DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2015.04.01

基于 GIS 和 SWMM 模型的城市暴雨积水模拟

黄国如[1a,1b], 黄 维[1a], 张灵敏[1a], 陈文杰[1a], 冯 杰[2]

(1. 华南理工大学 a. 土木与交通学院; b. 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640;
2. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038)

摘 要: 以海口市海甸岛片区为研究区域,对组成排水系统的排水管网、道路和河道水系等进行合理概化,构建了该片区排水管网水力模型,提出了基于 GIS 和 SWMM 的暴雨积水计算方法,采用3场实测暴雨进行模拟分析,所得内涝淹没位置与实际调研情况基本相符,表明本文所提出的方法具有良好的精度和可靠性;分别对重现期为1、2、5、10、20a 设计暴雨情形下的管道节点溢流和积水深度进行模拟。结果表明:该模型较好地评估了该片区排水管网排水能力;另外对比了实测暴雨和设计暴雨的积水模拟结果,表明暴雨雨型对模拟结果有重要影响。

关键词: SWMM 模型; GIS; 暴雨积水; 积水扩散; 城市暴雨

中图分类号:P333.2 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2015)04-0001-06

Simulation of rainstorm waterlogging in urban areas based on GIS and SWMM model

HUANG Guoru[1a,1b], HUANG Wei[1a], ZHANG Lingmin[1a], CHEN Wenjie[1a], FENG Jie[2]

(1. *a. School of Civil Engineering and Transportation; b. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou* 510640, *China*; 2. *Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*)

Abstract: Taking Haidian islands at Haikou as the study area, the paper reasonably generalized the drainage network, road and river water system of drainage system, and developed the hydraulic calculation model of drainage network, and proposed the calculation method of rainstorm waterlogging. The model is verificated by the three measured rainfall records. The simulated waterlogging submerged positions are basically coincided with the actual investigation situation, which shows that the method proposed has good precision and reliability. It respectively simulated the node overflow of drainage network and waterlogging depth of surface with design rainstorm of return period of 1, 2, 5, 10, 20 years by using the method. The model better evaluated the drainage capacity of drainage pipe network at study area; it compared and analyzed the simulated results of measured and design rainstorm and show that the type of rainfall has important influence on simulation result.

Key words: SWMM model; GIS; rainstorm waterlogging; waterlogging diffusion; urban storm

随着气候变化和人类活动影响加剧,城市化水平进一步提高,城区面积急剧扩大,城市化所带来的水文效应使城市洪涝灾害出现频率不断增大[1]。最近30多年来海口市城市化发展迅猛,城市下垫面发生剧烈变化,暴雨洪水特性发生明显改变,暴雨内涝问题愈发突出,2010 和 2011 年国庆期间特大暴雨、2014 年 7 月 16 日亚马逊台风引起的特大暴雨均导致海口市大面积受涝,造成严重的社会经济损失。对城市雨洪过程进行模拟与预测是有效应对城市暴雨内涝灾害的重要技术手段,目前国内外应用较为广泛的城市雨洪模拟模型主要包括 SWMM 模型、PCSWMM 模型、InfoWorks ICM、MIKE URBAN 等[1]。InfoWorks ICM、MIKE URBAN 等均采用二维水动力学方法,能动态地模拟二维地表积水淹没情况,模拟结果精度较高,但它们通常运行时间较长,且均为商业化软件,难以实现二次开发以满足实时

收稿日期:2015-04-27; **修回日期**:2015-05-12

基金项目:水利部公益性行业科研专项经费项目(201301093); 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)

作者简介:黄国如(1969-),男,江苏南京人,博士,教授,博导,主要从事水文水资源研究。

预报需要;而 SWMM 为开源软件,便于与 GIS 相结合以实现二次开发[2-4]。刘为[4]提出了基于 GIS 的城市暴雨积水模拟预测方法,将 SWMM 模型计算得到的节点溢出量通过有源淹没计算方法模拟暴雨积水的演进过程,但该方法的水流只有四个方向,与实际情况有较大出入;石赟赟等[5]提出了基于 GIS 和 SWMM 的城市暴雨内涝淹没模拟方法,其实质是求出各集水区的管网节点溢出水量,再通过积水扩散法求得地表淹没水深和范围,但集水区划分的不确定性会影响积水模拟结果。为此,本文提出了基于 GIS 平台和 SWMM 模拟结果,开发城市暴雨积水计算模块,并以海口市海甸岛片区进行验证。

