

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.02.012

基于 SWMM-MIKE11 耦合模型的桐庐县内涝风险评估

栾 慕¹,袁文秀²,刘 俊¹,周雁潭¹,库勒江·多斯江¹

(1.河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098; 2.江苏省水利工程规划办公室,江苏 南京 210029)

摘要:通过构建 SWMM-MIKE11 耦合模型评估现有管网系统排水能力,预测桐庐县遭遇 5 年、10 年、20 年一遇暴雨时的城市内涝情况并依此绘制内涝风险图。结果表明:桐庐县发生城市内涝的风险较高;SWMM-MIKE11 耦合模型在桐庐县具有良好的适用性,在城市内涝风险评估中具有应用价值。

关键词:SWMM 模型;MIKE11 模型;城市内涝;风险评估;桐庐县

中图分类号:TV122 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2016)02-0057-05

Risk assessment of waterlogging in Tonglu County based on SWMM-MIKE11 coupled model

LUAN Mu¹, YUAN Wenxiu², LIU Jun¹, ZHOU Yantan¹, Kulejiang Duosijiang¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Water Resources Planning Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China)

Abstract: This study was carried out in the urban area of Tonglu County. The SWMM-MIKE11 coupled model was established to assess the drainage capacity of the existing pipeline system, and the urban waterlogging in the cases of the storms that occurred every five years, ten years, and twenty years, respectively, was predicted. On this basis, waterlogging risk charts were drawn. The results show that there is a fairly high risk of waterlogging in Tonglu County, and the SWMM-MIKE11 coupled model has strong applicability in Tonglu County and can be used in urban waterlogging risk assessment.

Key words: SWMM model; MIKE11 model; urban waterlogging; risk assessment; Tonglu County

近年来,受全球气候变化的影响,暴雨等极端天气事件频发,对社会管理、城市运行和人民群众生产生活造成了巨大影响,加之部分城市排水防涝等基础设施建设滞后,调蓄雨洪和应急管理的能力不足,出现了严重的暴雨内涝灾害。桐庐县地处浙西丘陵区,位于富春江和分水江交汇处,同时面临着城市内部涝水、富春江江潮顶托和县城东南部山洪的三重威胁。针对桐庐县水安全特点,笔者采用 SWMM 水文模型和 MIKE11 水动力学模型,对桐庐县降雨产流、管网汇流与防洪排涝过程进行仿真模拟。依据研究区域内水系状况与下垫面特征确定各计算分区,再通过建立 SWMM 水文模型对各个分区逐一进

行降雨产流和管网汇流计算,最后依托 MIKE11 软件构建桐庐县一维河网模型,将各分区的管道出流过程作为一维河网模型的入流过程,使之成为一维河网模型的流量边界条件,实现降雨产流—管网汇流模型与河网水动力模型之间的耦合,从而模拟桐庐县降雨径流及防洪排涝情况,并且在对模拟结果进行分析的基础上绘制桐庐县内涝风险图。

1 SWMM-MIKE11 耦合模型

1.1 SWMM 水文模型

SWMM 水文模型是一个主要用于模拟城市化地区单次或连续降雨事件的降雨径流模型,它可以

基金项目:国家自然科学基金(41471015)

作者简介:栾慕(1990—),男,硕士研究生,研究方向为城市防洪排涝与水资源配置。E-mail:shepardluan@163.com

通信作者:刘俊,教授,博士生导师。E-mail:lj@hhu.edu.cn

模拟城市中水质和水量的变化。模型的模拟计算过程可分为地表产流、地表汇流以及排水管道流量演算 3 个部分,可用于排水管网系统的设计分析,并对其进行全面的仿真模拟。通过对城区排水管网、河道等进行概化,选定有关参数,即可对城市地区雨洪事件进行模拟和评价。该模型在北京、上海、天津等地区的应用都取得了较好的结果^[1]。

SWMM 水文模型由 5 个子模块组成,其中 1 个子模块为处理模块,其余 4 个子模块分别为径流模块、输送模块、扩充输送模块和储存/处理模块,它们可以分别实现对城市排水系统中地表坡面径流、排水管网系统输送和污染物质处理单元的仿真模拟^[2]。

