查井不发生溢流,将二维检查井深度设为30m,取二维检查井水深作为该网格内地表淹没水深。PCSWMM计算方法与SWMM基本一致,当某检查井水深大于井深时,多余水量就从检查井溢出损失,或作为积水储存于检查井上方,但此时多余水量只是储存于该检查井上方,并未造成该检查井的水深升高,会使计算的地表淹没水深偏低。将二维检查井深度设定为30m,仅是为了保证即使发生内涝,淹没深度也不至于达到30m,水流也不会从二维检查井溢出,当然也可以将其设置为40m、50m等足够大的数值。

e. 创建网格及地表二维明渠。相邻二维检查

井之间以 30 m 深的明渠管道连接,作为地表二维管道,利用泰森多边形法绘制明渠管道的垂直平分线,每个检查井周围明渠管道的垂直平分线相交即组成了该网格的边界,并将网格边界长度作为被该边界垂直平分的明渠宽度,网格内所有二维明渠面积总和作为该网格面积。

f. 确定网格和二维检查井底标高。以二维节点或标高点的地表高程作为该网格和二维检查井的井底高程。如果选择以标高点的地表高程作为该网格和二维检查井的井底高程,还需根据 DEM 生成标高点。取该网格内若干标高点的高程平均值作为该网格和二维检查井的井底高程^[3-6]。

g. 一维二维耦合连接。PCSWMM 中一维二维耦合有两种连接方式,分别为“使用底部孔口”和“直接连接到一维检查井”,其中前者在网格内唯一的二维检查井和网格内需要连接的一维检查井之间建立一个以一维检查井为起点、以二维检查井为终点的底部孔口,并以二维检查井与一维检查井的下沿标高的高程差作为孔口的入口偏移量,这样孔口刚好能连接至地面标高,适用于非河网地区;后者将二维检查井直接移至需要耦合的一维检查井,并将原一维检查井的上沿标高增加 30 m,下沿标高不变,适用于河流或湖泊的一维二维耦合^[3-6]。

h. 设置一维检查井超载深度。使用底部孔口连接一维检查井和二维检查井时,还需给一维检查井设置不会发生溢流的超载深度,如 20 m 等。如前所述,当一维检查井水深大于井深时,即水刚好到达孔口的入口处时,多余水量从该检查井溢出损失,或作为积水储存于该检查井上方,使该一维检查井水头不再升高,水也就不能从一维检查井通过孔口进入二维检查井。而超载深度是指水从检查井溢出前,检查井内水深可以达到的超过检查井深度的最大深度。设置超载深度后,一维检查井便不会发生溢流,也就能从一维检查井通过孔口进入二维检查井^[3-6]。

经过以上步骤便可创建二维网格,并将一维、二维耦合连接,具体流程见图 2。网格的计算结果数据如网格最大淹没深度等,根据网格内二维检查井及二维明渠等相关属性计算得出^[3-6]。

2 PCSWMM 模型构建

2.1 研究区域概况

海口市地处热带滨海地区,海甸岛位于海口市北部、南渡江出海河口段,环抱于南渡江入海口分叉的横沟河和海甸溪之中,面积 13.8 km²。海甸岛片区有海甸五西路明渠、鸭尾溪和白沙河等河道,海甸