1 暴雨积水计算方法

SWMM 是一维水文水动力模型,能较好地模拟各种降雨条件下的下渗、蒸发、地表径流及排水管网一维水文水动力等过程,当降雨达到一定强度时,排水管网超负荷运行,部分节点水深大于井深,多余水量从节点溢出,然而该模型无法将溢出的水量进行二维地表积水模拟计算,即无法得到淹没水深和积水面积等淹没信息[1-9]。针对该问题,本文借助 GIS 强大的分析计算功能,结合真实地表和 SWMM 模型节点溢出水量,基于 ArcGIS Engine 和 VS2010 平台开发了暴雨积水计算模块,能较好地模拟研究区域内的暴雨积水水深和积水面积等信息,实现淹没水深的动态分析计算,主要包括 DEM 构建、溢流量统计、积水扩散分析和积水计算等 4 个部分,分别简介如下:

(1)DEM 构建。选择反距离权重法创建研究区域 DEM 数据,为使所构建的 DEM 与真实地表更为吻合,考虑洼地和建筑物等影响因素,对 DEM 进行后期处理。根据实地调研,研究区域为城建区,地势较为平坦,有一些低洼地区,需对 DEM 进行填洼处理。另外,将建筑物统一考虑为不可积水,将建筑区域高程提高到一定数值,起到阻隔积水扩散作用,通过以上处理得到较为真实的 DEM 栅格数据。

(2)溢流量统计。溢流量统计包括节点与栅格溢流量统计两部分。节点溢流量统计通过 ArcGIS 中添加 XY 数据功能,将节点矢量化,并把坐标、井底高程、井深等相关属性通过连接功能导入其属性表,并按照 DEM 栅格行列编号方式对节点进行行列编号。然后通过调用 SWMM 动态库中的 GetSwmmResult 函数来读取 SWMM 结果文件,统计出每个节点的溢流总量。栅格溢流量统计通过创建一个二维数组,将每个节点溢流量按照栅格行列编号一一对应关系统计到相应栅格中。

(3)积水扩散分析。溢流总量统计完成后,将每个栅格的水量扩散到周边 8 个高程值较小的栅格中,而每个栅格所分配到的水量按照试算法求得。具体实现步骤为:

(1)基于 ArcGIS Engine 读取 DEM 每个栅格高程值,然后将它存放在一个二维数组中;

(2)将每个栅格总水量除以栅格面积,转化成水深;

(3)选择水深大于某一数值的栅格进行第 1 轮积水扩散,结合其周围 8 个栅格的高程值及其水量,采用试算法把水深分配到这 9 个(8 +1)栅格;

(4)周围 8 个栅格所分配到的水深(水量)分别继续往各自周围 8 个栅格扩散,直至最外围的栅格所分配到的水深(水量)小于某一数值时停止扩撒,同时更新二维数组中的值(等于高程值加上水深);

(5)然后再从最开始被选择的栅格按照最新分配到的水深(水量)进行第 2、3、……、n 轮积水扩散;