1.2 MIKE11 水动力学模型

MIKE11 水动力学模型是以一维非恒定水流基本运动方程为基础建立起来的,即圣维南方程组。在计算方法上,MIKE11 软件采用六点隐式差分格式对圣维南方程组进行离散求解。在每个网格点并非同时求解水位和流量,而是按上下游顺序交替计算水位或流量^[3]。由于这种离散求解格式是无条件维持稳定的,因而可以把计算时间步长适当加长以节约计算运行时间。

1.3 耦合方式

将整个研究区域依照下垫面性质差异和不同的水文特征划分成多个子汇水区。以桐庐县水系布局为基础,通过 MIKE11 软件概化得到桐庐县一维河网模型,运用 SWMM 水文模型对各分区进行降雨产流和管网汇流计算,再将各分区的管道出流过程作为一维河网模型的入流过程,使之成为一维河网模型的流量上边界,从而实现降雨产流—管网汇流模型与一维河网水动力模型之间的耦合。

2 SWMM-MIKE11 耦合模型的建立和应用

2.1 研究区域概况

桐庐县位于浙江省西北部,地处钱塘江上游,东连浦江、诸暨,南接建德,西临淳安,北靠富阳与临安,属浙西中低山丘陵区。境内富春江自南而北纵贯县境东部,次第接纳较大的支流有芦茨溪、双源溪、清渚港等。由于近年来桐庐县城区范围不断扩大,城市化程度不断提高,加之山丘区河道流速较快,富春江亦是感潮河道,发生内涝、山洪、江潮“三碰头”的概率较大,城市受灾后果日益严重^[4]。因此有必要采用 SWMM—MIKE11 耦合模型针对该地区进行研究。

2.2 研究区域概化

2.2.1 子汇水区域概化

本次排水防涝模拟计算主要涉及桐庐县整个城区,根据桐庐县管网布局、土地利用、地形地貌,结合 GIS 软件提取相关信息,在尽可能满足地面径流就近入河的基础上进行子汇水区的划分^[5],将中心城区概化为 693 个子汇水区,总概化面积为 68 km²。

2.2.2 管网系统概化

根据相关资料,从已有 CAD 文件中提取出管网数据。综合考虑雨水管网集水范围和下垫面的具体情况,将研究区域的管网系统概化为 651 个节点,635 个管段^[6]。管道要素主要有空间位置、坡度、长度、流向、管径以及雨水口的地面高程等信息,这些重要信息可通过有关单位提供的资料输入到模型中^[7]。

2.2.3 河网概化

对天然河网需要进行概化以简化计算的复杂程度,其基本原则是概化河网要能够反映天然河网重要的水力学特性,使得概化河网、湖泊对水的输送、调蓄能力必须与现实中的河网、湖泊接近或一致。因此必须确定概化的河网及其控制断面参数,然后考虑除概化河网以外的水体的调蓄作用,最后将基本的河道信息输入河道水动力模型中。

运用 MIKE11 水动力模型进行河道模拟,需要构建 4 个必备文件:描绘河道空间分布的河网文件、描绘河道垂直断面形状的断面数据、给出计算边界的边界条件文件以及确定各项相关参数的模型参数文件。根据河网概化的基本原则和已有河道资料制作上述 4 个文件,从而完成对研究区域河网的概化。

2.3 主要参数选取

2.3.1 子汇水区参数

① 子汇水区域指由于地形和排水系统的各要素作用使得模型区域内地表径流向同一点汇集的水文单元。桐庐县子汇水区概化综合考虑雨水管道集水范围、下垫面土地类型和河网水系汇流等因素划分。② 不透水面积指直接排向雨水输送系统的不透水面积,对计算结果的影响较大。本次研究根据有关土地利用类型分布的资料,按面积加权法确定各子流域不透水面积比。③ 漫流宽度反映了子汇水区域调蓄能力的大小,敏感性较强,需要结合实际情况和经验确定。④ 洼蓄表示降雨初期未能产流的雨量。对于不透水区洼蓄取 1 mm,透水区洼蓄取 5 mm。⑤ 子流域不透水面积可分为无洼蓄和有洼蓄的两类,本次研究的无洼蓄不透水面积百分比按经验采用 25%。⑥ 根据文献[8]并结合国内实践经验,不透水区糙率取 0.015;透水区糙率取 0.2。