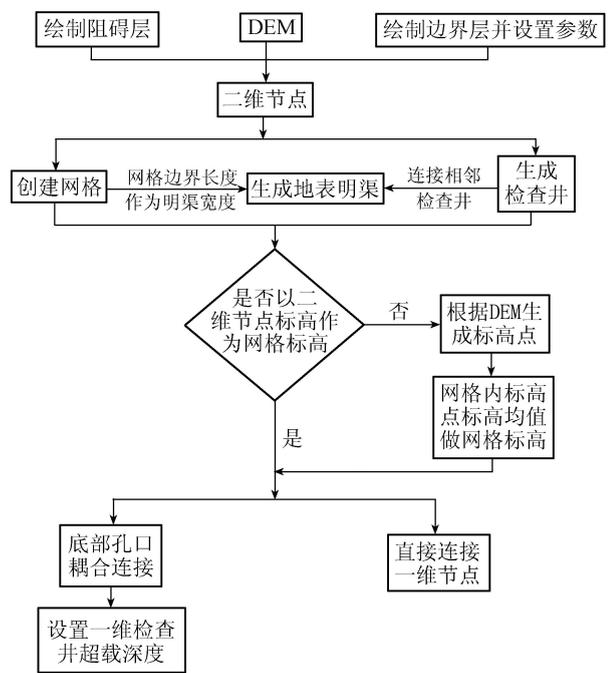


图 2 创建二维网格及一维二维耦合流程

五西路明渠下游和鸭尾溪下游入海口处分别有一座闸门,对河道防洪排涝起重要作用,水闸净宽分别为 18.5 m 和 10.0 m,最大开度均为 3.0 m。海口市多年平均降水量 1827 mm,其中 5—10 月为雨季,降水量占全年降水量的 78.1%。海甸岛四周临海,多处路段地势低洼,岛上雨水通过地下排水管道排入河道,最终排入大海。大部分排水管网设计标准为一年一遇或以下,加之海潮顶托严重,每当遇到台风暴雨或天文风暴潮时,许多路段严重积水^[9]。

2004—2012 年,造成海口市灾害的热带气旋共 14 个,其中 2008 年 10 月 13 日、2010 年 10 月 5 日、2011 年 10 月 5 日等强降雨对海口市主城区造成了严重影响,尤其是 2011 年 10 月 5 日 8 时至 10 月 6 日 8 时,海口市北部沿海地区为暴雨中心区,最大降雨量 88.1 mm/h,最大 24 h 降雨量 441.0 mm,强降雨形成内涝,海甸岛内的海甸五西路、人民大道、和平大道、海达路、海甸二东路、海甸三西路等路段严重积水,平均淹没水深 0.5 m,造成部分道路交通中断,经济损失较为惨重^[9]。

2.2 模型构建

2.2.1 一维模型构建

在构建 PCSWMM 模型前,需对研究区域排水系统进行概化,主要包括排水管网概化、河道概化。SWMM 模型的水力要素包括节点和管段 2 种,节点包括窨井、雨水篦子、探测点、转折点、出水口和蓄水设施;管段包括排水管道和沟渠。概化较大区域的排水管网时可把雨水篦子及其相连管道删除。地表径流最终通过排水管道汇集到河道中,河道蓄量、水

位高低与管道排水能力关系密切。本模型将河道作为排水系统的一部分,将其分段概化成参数(河宽、河深、河底高程)各异的明渠。海甸岛主要河道沿岸均有排水管道出水口。经概化处理后,海甸岛概化为3510根管线、2675个检查井、60个出水口和8个蓄水设施。

根据海甸岛 DEM、街区和道路分布图,在 ArcGIS 中对海甸岛进行划分、调整和合并,再根据道路、管线及建筑物分布等对其进行子汇水区划分。由于海甸岛地势整体较为平坦,在划分过程中更加重视街道和社区单元的分布情况,采用泰森多边形法将流域划分为2925个子汇水区,并为各子汇水区指定流域出口,该出口可为排水管网的检查井,也可设为下游的子流域子汇水区。

坡度值为子汇水区的敏感参数之一。通过 ArcGIS 栅格表面坡度计算工具,对海甸岛 DEM 进行坡度计算,获取各子汇水区的平均坡度信息。地表漫流宽度直接对子汇水区汇流时间产生影响。依据 SWMM 模型手册推荐公式,利用子汇水区面积与地表路径长度的比值来计算地表漫流宽度。利用地形图结合遥感影像图提取各种用地类型(道路及广场用地、屋面、城市绿化带及公园)信息,统计各子汇水区的不透水性。

SWMM 模型中的水文水动力参数有些可根据研究区域的实际情况予以事先确定,如流域面积、坡度、汇水区不透水率等,其他一些参数如汇水区漫流宽度、不透水区曼宁系数、霍顿产流参数等,则根据相关文献资料选定。本研究参考模型用户手册和相关研究成果取初值,输入实测降雨和潮位数据进行计算,然后根据计算结果与实地调查情况进行对比,再调整参数重新计算。调整参数至与实地调查情况接近至误差允许范围内,得到的最终参数见表1,参数率定结果见2.3节。

表1 子汇水区水动力参数取值

参数名称	物理意义	取值
N-Imperv	不透水区曼宁系数	0.011
N-Perv	透水区曼宁系数	0.24
Destore-Imperv	不透水区注蓄水深度(mm)	2.5
Destore-Perv	透水区注蓄水深度(mm)	5.0
Zero-Imperv	不透水区无洼地不透水区所占百分比(%)	25
MaxRate	最大下渗率(mm/h)	78.1
MinRate	最小下渗率(mm/h)	3.30
Decay	渗透衰减系数	3.35