(6)选择下一个水深大于某一数值的栅格继续扩散,重复(4)、(5)、(6)步骤,直到完成最后一个栅格水量扩散为止。

经过以上步骤整个积水扩散结束,积水扩散流程如图 1 所示。

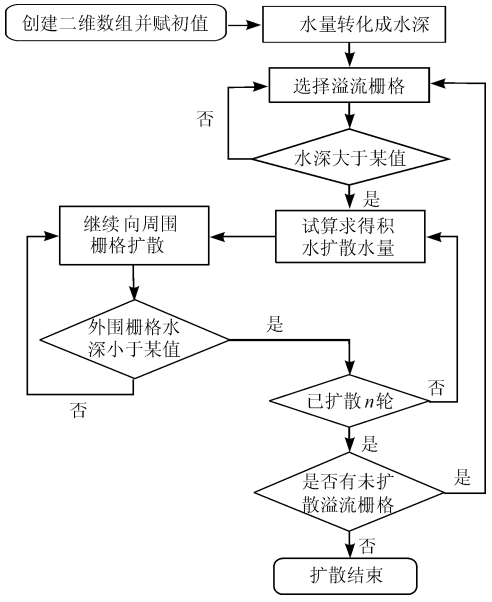


图 1 积水扩散流程图

(4)积水计算。积水扩散分析结束后,二维数组最终存储的值等于栅格高程加水深值,此时将该数组减去高程值便可得到每个栅格的积水水深。在

ArcGIS 中,使用“创建渔网”工具创建面要素类,命名为“水深”,要求与研究区域 DEM 范围及像元大小一致。与此同时,在“水深”属性表中添加“i”、“j”两个字段,通过字段计算器计算每个面要素行列号,使每个要素与 DEM 的每个栅格行列号一一对应。然后将积水水深写入到“水深”的属性表某一字段里,此时可通过属性选择筛选出水深值大于 0 的面要素,进一步统计出积水面积大小。最后将“水深”转换成栅格,可在 ArcGIS 或开发的系统中加载显示。

2　暴雨积水淹没分析计算

2.1　研究区域概况

海口市地处低纬度热带北缘,河流密集,水塘、河汊、沼泽四处可见,海甸岛位于海口市北部的南渡江入海口,是一个典型的三角洲岛屿,面积 13.8 km^2。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 和 10.0 m,最大开度均为 3.0 m。

海甸岛四周临海,多处路段地势低洼,岛上所有雨水均通过地下排水管道排入河道,最终排入大海,每当遇到台风暴雨或天文风暴潮时,许多路段就会严重积水。自 2004 年以来,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 6 日 8 时,海口市北部沿海地区为暴雨中心区,最大 1 h 降雨量 88.1 mm,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。

2.2　SWMM 模型构建

(1)排水系统概化。在建立海甸岛 SWMM 雨洪模型前,需对研究区域排水系统进行概化,主要包括排水管网概化、河道概化和道路概化。SWMM 模型的水力要素包括节点和管段两种,节点包括铰点(窨井、雨水篦子、探测点、转折点)、出水口和蓄水设施(蓄水池、湖泊),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。经过概化处理后,海甸岛铰点有 2 677 个,出水口 60 个,蓄水设施 8 个,管段 3 512 根。

地表径流最终通过排水管道汇集到河道中,河道容量和水位高低直接影响管道排水能力,本模型将河道作为排水系统一部分。海甸岛主要河道沿岸均有排水管道出水口,现状河道断面大都为矩形,将其分段概化成参数(河宽、河深、河底高程)各异的明渠,最终河道概化成 272 条“河道明渠”。

当降雨达到一定强度时,排水管网出现超载,有部分雨水从节点溢出到道路,或有部分雨水直接降落在道路上流动,此时道路起到行洪作用,与排水管网组成双层排水系统,当管网恢复排水能力时,雨水重新进入节点,通过管道继续传输。将海甸岛主干道概化成明渠起到排水作用,概化原则为:每两个节点之间为一条“道路明渠”,即每根管网对应一条明渠,深度统一取 0.1 m,宽度根据地形资料得到,将主干道概化成 820 条“道路明渠”。

海甸岛排水系统概化图如图 2 所示。

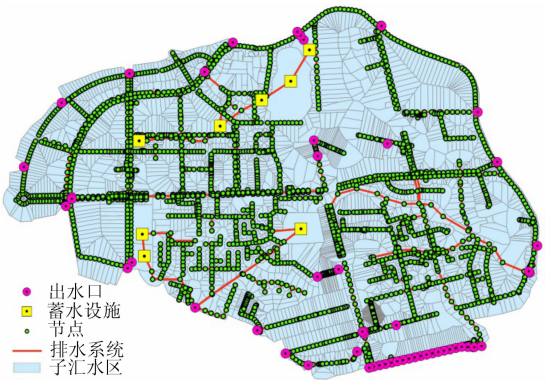


图 2　排水系统与子汇水区概化图

(2)子汇水区划分。根据海甸岛 DEM、街区和道路分布图,在 ArcGIS 中对海甸岛进行子流域划分,在此基础上再进行子汇水区细致划分,并为各子汇水区指定流域出口,该出口可为排水管网节点,也可以设为下游的子流域。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,经划分、调整和合并,研究区域子汇水区有 2 925 个,对多边形要素类进行面积计算,得知最大面积为 25.94 hm^2,最小面积为 0.048 hm^2。子汇水区概化图亦如图 2 所示。

(3)坡度、不透水率分析。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,并通过分区统计工具统计每个子汇水区平均坡度。经计算和统计,子汇水区最大平均坡度为 7.88%,最小平均坡度为 0.02%。