⑦子流域坡度依照桐庐县中心城区实际地形取值。

2.3.2 Horton 下渗公式参数

Horton 下渗公式主要参数包括最大下渗率、最小下渗率及衰减系数。最大下渗率取决于土壤类型、覆盖植被和土壤含水量。根据桐庐县土壤类型及模型用户手册,最大下渗率裸土取 25.4 mm/h、覆盖草皮的取 50.8 mm/h。稳定下渗率则根据桐庐县土壤条件,取 2.54 mm/h。Horton 曲线下渗速率衰减系数表征了饱和土壤到完全干燥土壤需要的时间,通常情况下,典型时间为 2 ~ 14 d,根据经验取 7 d,得衰减系数为 $3\text{ h}^{-1[9]}$ 。

2.3.3 节点参数

节点参数的选择可分为两类,一类是普通节点如管道节点,其底高程是以实际测量值为准,部分中间点通过线性内插获得。最大深度为节点底部至地面的高度。另一类是排水口。排水口是排水管网系统的终端节点,是动力波径流方程演算的下游边界,对于 SWMM 水文模型而言,只能有一个管线直接连接到排水口,动力波演算模式下必须有一个以上的排水口。

2.3.4 管网与河网参数

管道首节点、末节点、长度、断面和偏移量按照管网资料设置。管道糙率依据相关资料取 0.013,排洪沟及排水箱涵糙率取 0.03。管道形状为密闭圆形。

考虑到各河道岸壁为防洪墙,且为宽度基本相等的规则河道,故河道糙率应适当降低,因此河道糙率取 0.02。河道横断面采用实测成果,直接输入 MIKE11 水动力学模型中。

2.4 计算工况

2.4.1 设计暴雨

肖岭站属于国家基本站,观测资料较为可靠,因此选用肖岭站作为桐庐县雨量代表站来计算 24 h 设计暴雨。设计暴雨所采用的降雨资料系列较长(1961—2009 年),资料的的代表性及稳定性均比较好,符合本区域的暴雨分布规律,计算成果基本合理,能够体现桐庐县的实际情况。5 年、10 年、20 年一遇的 24 h 设计暴雨量分别为 148 mm、196 mm、243 mm。

根据暴雨分析并参考本流域及相近流域有关资料^[10],对 24 h 设计暴雨量进行时程分配,如图 1 所示。

2.4.2 上下游边界条件

本次计算涉及桐庐县境内富春南渠、西桥头溪、新乔林溪、梅林溪、黄潦溪、大源溪,其中西桥头溪、新乔林溪为防山洪河道,不参与排水计算。黄潦溪、梅林溪上游流入边界采用与城区统一的设计暴雨进行产汇流计算,计算得出的设计洪水作为中心城区

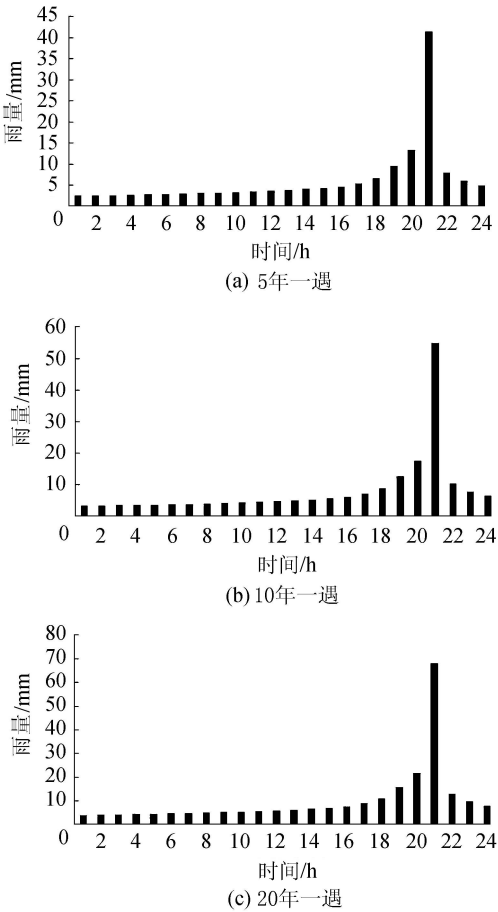


图 1 设计暴雨时程分配

排水防涝模拟计算的上游流入边界条件,下游排放口设计洪水位采用富春江潮位边界控制。富春南渠西入口和东出口以有关资料规定的入口和出口流量为控制。中心城区暴雨径流采用 SWMM 水文模型演算后通过排水管网排入河网中,再由 MIKE11 水动力学模型进行计算。