2.2.2 二维模型构建

按前述分析计算步骤构建一维二维耦合模型,绘制研究区边界、道路边界、道路中心线图、阻碍图层。其中河道部分在一维模型构建时已概化为明

渠,故在河道部分不再创建网格,将河道图层也绘制在阻碍图层。道路内网格类型采用定向网格,分辨率取8m,采样因子 m 取3,曼宁系数取0.015。道路之外的其他研究区域网格类型采用六角形网格,分辨率取30m,采样因子 m 取3,曼宁系数取0.013。最终得到21732个二维网格,面积从25m²到1000m²不等,平均面积425m²。鉴于本文所创建网格均处于非河网地区,故选取“使用底部孔口”连接方式进行一维二维耦合。

2.3 模型验证

选取2011年10月5—6日暴雨进行参数率定,结果见表2。根据内涝实际调研情况,该场次暴雨造成积水最为严重,提取模型计算淹没点结果,将其与该场次暴雨实地调查涝点分布比较,模拟涝点结果与实际内涝发生位置较为吻合,表明该模型能较为准确地模拟海甸岛片区排水状况。由表2可知,实测最大水深和模拟最大水深总体误差较小,模拟得到的积水结果较为准确地反映了实际内涝状况。分别采用2008年10月13—14日和2010年10月5—6日场次降雨对所构建的雨洪模型进行验证,计算结果见表2,但由于2008年和2010年暴雨没有实测淹没资料,故表2中这两场次暴雨只有模拟结果。由表2可看出,3场实测暴雨条件下,易涝点遭受不同程度淹没,不同场次暴雨造成积水路段有所不同,其中积水最为严重的地方均发生在海甸五西路,与实际情况相同。

表2 实测暴雨下各涝点最大淹没深度 m

涝点名称	20111105—20111106		20081013—20101105—20081014		20101106
	实测	模拟	误差	模拟	模拟
海甸五西路	0.50	0.51	0.01	0.59	0.39
人民大道	0.50	0.47	-0.03	0.43	0.16
和平大道	0.50	0.38	-0.12	0.30	0.05
海达路	0.50	0.46	-0.04	0.38	0.10
海甸二东路	0.50	0.41	-0.09	0.38	0.38
海甸三西路	0.40	0.41	0.01	0.32	0.25

3 排水系统能力评估

3.1 评估方法及边界条件

利用所构建的 PCSWMM 模型评估海甸岛现状排水管网的排水能力,统计各种降雨条件下一维检查井和一维管道超载情况。

3.1.1 设计暴雨

海南省气候中心与海口市气象局于2013年12月修改了海口市暴雨强度公式,该公式基于海口市国家气象站1961—2012年共计52年的自记雨量资料,依据皮尔逊Ⅲ型分布的最小二乘法修订而成。

设计暴雨强度计算公式为

$$q = \frac{3245.114 \cdot (1 + 0.2561 \lg P)}{(t + 17.172)^{0.654}} \quad (1)$$

式中: q 为设计暴雨强度, $L/(s \cdot \text{hm}^2)$; t 为降雨历时, min ; P 为设计重现期, a 。

采用国际上应用广泛的芝加哥雨型进行降雨过程分配,降雨历时为2h,时间间隔为5min,雨峰位置 $r=0.415$,得到设计重现期为1a、2a、5a、10a和20a的降雨过程。

3.1.2 设计潮位分析

海口市属滨海城市,排水易受潮位顶托影响,故需考虑潮位对排水的作用。近些年有些学者采用Copula函数建立区间暴雨和外江洪(潮)水位的联合分布,利用联合概率密度分析两者的遭遇几率,得出“对于不超过10年一遇的暴雨,遭遇同频率的外江水位的几率最大;但对超过10年一遇的暴雨,遭遇比其重现期小些的外江水位的几率大些”^[10-11],故对于重现期不超过10年一遇的暴雨采用同频率设计潮位进行计算,但对于重现期超过10年一遇的暴雨,考虑其不利情况,本文亦采用同频率设计潮位进行计算。

3.2 排水系统能力评估结果

利用PCSWMM模型得到实测及设计暴雨条件下一维检查井溢流和一维管道超载情况统计结果(表3)。由表3可知,针对设计暴雨,随着设计重现期(P)及组合潮位增大,溢流检查井数量逐渐增多,超载管道长度逐渐增加,且可得出海甸岛84.8%的排水管网排水能力低于1年一遇的结论。对于实测降雨而言,20101005和20111005场次降雨的降雨历时和潮位均比较接近,20081013场次降雨的降雨历时、降雨量及潮位均比20101005场次降雨高,但低于20111005场次的降雨量及雨强。由表3可知,20081013场次降雨的溢流检查井个数和管道超载长度比20101005场次大,比20111005场次降雨小。总体来说,降雨强度越大、潮位越高、历时越长,溢流检查井个数及超载管道长度越大。