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[9],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,得到子汇水区最大地表漫流宽度为 576.54 m,最小为 2.02 m。海甸岛现状用地类型主要包括住宅用地、商业用地、公共管理与公共服务用地、交通设施用地、待开发用地、绿地及水体等,利用 ENVI 软件将海甸岛片区的高清遥感影像图进行图像监督分类,分成不透水区、透水区和半透水区等 3 类,经过 ENVI 识别和 ArcGIS 统计计算后,子汇水区最大不透水率为 100%,最小不透水率为 8.9%,研究区域平均不透水率为 70.04%。

(4)模型参数。子汇水区的其他一些参数,如不透水区曼宁系数、最大下渗率等,一般通过经验、文献、SWMM 模型手册等方式得到各参数的取值范围[3-9],为提高调参效率,选取与海口市地理位置相近的广州市和深圳市作为参考地区[2-3],并在此基础上根据实测暴雨内涝实地调查情况优化确定模型参数,得到的参数见表 1。

2.3 实测暴雨积水模拟结果分析

选取近年降雨强度较大的 3 场次暴雨(2008 年 10 月 13 – 14 日、2010 年 10 月 5 – 6 日和 2011 年 10 月 5 – 6 日)进行模拟计算,统计该片区排水系统模拟结果(表 2)。由表 2 可看出,溢流节点数随降雨平均雨强增大而增大,节点溢流量峰值与最大雨强关系密切,节点最长溢流时间与降雨历时直接相关,总体来看,降雨强度越大、历时越长,内涝越严重,特别是 2011 年 10 月 5 日 – 6 日场次暴雨,其降雨强度大、总降雨量大,导致溢流节点数量多、溢流峰值大、溢流时间长。

表 1 子汇水区参数取值

参数名称	物理意义	取值
N – Imperv	不透水区曼宁系数	0.015
N – Perv	透水区曼宁系数	0.032
Destore – Imperv	不透水区洼蓄水深度/mm	3.2
Destore – Perv	透水区洼蓄水深度/mm	6.0
Zero – Imperv	不透水区无洼地不透水区所占百分比/%	20
MaxRate	最大下渗率/(mm · h^{-1})	82.5
MinRate	最小下渗率/(mm · h^{-1})	3.5
Decay	渗透衰减系数	3.13

表 2 实测暴雨条件下节点溢流情况统计

降雨场次	降雨历时/h	降雨量/mm	最大雨强/(mm · h^{-1})	平均雨强/(mm · h^{-1})	溢流节点数/个	溢流峰值/(m^3 · s^{-1})	最长溢流时间/h
2008-10-13 – 14	23	280.4	37.4	12.2	81	2.20	14.87
2010-10-05 – 06	15	220.7	34.5	14.7	84	1.88	7.95
2011-10-05 – 06	16	427.8	88.1	26.7	255	2.87	11.91

根据内涝实际调研情况,2011 年 10 月 5 日 – 6 日场次暴雨造成积水最为严重,提取模型计算溢流节点结果,得到该场暴雨涝点分布位置图(图 3),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。

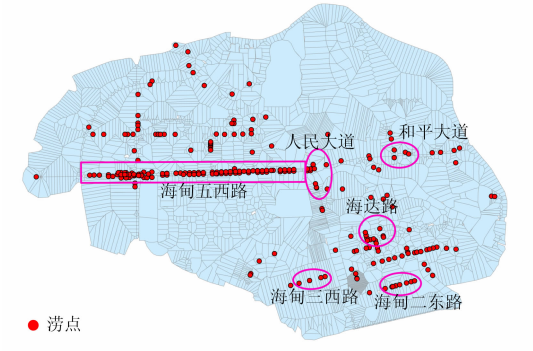


图 3 2011 年 10 月 5 日 – 6 日场次暴雨涝点分布图

研究区域地形图比例为 1∶2000,提取其高程点并采用反距离权重法插值得到 DEM 栅格,像元大小为 10 × 10 m,行列数为 378 × 577,对主要建筑物进行适当抬高。选取 2011 年 10 月 5 – 6 日暴雨进行参数率定,结果见表 1,将模拟得到的积水栅格分布图(图 4)与实际调研涝点分布位置进行对比分析,结果表明模拟积水范围与实际调查涝点范围较为吻合,涝点计算结果见表 3,从中看出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实际内涝情况,说明本文提出的暴雨积水计算方法具有良好的精度和可靠性。分别采用 2008 年 10 月 13 – 14 日和 2010 年 10 月 5 日 – 6 日场次降雨对所构建的雨洪模型进行验证,计算结果亦见表 3,但由于 2008 年和 2010 年暴雨没有实测淹没资料,故表 3 中这两场次暴雨只有模拟结果。通过 ArcGIS 图层属性表筛选功能,统计出研究区域内每一场暴雨造成的总积水面积,计算结果亦见表 3。