3 计算结果与分析

3.1 管网排水能力校核

由于城市的发展使径流量增大、径流汇流时间减少、高峰径流量增大,长期沿用至今的排水管网计算方法没有考虑城市化引起的水文变化;且市政管网是分片区设计的,没有考虑到管网排水之间的相互影响以及排水分区之间的关系,有必要使用水利模型计算管道的实际排水能力。与此同时,对比计算结果与当地实际内涝情况,也可以对所建立的耦合模型进行率定。

根据文献[11]的规定,中等城市和小城市的雨水管渠设计重现期,中心城区和非中心城区均为 2 ~ 3 a,中心城区的重要地区为 3 ~ 5 a,中心城区地下通道和下沉式广场等为 10 ~ 20 a。依据要求,利用模型计算模拟了管网排水能力。结果表明,管道实

际排水能力大于等于1年一遇的管道占管道总长度的55.8%,比管道设计标准百分比低25.08%,出现积水的地区基本与实际情况相符。

3.2 内涝风险评估

内涝风险评估是内涝防治的依据,为有效进行内涝风险管理,需要了解洪涝灾害的影响范围和程度,即绘制内涝风险分布图。内涝风险评估内容包含城市地面积水的地点、积水深度、积水时间、内涝开始时间、内涝持续时间、内涝检查井最大深度、管

段流量峰值等评估指标。在城市内涝研究中一般使用城市地面积水的地点和内涝积水深度对内涝灾害进行评估。

根据桐庐县土地利用条件和排水管网,由设计暴雨过程、相应的上游边界流量过程,下游河口边界水文条件,利用模型模拟5年一遇、10年一遇、20年一遇3种不同降雨重现期,并以模拟结果为基础绘制桐庐县中心城区内涝风险图,如图2~4所示。