表3 实测及设计暴雨条件下一维检查井溢流和一维管道超载情况统计结果

降雨场次/设计重现期	降雨量/mm	最大雨强/ $(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	平均雨强/ $(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	降雨历时/h	溢流检查井数量/个	溢流检查井比例/%	满载管道总长度/km	满载管道比例/%
20081013	280.40	37.40	12.190	23	967	36.2	73.6	84.6
20101005	220.70	34.50	14.710	15	647	24.2	66.6	76.6
20111005	427.80	88.10	26.730	16	1080	40.4	80.9	93.0
$P=1a$	96.42	176.98	48.210	2	839	31.4	73.8	84.8
$P=2a$	103.85	190.62	51.925	2	936	35.0	74.5	85.6
$P=5a$	113.68	208.66	56.840	2	1068	39.9	75.2	86.4
$P=10a$	121.11	222.30	60.555	2	1156	43.2	75.5	86.8
$P=20a$	128.55	235.94	64.275	2	1220	45.6	75.9	87.2

注:一维检查井共2675个,一维管道长共87km。

4 内涝风险评估

以海口雨量站1970—2012年43年实测暴雨序列为基础资料,用皮尔逊Ⅲ型曲线法求得海口24h不同重现期(5a、10a、20a、50a)的设计暴雨量值。选取1996年9月19日17:00至9月20日17:00的24h暴雨过程为24h典型暴雨过程(雨型),该场暴雨雨量大(398.7mm),峰值也大(77.3mm/h),且雨峰出现在暴雨过程后期,其形成的洪水主峰较大且靠后,对排水防涝安全较为不利。依据典型暴雨过程,以设计暴雨量值为控制,采取同频率放大法推求24h雨量时程分配。分别以5年一遇、10年一遇、20年一遇、50年一遇24h设计降雨组合同频率潮位进行动态模拟,对海甸岛进行内涝风险评估。

评估标准采用国外常用的洪水风险评价标准,主要考虑洪水淹没深度和流速来进行风险程度评估,具体计算公式如下:

$$R = d(v + n) + f \quad (2)$$

式中: R 为风险等级; d 为积水深度, m ; v 为流速, m/s ; n 为常数,取0.5; f 为危害系数。

当积水深度为0~0.25m时, f 取0;当积水深度为0.25~0.75m时,草地/耕地、森林、城市的 f 值分别取0、0.5、1;当 $d > 0.75m$ 或 $v > 2m/s$ 时,草地/耕地、森林、城市的 f 值分别取0.5、1、1。根据计算出的内涝风险指数,风险等级划分如下: $R < 0.75$,风险极低; R 值在0.75~1.25之间,风险低; R 值在1.25~1.5之间,风险中等; $R > 1.5$,风险高^[12]。根据评估结果,分别列出不同重现期降雨情景下不同风险等级的面积(表4)。

由表4可知,针对设计暴雨,随着降雨强度增加,风险极低的面积几乎不变,风险低的面积逐渐减小,风险中等和风险高的面积逐渐增大。针对实测暴雨,20081013场次降雨历时较长,潮位较高,风险低、风险中等及风险高的面积均比其余两场大,20111005场次降雨强度远大于20101005场次降雨,风险低、中等及高风险面积均大于20101005场

表 4 内涝风险评估结果

降雨场次/ 设计 重现期	总降雨 量/mm	降雨 历时/h	面积/hm ²			
			风险极低	风险低	风险中等	风险高
20081013	280.40	23	828.8	42.2	35.1	18.7
20101005	220.70	15	899.6	11.6	9.9	3.7
20111005	427.80	16	852.9	32.3	29.8	9.8
P=5 a	234.04	24	693.9	153.2	56.0	21.7
P=10 a	282.32	24	693.9	127.3	74.1	29.5
P=20 a	326.82	24	693.9	103.9	87.5	39.5
P=50 a	382.10	24	691.4	73.2	102.6	57.6

