DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2014.05.037

# 基于 SWMM 的南京市内秦淮河中段 管网排水能力分析

薛偲琦<sup>1</sup>,张瑛<sup>2</sup>,李一平<sup>1</sup>,郝文彬<sup>3</sup>,邱利<sup>1</sup> (1.河海大学环境学院,江苏南京 210098; 2.苏州德华生态环境科技有限公司, 江苏 苏州 215000; 3.广东省环境科学研究院,广东 广州 510000)

**摘 要:**选取暴雨重现期 T 为1、2、10 a 3 种典型年作为降雨条件,应用 SWMM 模型对南京市内秦淮河中段区域内 的管网排水能力进行分析。模拟结果显示: T = 1 a 的暴雨条件下,研究区域内已有 54% 的检查井和 38% 的管道超 载运行;在 3 种典型暴雨强度下,检查井和管道发生超载的时间基本都在降雨后 2.5 h;随着暴雨强度的增加,超载 运行的检查井和管道数未明显增加,但超载时明显延长。以上结果表明随着南京市城市化的加快,城市内不渗水 面积增大,研究范围内管网排水能力无法满足现排水要求。该模拟结果可为城市的雨水管网改造提供依据。 关键词: SWMM;设计暴雨; 排水管网; 排水能力; 南京秦淮河

### 中图分类号:S276.5 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2014)05-0169-05

## Analysis of drainage capacity of midway network in Qinhuai river of Nanjing based on SWMM

XUE Siqi<sup>1</sup>, ZHANG Ying<sup>2</sup>, LI Yiping<sup>1</sup>, HAO Wenbin<sup>3</sup>, QIU Li<sup>1</sup>

College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Suzhou Edward Ecological Environment Technology
 Ltd, Suzhou 215000, China; 3. Guangdong Provincial Academy of Environmental Sciences; Guangzhou 510000, China)

Abstract: Three kinds of design rainstorm return period of T being 1, 2, 10 years are chosen as the typical year to assess the drainage capacity of the study area by storm water management model (SWMM). The final result shows that 54% manholes and 38% conduits cannot meet requirements when the design rainstorm return period is one year. In the three typical storm intensity, manholes and pipes overload occurs basically in 2. 5h after the rain. With the increase of storm intensity, the number of running overload manholes and pipes don't significantly increase, but the time of overload significantly prolonge. Therefore, with the speeding up of Nanjing urbanization and the increase of water seepage area, the drainage capacity in the study area can not meet the requirement. The simulation results can provide a technical support for reconstruction of drainage system.

Key words: SWMM; design rainstorm; drainage network; Nanjing Qinhuai River

排水管网是城市不可缺少的重要基础设施,城 市排水管网实际排水能力对城市排涝、排渍、防洪起 着重要作用。近些年,城市化进展伴随不渗水面积 增加,增大了城市排水管网的排水负荷,导致部分排 水管网不能满足现状需求,从而造成城市洪涝灾害。 针对这一问题,很多城市进行了排水管网的重新设 计和改造,以便能满足城市的排水需求<sup>[1]</sup>,达到防 洪排涝的目的。在我国,长期延用等流时线法、单位 线法等对城市雨洪进行预测分析。但这些方法通常 要求水文资料充足、设计条件较简单且多运用在汇 流面积较小的区域。此外,这些方法存在会增大洪 峰流量、缩短洪峰流量产生时间、无法模拟流量过程 和不能模拟城市管网系统等问题<sup>[2-3]</sup>。目前,美国、 伊朗、韩国等国家已经开始运用 SWMM(Storm Water Management Model 暴雨洪水管理模型)模拟城市 降雨径流过程<sup>[3-4]</sup>。SWMM 由美国环境保护局开 发,模拟动态降雨—径流的模型,该模型不仅可以模 拟城市降雨径流,还能模拟城市排水管网系统。在

收稿日期:2014-03-17; 修回日期:2014-07-13

基金项目:霍英东教育基金(141073)

作者简介:薛偲琦(1991-),女,江西鹰潭人,在读硕士研究生,从事水资源规划及水环境数学模型的研究。

我国天津、上海、北京等地区有过应用<sup>[5-7]</sup>。本文选 择南京市内秦淮河中段区域作为研究范围,运用 SWMM模型,对该区域的管网系统在不同设计暴雨 条件下的排水能力进行模拟分析,为南京市城区防 洪排涝提供技术支持。