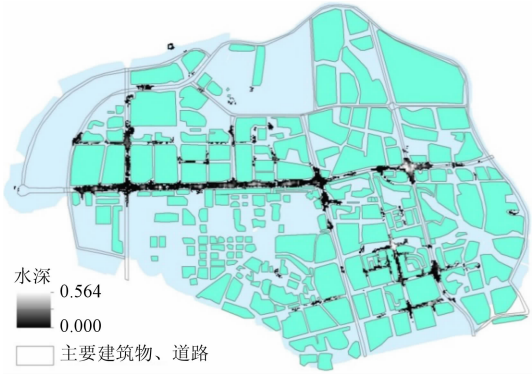


图 4　2011 年 10 月 5 – 6 日场次暴雨积水分布图

由表 3 可看出,3 场实测暴雨条件下,易涝点遭受不同程度淹没,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。不同场次暴雨造成积水路段有所不同,降雨强度越大、历时越长,积水水深和范围越大,内涝灾害越严重。

2.4　设计暴雨积水模拟结果分析

海南省气候中心与海口市气象局依据《室外排水设计规范》(GB50014 – 2006,2011 版)要求对海口市暴雨强度公式进行了修编,资料来源为海口市国家气象站 1961 – 2012 年共计 52 a 的自记雨量资料,编制方法采用皮尔逊Ⅲ型分布的最小二乘法,新修订的海口市暴雨强度公式如下:

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

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

利用海口市暴雨强度公式,采用在国际上应用广泛的芝加哥雨型,我国一般设计标准雨峰在降雨过程段的 0.35 ~ 0.45,本文取 $r = 0.415$,选取时间间隔为 5 min,降雨总历时为 120 min,得到重现期为 1、2、5、10 和 20 a 的设计暴雨过程,进一步校核海甸岛雨水系统排水能力。对各重现期暴雨条件下节点溢流情况进行统计,结果见表 4。

由表 4 可知,即使在低重现期情况下,总节点溢流百分比较高,一方面是因为排水系统设计标准偏低,另一方面是因为地势较低,受风暴潮顶托严重,导致海甸岛片区内涝频发。

分别模拟重现期为 1、2、5、10 和 20 a 的设计暴雨条件下海甸岛片区内涝积水情况,结果见表 5。

表 3　实测暴雨下各涝点最大水深和积水面积统计

淹没特征	涝点	2011-10-05 – 06			2008-10-13 – 14	2010-10-05 – 06
		实测	模拟	误差	模拟	模拟
最大水深/m	海甸五西路	0.50	0.55	0.05	0.46	0.40
	人民大道	0.50	0.35	–0.15	0.13	0.11
	海达路	0.50	0.55	0.05	0.30	0.25
	和平大道	0.50	0.57	0.07	0.00	0.00
	海甸二东路	0.50	0.49	–0.01	0.32	0.31
	海甸三西路	0.40	0.48	0.08	0.00	0.00
积水面积/hm^2			51.42		17.51	16.66

表 4　各重现期下节点溢流情况统计

降雨重现期	降雨量/mm	最大雨强/(mm · h^{-1})	溢流峰值/(m^3 · s^{-1})	最长溢流时间/h	溢流节点数/个	占总节点百分比/%
1 年一遇	96.4	177.0	1.36	1.26	297	11.1
2 年一遇	103.9	190.6	1.66	1.28	366	13.7
5 年一遇	113.7	208.7	1.90	1.31	437	16.3
10 年一遇	121.1	222.3	2.01	1.34	495	18.5
20 年一遇	128.6	235.9	2.27	1.36	558	20.9

表 5　各重现期下最大水深和总积水面积统计

重现期	1 年一遇	2 年一遇	5 年一遇	10 年一遇	20 年一遇
最大水深/m	0.12	0.18	0.29	0.40	0.50
总积水面积/hm^2	20.26	27.45	38.46	47.32	57.88