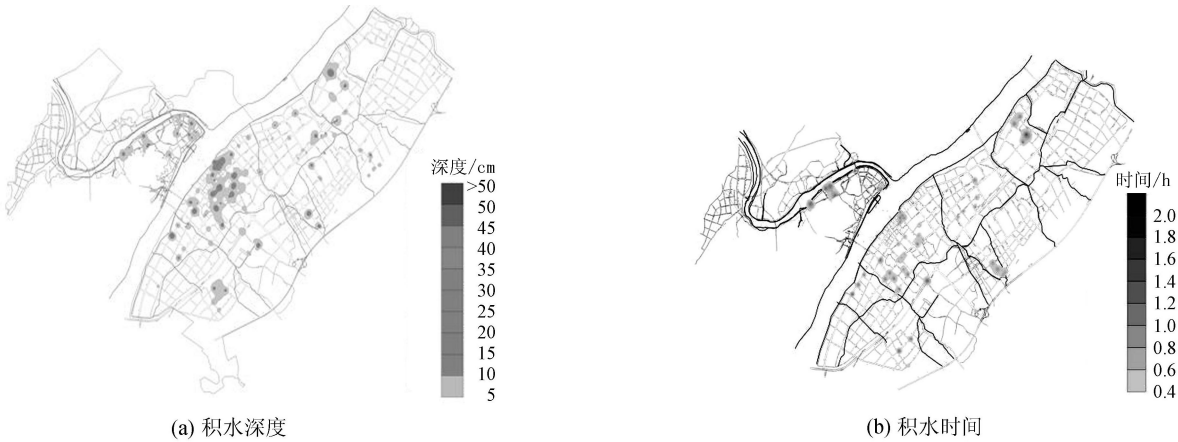


图2 5年一遇情况下的积水深度与积水时间分布

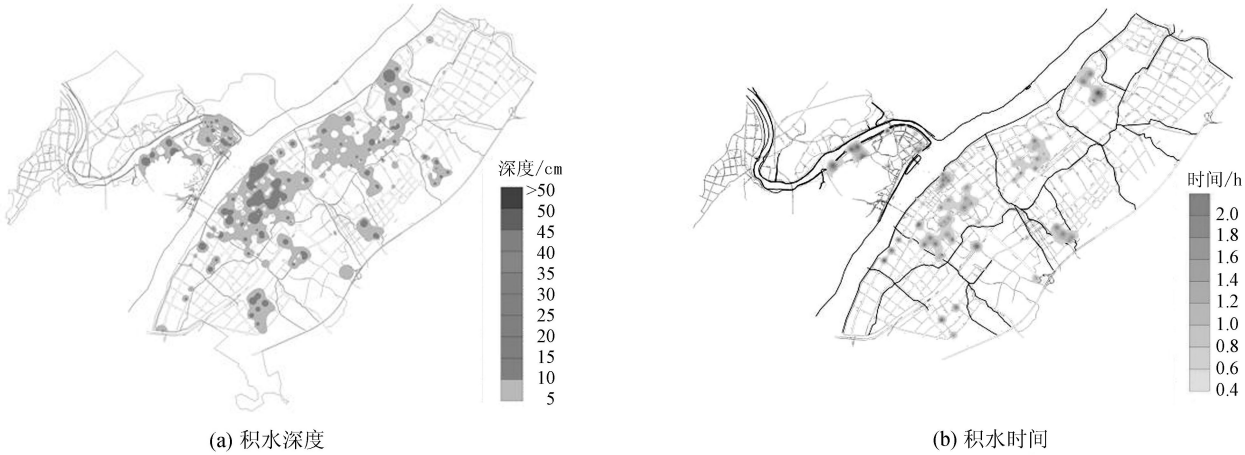


图3 10年一遇情况下的积水深度与积水时间分布

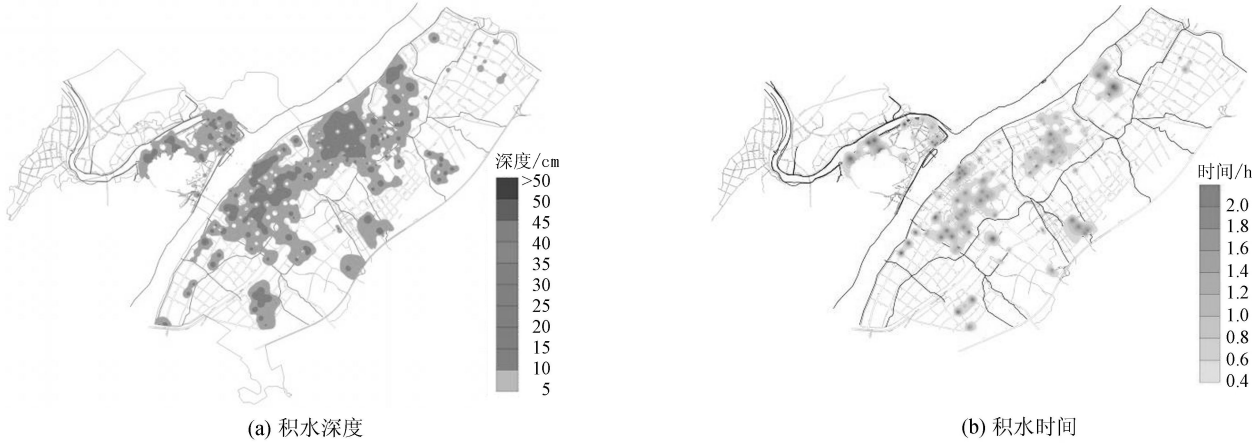


图4 20年一遇情况下的积水深度与积水时间分布

由图 2~4 可知,随着暴雨重现期的增大,城市内涝的积水面积不断扩大,积水深度、积水时间也在增加。内涝地区主要集中在迎春小区、康乐小区、渔民村、城北综合市场、岩桥村、仁智村等地。

在 20 年一遇设计暴雨情况下,上述部分内涝地区积水深度较深,远大于 15 cm,有些地势较低处积水深度甚至超过了 50 cm,且积水面积较大,积水时间较长,无法满足桐庐县内涝防治目标。

结合计算结果与当地实际情况进行分析,造成这种现象的主要原因是:

a. 早期设计的雨水管网排水标准较低。部分新建区的雨、污水就近排入旧城区排水管网,加大了旧城区排水管网负荷,造成旧城区管道排水能力不足,内涝受淹。

b. 管道铺设不合理。部分上游管道的直径大于下游管道。在降雨重现期较低时,对管道排水影响不大。但是在遭遇高重现期的降水时,由于下游管道直径偏小,排水能力受限,致使上游管道排水不畅,产生管道超载或漫溢。

c. 河水倒灌的影响。雨水通过管道就近自流排入河道,如果管道出口管底高程低于水位,受水体水位顶托,使管道内水流流速减小,管道排水能力降低,导致城区低洼地段长时间积水。

d. 下游管渠未完全修建,雨水出水口系统不完善。由于路网建设先后不一,部分雨水排放系统下游排放口未能同期建成,雨水出水口系统不完善。

e. 部分地区地势低洼。个别低洼地区现状没有管道,或者是现状低洼区排洪沟尺寸较小,一降雨就产生积水。一些有管道的低洼地区,因可能承受周边地区的汇水而加大了排水压力,超过了管道的排水能力,因而产生积水。