### 1 研究区域概况

南京市位于长江下游中部富庶地区,地貌特征 属宁镇扬丘陵地区,以低山缓岗为主,低山占土地总 面积的3.5%,丘陵占4.3%,岗地占53%,平原、洼 地及河流湖泊占土地总面积的39.2%。南京属北 亚热带湿润气候,四季分明,雨水充沛。常年平均降 雨117 d,平均降雨量1106.5 mm,每年6月下旬到7 月上旬为梅雨季节。内秦淮河中段在南京市西北方 向,东起桃叶渡,西至铁窗棂泵站,长约2.9 km,规 划汇水面积4.51 km<sup>2</sup>。全河段处于建邺、秦淮两 区,沿河道两侧居民小区较多,朝天宫、桃叶渡等历 史古迹也紧邻河道两侧。20世纪90年代经疏浚整 治后,设计流量为26.2 m<sup>3</sup>/s,上口宽度10~20 m, 河底高程为4.0~4.3 m(吴淞高程)。目前沿线仍 维持原有的截流式合流制排水系统的溢流口。

### 2 SWMM 模型原理

#### 2.1 子流域的概化

在 SWMM 中,一般将一个流域划分成若干个子 流域,根据各子流域的特性分别计算其径流过程,并 通过流量演算方法将各子流域的出流组合起来。

### 2.2 SWMM 模型的建立

SWMM 模型包括坡面汇流、边沟汇流、干管汇 流和出流排水等部分,整个演算过程可分为地表产 流子系统演算、地表汇流子系统演算和传输子系统 流量演算。

①地表产流计算。由子流概化图可知,产流由 3 部分组成:对于不透水面积 S3 上的产流等于其上 的降雨量;对于带有蓄水的不透水面积上的产流等 于其上的降雨量减去初损即填洼量;对于透水面积 S1 上的产流不仅要扣除填洼量,还要扣除下渗引起 的初损失。SWMM 提供了霍顿(Horton)模型、格林 -安普特(Green - Ampt)模型和 SCS 模型 3 种方法 计算下渗量。Green - Ampt 模式侧重要求土壤资料 详细,SCS 模式适用于大流域因只反映流域下垫面 状况不反映降雨过程,Horton 模式可较好模拟城市 小流域降雨径流,因此本文采用 Horton 模式<sup>[1]</sup>。 Horton 模式采用了修正非线性运动波近似,使用了 连续方程(1)曼宁公式(2)

 $\partial A/\partial t + \partial Q/\partial x = 0 \tag{1}$ 

$$Q = \frac{K}{n} S^{1/2} A R^{2/3}$$
(2)

式中: $\partial A/\partial t$ 为在控制单元体中的水体体积变化项;  $\partial Q/\partial x$ 为进出控制单元体的流量变化项;Q为流量, m<sup>3</sup>/s;K为转换常数;S为阻力坡度;A为过水断面 面积,m<sup>2</sup>;R为水力半径,m;n为曼宁粗糙系数。

② 地表汇流子系统演算。地表汇流演算是通过 把概化子流域的3个部分近似作为非线性水库而实 现的,即联立求解曼宁公式和连续方程。

连续方程:
$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} = S \frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t} = S \cdot i' - Q$$
 (3)

曼宁方程:
$$Q = L \frac{1.49}{n} (h - h_p)^{5/3} S_0^{1/2}$$
 (4)

式中: $V = S \cdot h$  为地表集水量,m<sup>3</sup>; h 为水深,m; t 为 时间,s; S 为地表面积,m<sup>2</sup>; i' 为净雨强度,m/s; Q为出流量,m<sup>3</sup>/s; L 为子流域宽度,m; n 为曼宁糙率 系数,s/m<sup>1/3</sup>;  $h_p$  为地面蓄水深,m;  $S_0$  为子流域坡 度。

对方程(3)、(4)用有限差分法求解,以下标1 和2分别表示一个时段(Δt)水深的初始值和终值。 方程合并变成为:

$$\frac{h_2 - h_1}{\Delta t} = i' + \frac{1.49L}{S \cdot n} [h_1 - \frac{1}{2}(h_2 - h_1) - h_p]^{5/3}(5)$$

方程(5) 可采用 Newton – Raphson 迭代法求 解,得到  $h_2$ ,从而得到  $\Delta t$  末的瞬时出流量。计算不透 水面积的产流量时,只要改变上述  $h_p$  的值。