由表 5 可见,1 年一遇重现期暴雨就有部分街道出现成片淹没情况,说明海甸岛排水管网设计标准偏低、地势较低,随着设计暴雨重现期增加,内涝积水水深和积水范围不断增大,当重现期达 5 年一遇以上时,积水成片现象大面积存在,其中海甸五西路、人民大道、和平大道、海达路、海甸二东路、海甸三西路为发生积水的主要路段。

对各实测暴雨和设计暴雨的降雨历时、降雨量、最大雨强及其对应的最大水深和总积水面积进行统计对比(见表 6),结果表明设计暴雨情形下的总积水面积普遍比实测暴雨积水面积大,这主要是由于设计暴雨采用芝加哥雨型,具有峰值较大、历时较短等特点,在 SWMM 模型计算过程中容易造成管网在短时间内排水能力不足,使得产生溢流的节点数较多、溢流量较小,从而导致积水面积较大、水深较小等情况。但实测暴雨具有峰值较小、历时较长、降雨总量较大等特点,故出现溢流的节点数相对较少,但由于排水管网受河道水位顶托,降雨历时过长会导致部分节点溢流量过大,在地面易形成较大积水深度。因此,暴雨雨型对模型的计算结果有重要影响,即使是 1 年一遇暴雨,积水面积也可能比降雨总量较大的实测暴雨大,但最大积水深度普遍小于实测暴雨,故积水深度或积水面积并不是衡量内涝积水严重程度的唯一指标,还需要考虑淹没时间等其他指标。

表 6 实测暴雨和设计暴雨情形下最大水深和总积水面积

暴雨	降雨历时/h	降雨量/mm	最大雨强/(mm·h^{-1})	最大水深/m	总积水面积/hm^2
2008-10-13 – 14	23	280.4	37.4	0.46	17.51
2010-10-05 – 06	15	220.7	34.5	0.40	16.66
2011-10-05 – 06	16	427.8	88.1	0.57	51.42
1 年一遇	2	96.4	177.0	0.12	20.26
2 年一遇	2	103.9	190.6	0.18	27.45
5 年一遇	2	113.7	208.7	0.29	38.46
10 年一遇	2	121.1	222.3	0.40	47.32
20 年一遇	2	128.6	235.9	0.50	57.88

3 结 语

(1)提出了基于 GIS 和 SWMM 模型的城市暴雨内涝积水计算方法,模拟计算了 3 场近年较大实测暴雨的积水情况,模拟得到的积水水深和积水范围较为准确地反映了实际内涝状况,表明本文提出的暴雨积水计算方法具有良好的精度和可靠性。

(2)采用 5 种重现期的设计暴雨进行积水模拟,结果反映出海甸岛片区排水管网设计标准偏低、地势较低等现状,且随着设计暴雨重现期增加,内涝积水水深和积水范围不断增大。

(3)对比分析了实测暴雨和设计暴雨情形下的积水模拟结果,表明暴雨雨型对模型的模拟结果有重要影响,且在衡量内涝积水严重程度时需综合考虑积水深度和积水面积等指标。

参考文献:

[1] 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.

[2] 黄国如,黄 晶,喻海军,等. 基于 GIS 的城市雨洪模型 SWMM 二次开发研究[J]. 水电能源科学,2011,29(4):43 – 45 + 195.

[3] 黄国如,张灵敏,雒 翠,等. SWMM 模型在深圳市民治河流域的应用[J]. 水电能源科学,2015,33(4):10 – 14.

[4] 刘 为. 基于 GIS 的城市暴雨积水模拟预测方法及应用研究[D]. 长沙:中南大学,2010.

[5] 石赟赟,万东辉,陈 黎,等. 基于 GIS 和 SWMM 的城市暴雨内涝淹没模拟分析[J]. 水电能源科学,2014,32(6):57 – 60 + 12.

[6] 陈晓燕,张 娜,吴芳芳,等. 雨洪管理模型 SWMM 的原理、参数和应用[J]. 中国给水排水,2013,29(4):4 – 7.

[7] 王祥,张行南,张文婷,等. 基于 SWMM 的城市雨水管网排水能力分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2011,33(1):5 – 8.

[8] 朱靖,刘 俊,崔 韩,等. SWMM 模型在西南地区山前平原城市防洪计算中的应用[J]. 水电能源科学,2013,31(12):38 – 41.

[9] Rossman L A. Storm water management model user's manual version 5.0[R]. Cincinnati:National Risk Management Research Laboratory,U. S. Environmental Protection Agency, 2008.