次降雨。由此可以得出结论,针对滨海城市,降雨历时越长,潮位越高;降雨强度越大,内涝越严重。

5 结 论

a. 阐述了 PCSWMM 模型的基本原理及建模步骤,构建了海甸岛片区 PCSWMM 模型,利用 20081013、20101005、20111005 这 3 场实测暴雨及潮位过程计算分析,发现所构建模型具有良好的精度和可靠性。

b. 以 1 a、2 a、5 a、10 a 和 20 a 5 种不同设计重现期降雨及 3 场实测降雨组合对应潮位对海甸岛进行排水现状能力评估,结果表明 84.8% 管网排水能力仅处于 1 年一遇以下。针对滨海城市,降雨强度、潮位、降雨历时越大,检查井溢流和一维管网超载情况越严重。

c. 以 5 年一遇、10 年一遇、20 年一遇和 50 年一遇 24h 4 种不同设计重现期降雨及 3 场实测降雨组合对应潮位对海甸岛进行内涝风险评估,结果表明在 50 年一遇降雨情景下 8% 的面积处于风险低、11.1% 的面积处于风险中等、6.2% 的面积处于风险高。针对滨海城市而言,降雨历时越长,潮位越高,降雨强度越大,处于内涝风险高的面积越大,内涝越严重。

参考文献:

[1] 林琳. 合肥市典型冲沟雨水系统排水防涝能力评估研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30 (15): 150-154. (LIN Lin. Assessment of flood drainage capacity of typical stormwater gully system in Hefei City [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30 (15): 150-154. (in Chinese))

[2] 陈小龙, 赵冬泉, 盛政, 等. Digital Water 在城市排水防涝规划中的应用[J]. 中国给水排水, 2015, 31 (21): 105-108. (CHEN Xiaolong, ZHAO Dongquan, SHENG Zheng, et al. Application of digital water simulation system in urban flood control planning [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31 (21): 105-108. (in Chinese))

[3] JAMES W, ROSSMAN L A, JAMES W R C. User's guide

to SWMM 5: based on original USEPA SWMM documentation [M]. Guelph, Ontario, Canada: Computational Hydraulics International, 2010.

[4] AHIABLAME L, SHAKYA R. Modeling flood reduction effects of low impact development at a watershed scale [J]. Journal of Environmental Management, 2016, 171: 81-91.

[5] BECK J. Comparison of three methodologies for quasi-2d river flood modeling with SWMM5 [J/OL]. Journal of Water Management Modeling, 2016, C402. <https://www.chijournal.org/Content/Files/C402.pdf>

[6] KLENZENDORF B, PORESKY A, KELLY M, et al. 1D/2D modeling of decentralized stormwater control measures for flood mitigation in Austin, Texas [C]//Proceedings of World Environmental and Water Resources Congress 2015. Alexander, American: American Society of Civil Engineers, 2015: 204-213.

[7] 黄国如, 冯杰, 刘宁宁, 等. 城市雨洪模型及应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.

[8] DJORDJEVIC S, PRODANOVIC D, MAKSIMOVIC Ć. An approach to simulation of dual drainage [J]. Water Science and Technology, 1999, 39 (9): 95-103.

[9] 黄国如, 黄维, 张灵敏, 等. 基于 GIS 和 SWMM 模型的城市暴雨积水模拟 [J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26 (4): 1-6. (HUANG Guoru, HUANG Wei, ZHANG Lingmin, et al. Simulation of rainstorm waterlogging in urban areas based on GIS and SWMM model [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015, 26 (4): 1-6. (in Chinese))

[10] 武传号, 黄国如, 吴思远. 基于 Copula 函数的广州市短历时暴雨与潮位组合风险分析 [J]. 水力发电学报, 2014, 33 (2): 33-40. (WU Chuanhao, HUANG Guoru, WU Siyuan. Risk analysis of combinations of short duration rainstorm and tidal level in Guangzhou based on Copula function [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33 (2): 33-40. (in Chinese))

[11] 刘曾美, 陈子燊. 区间暴雨和外江洪水位遭遇组合的风险 [J]. 水科学进展, 2009, 20 (5): 619-625. (LIU Zengmei, CHEN Zisheng. Risk study of the bivariate encounter of interzone rainstorm and flood level of the outer river [J]. Advance in Water Science, 2009, 20 (5): 619-625. (in Chinese))

[12] WADE S, RAMSBOTTOM D, FLOYD P, et al. Risks to people: developing new approaches for flood hazard and vulnerability mapping [C]//Proceedings of Defra Flood & Coastal Management Conference. York, UK: HR Wallingford, 2005.

(收稿日期: 2016-06-22 编辑: 彭桃英)