③管网汇流子系统演算。管网汇流子系统演算 在 SWMM 模型中可以通过输送模块或扩展的输送 模块来演算。采用对圣维南方程组求解。

$$\partial A/\partial t + \partial Q/\partial x = q \tag{6}$$

 $v/g \cdot \partial v/\partial x + 1/g \cdot \partial v/\partial t + \partial h/\partial x + S_f - S_0 = 0$  (7) 式中:Q 为流量,m<sup>3</sup>/s; A 为过水断面面积,m<sup>2</sup>; v 为 管内流速,m/s; h 为管内水深,m; t 为时间,s; x 为 距离,m;  $S_f$  为摩阻坡度;  $S_0$  为底坡; q 为单位长度 旁侧入流量,m<sup>3</sup>/s。

对于港区雨水管道只有节点入流而无旁侧入流, 则 q = 0。式(6) 第一、二项为惯性项时,第三项为压力 项,当忽略惯性项和压力项时,得到运动波方程:

 $\partial A/\partial t + \partial Q/\partial x = 1/C \cdot \partial Q/\partial t + \partial Q/\partial x = 0$  (8)

 $S_f - S_0 = 0; \quad C = \partial Q / \partial A \tag{9}$ 

对式(6)采用四点空间和时间偏心加权差分

格式进行求解。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\xi (Q_i^{j+1} - Q_i^j) + (1 - \xi) (Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^j)}{\Delta t} \quad (10)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\zeta (Q_i^{j+1} - Q_i^j) + (1 - \zeta) (Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^j)}{\Delta x}$$
(11)

将式(8) 和(9) 代人式(6) 得:  

$$\frac{1}{C} \frac{\xi(Q_i^{j+1} - Q_i^j) + (1 - \xi)(Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^j)}{\Delta t} + \frac{\zeta(Q_i^{j+1} - Q_i^j) + (1 - \zeta)(Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^j)}{\Delta x}$$
(12)

式中: *ξ* 和 *ζ* 为时间和空间差分的权重: *ξ*% (0, 0.5), *ζ*% (0.5, 1), *i*, *j* 分别为空间和时间的格点 号。求解上式方程时,还要有一个初始条件和一个边 界条件,初始条件可以为稳定的基流,若无基流,为 保证计算稳定,可假设最大流量的5% 作为基流,边 界条件一般为入流流量过程线。

④排水系统流量演算。在 SWMM 中,主要是通 过输送模块和扩展输送模块来进行排水系统的演 算,即是通过求解圣维南方程组得出。

### 3 研究区域模型的构建

#### 3.1 雨水资料选取

SWMM 模型最终结果精确与否与降雨资料的 选取有很大关系。不同地区的降雨类型随气候的差 异而变化,降雨规律曲线都是根据大量统计分析总 结出来的。我国很多地区现已提出了适合各个地区 的暴雨强度公式。通过查阅相关资料,根据南京气 象研究院提出的南京地区暴雨强度公式,选取研究 区域的暴雨强度公式为:

q = 2989.3(1 + lgP)/(t + 13.3)<sup>0.8</sup> (13) 式中: q 为平均暴雨强度,L/(S・hm<sup>2</sup>); P 为设计降 雨重现期,a; t 为降雨历时,min。

选择3种典型年T为1、2、10 a,为设计暴雨重 现期,降雨历时为2h条件下计算研究区平均暴雨 强度。模型模拟时间为24h。

#### 3.2 子汇水区域的划分

首先根据研究区域的排水管道平面图和地形图 进行子汇水区域的划分:排水区汇水就近进入管网 的节点,雨水管网末端的排放口内底标高均大于河 道水位。此外,为了使子汇水区域的划分能更好模 拟研究区域实际情况,本文还运用 ArcGis 的水文分 析(Hydrological Analysis)模块对汇水区进行划分并 结合土地利用图对初始划分的子汇水区域进行调 整。子汇水流域最终划分成果见图1。



图 1 研究区域子汇水流域划分图

#### 3.3 模型参数确定<sup>[8-12]</sup>

排水管网能力的模拟计算主要涉及到 SWMM 模型中的径流及传输模块。表1列出了模型地表径 流模块和传输模块中的主要参数<sup>[8]</sup>。其中,对于表 中通过"实验或经验"得到的参数,可查阅模型使用 手册得到相关参数经验值;其他参数均可通过 Arc-Gis 中的统计模块确定。