4 结 论

a. 桐庐县城区管道实际排水能力大于等于 1 年一遇的管道占管道总长度的比例不高,现有管网排水能力明显不足。

b. 随着暴雨重现期的逐步增大,城市内涝的积水面积也不断扩大,积水深度与时长也在增加。特别地,在 20 年一遇设计暴雨情况下,部分内涝地区积水深度远大于 15 cm,且积水面积大、积水时间长,对桐庐县造成了较为严重的内涝威胁。

c. 本文计算结果较为合理可靠,说明本文采用的 SWMM-MIKE11 耦合模型对城市地区开展防洪排涝工作具有一定的应用价值。

参考文献:

[1] 刘俊. 城市雨洪模型研究[J]. 河海大学学报,1997,25

(6):20-24. (LIU Jun. Study on urban storm water model [J]. Journal of Hohai University,1997,25(6):20-24. (in Chinese))

[2] 刘俊,郭亮辉,张建涛,等. 基于 SWMM 模拟上海市区排水及地面淹水过程[J]. 中国给水排水,2006,22(21):64-66. (LIU Jun, GUO Lianghui, ZHANG Jiantao, et al. Study on simulation of drainage and flooding in urban areas of Shanghai based on improved SWMM [J]. China Water and Wastewater,2006,22(21):64-66. (in Chinese))

[3] 罗福亮,元媛,范剑斌. SWMM 和 MIKE11 耦合模型在城市感潮河网中的应用[J]. 中国农村水利水电,2013(3):98-102. (LUO Fuliang, YUAN Yuan, FAN Jianbin. Application of SWMM and MIKE11 coupled model in urban tidal river network [J]. China Rural Water and Hydropower,2013(3):98-102. (in Chinese))

[4] 程晓陶. 城市型水灾害及其综合治水方略[J]. 灾害学,2010,25(增刊1):10-15. (CHENG Xiaotao. Urban water disaster and strategy of comprehensive control of water disaster [J]. Journal of Catastrophology,2010,25(Sup1):10-15. (in Chinese))

[5] 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. (ZHU Jing, LIU Jun, Cui Han, et al. Application of SWMM model in urban flood control calculation of city built in piedmont plain of Southwest China [J]. Water Resources and Power,2013,31(12):38-41. (in Chinese))

[6] 张彬,戴贤波,徐向阳,等. SWMM 模型在感潮河网城市排水防涝计算中的应用[J]. 水电能源科学,2014,32(10):56-59. (ZHANG Bin, DAI Xianbo, XU Xiangyang, et al. Application of SWMM model in urban drainage and flood control calculation of tidal river network [J]. Water Resources and Power, 2014, 32 (10): 56-59. (in Chinese))

[7] 丛翔宇,倪广恒,惠士博,等. 基于 SWMM 的北京市典型城区暴雨洪水模拟分析[J]. 水利水电技术,2006,37(4):64-67. (CONG Xiangyu, NI Guangheng, HUI Shibo, et al. Simulative analysis on storm flood in typical urban region of Beijing based on SWMM [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 37 (4): 64-67. (in Chinese))

[8] ROSSMAN L A. Storm water management model user's manual (version5.0) [M]. Washington D C, US: EPA, 2009.

[9] 黄金良,杜鹏飞,何万谦,等. 城市降雨径流模型的参数局部灵敏度分析[J]. 中国环境科学,2007,27(4):549-553. (HUANG Jinliang, DU Pengfei, HE Wanqian, et al. Local sensitivity analysis for urban rainfall runoff modelling [J]. China Environmental Science, 2007, 27 (4): 549-553. (in Chinese))

[10] 张磊. 平原感潮河网区城市防洪规划中的水文计算方法研究[D]. 南京:河海大学,2005.

[11] GB50014—2006 室外排水设计规范 [S].

(收稿日期:2015-12-28 编辑:徐 娟)