表1 SWMM 地表径流模块和传输模块的主要参数

模块	参数	来源	
地表径流	区档型却	实际测量	
	区域面积	ArcGis、RS 辅助工具	
	区墙石压水州玄粉	实际测量	
	区域不超小住示奴	ArcGis、RS 辅助工具	
	区域坡度	辅助工具	
	区域宽度	计算或者经验	
	透水性区域的可积水深度	实验或经验	
	透水性区域的曼宁系数	实验或经验	
	不透水性区域的可积水深度	实验或经验	
	不透水性区域的曼宁系数	实验或经验	
	人渗系数	实验或经验	
传输	管道长度	实际测量	
	管道坡度	实际测量或计算	
	管道的曼宁系数	经验值	
	管道形状	实际测量	
	管道最大深度实际	测量或者经验值	
	管道人口损失系数	经验值	
	管道出口损失系数	经验值	
	管道平均损失系数	经验值	

### 4 结果与讨论

#### 4.1 不同设计暴雨条件下溢流分析

研究区域共有76个检查井,每个检查井都对应 有过顶最大高度。当检查井水深超过其过顶最大高 度时,检查井即会发生溢流造成路面积水。故检查 井水深可反应管网排水能力。根据模拟结果,可以 得到在不同设计暴雨条件下,发生溢流的检查井和 其溢流持续时间。在设计暴雨重现期 T 为 1、2 和 10 a条件下,分别有54%、55%、55%的检查井发生溢 流。表2是检查井节点溢流持续时间分布区间表。

由表2可知,随着设计暴雨强度增大,发生溢流 的检查井个数未显著增多,但检查井溢流时间分布 变化较明显。仅有检查井 J261 开始未发生溢流随 着暴雨强度增大开始出现溢流现象;其他溢流检查 井溢流时间随暴雨强度增大逐渐延长或是显著延 长。图 2~4 为检查井 J261、J292 和 J400 分别在设





T=2 a 节点深度

图 3 检查井 J261、J292 和 J400 在 T = 2 a 条件下水深时间序列图

由图可知.3个检查井在3种不同降雨条件下. 达到检查井最大水深的时间基本相同。检查井 J261 在重现期 T = 1 a 的设计暴雨条件下,未发生溢流。 当重现期为T = 2 a 时,开始出现溢流且持续时间约 为0.5 h,当重现期时间增至 T = 10 a 时,检查井 J261 溢流时间约为1h。检查井 J400 在重现期 T = 1 a 的 设计暴雨条件下,即发生溢流。但随着暴雨强度增 大,J400 溢流持续时间延长不明显,仅从 0.4 h 增至 1.3 h。检查井 J292 过顶最大高度为 0.8 m, 小于 J261 和 J400,故 J292 溢流时间相对较长。在重现期 T = 1 a 的设计暴雨条件下溢流时间即约为2 h.当重 现期为2a和10a的时候分别达到3h和5h。

#### 4.2 管道负载能力分析

管道中水流在满流状态称为管道满流即管网超 载状态。管道中的水流状态即能反应管道的负载能 力,通过分析管网中的水流状态能更进一步了解研 究区域内管网的排水能力。研究区域内共有71个 管道,设计暴雨重现期 T 为1、2 和 10 a 条件下管道 超载率分别为38%、39%、39%。表3是管道超载 时间分布区间表。

由表3可知,设计暴雨重现期从1a增至10a 时,超载管道总数只增加了一个。设计暴雨重现期 T = 1 a 和 T = 2 a 条件下, 超载管道时间分布变化不大。当设计暴雨重现期为T = 10 a 时,多数超载 管道的超载时间开始明显延长。图 5~7 为管道 GD49、管道 GD142 和管道 GD145 分别在设计暴雨 重现期 T = 1 a、T = 2 a 和 T = 10 a 的条件下,管道

计暴雨重现期 T 为1、2 和 10 a 的条件下,水深随时 间变化曲线图。

不同设计暴雨条件检查井溢流时间分布区间表 表 2

T∕a	t = 0			t > 12	溢流检查
		$l \equiv 0h$	$0 \leq l \leq 12$	$l \ge 12$	井总数
1	35	23	5	13	41
2	34	24	3	15	42
10	34	16	11	15	42





流量随时间变化曲线图。

表 3 不同设计暴雨条件管道超载时间分布区间表 个

Т	t = 0	$t \leq 6h$	$6 \leq t \leq 12$	$t \ge 12$	超载管
					道总数
1	44	18	3	6	27
2	43	19	2	7	28
10	43	13	4	11	28

根据模型最终的模拟报告并结合上图可知,管 道 GD49 在设计暴雨重现期 T =1 a 的条件下未超 载;在T=2a的条件下,满流现象不明显,超载时间 仅为0.44 h;当重现期增至10 a 时,GD49 满流状态 较明显,可看出满流流量约为0.42 m<sup>3</sup>/s。GD145 可 达满流流量较大,故其超载时间较短,在设计暴雨重 现期 T = 10 a 的条件下, 超载时间仅为 1.34 h。 GD142 在设计暴雨重现期 T = 1 a 的条件下即发生 满流超载,超载时间已达到 4.2 h;当 T 为 2 和 10 a 的时候,超载时间分别达到 5.54 h 和 7.58 h,超载 时间明显延长。

#### 4.3 子汇水区积水量分析

子汇水区的积水量与检查井的溢流量有关。模 拟结果中的检查井洪流即是检查井溢流的所有水 流。故通过分析模拟结果中溢流检查井的洪流曲 线,可大致估算出检查井的溢流量。将子汇水区所 发生洪流检查井的洪流量相加,即可大致估算子汇 水区的积水量。图 8~10 为研究区域内某一子汇水 区所有发生溢流的检查井的洪流时间序列图。



由图可看出,检查井 J307 和检查井 J308 洪流 随暴雨强度增大未发生明显变化。检查井 J307 洪 流变化明显。3 条曲线与 X 轴围成面积之和即为该 子汇水区积水量。

### 5 结 语

本文根据南京市 45 a 的实测降雨资料并结合 P - III 曲线,选择模拟研究区内设计暴雨重现期 T 为 1、2 及 10 a 3 种典型年条件下管网的排水能力。模拟 结果显示,随着南京市近几年城市化的加快,城市内 不渗水面积增大,下渗条件发生改变,增大了南京市 排水管网负荷,导致研究区域内 58% 的检查井节点 和 38% 的管道的排水能力不能达到现状降雨条件的 要求。这些在设计暴雨重现期 T = 1a 的条件下发生 溢流和满流超载的检查井和管道需要重新设计和改 造。此外,在设计暴雨重现期 T = 2 a 和 T = 10 a 的 条件下,溢流检查井和满流超载管道个数相对重现期 T = 1 a 均只增加了一个。说明在研究区域排水系统 收集雨水的能力并未合理分配,应对研究区域各检查 井和管道的分布合理设计规划。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘 俊,徐向阳.城市雨洪模型在天津市区排水分析计算中的应用[J].海河水利,2001,(1):9-11.
- [3] Jang S, Cho M, Yoon J, et al. Using SWMM as a tool for hydrologic impact assessment [J]. Desalination, 2007,212

(1):344-356.

- [4] Sharifan R A, Roshan A, Aflatoni M, et al. Uncertainty and sensitivity analysis of SWMM model in computation of manhole water depth and subcatchment peak flood[J]. Procedia – Social and Behavioral Sciences, 2010,2(6):7739 – 7740.
- [5] 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+70.
- [6] 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.
- [7] Ouyang Wei, Guo Bobo, Hao Fanghua, et al. Modeling urban storm rainfall runoff from diverse underlying surfaces and application for control design in Beijing[J]. Journal of environmental management, 2012, 113: 467-473.
- [8] 张胜杰,宫永伟,李俊奇.暴雨管理模型 SWMM 水文参数的敏感性分析案例研究[J].北京建筑工程学院学报, 2012,28(1):45-48.
- [9] 孙艳伟,把多铎,王文川,等. SWMM 模型径流参数全局 灵敏度分析[J]. 农业机械学报,2012,43(7):42-49.
- [10] 董 欣,杜鹏飞,李志一,等. SWMM 模型在城市不透水 区地表径流模拟中的参数识别与验证[J].环境科学, 2008,29(6):1495-1501.
- [11] Zaghloul N A, Abu M A. Neural network solution of inverse parameters used in the sensitivity – calibration analyses of the SWMM model simulations [J]. Advances in Engineering Software, 2001, 32(7):587 – 595.
- [12] Park S Y, Lee K W, Park I H, et al. Effect of the aggregation level of surface runoff fields and sewer network for a SWMM simulation [J]. Desalination, 2008, 226(1): 328 - 337.