

镇江市主城区排水管网计算机建模方法

刘兴坡^{1,2}, 刘遂庆², 李树平², 胡坚³, 喻一萍³

(1. 上海海事大学 海洋环境与安全工程学院, 上海 200135; 2. 同济大学 环境科学与工程
学院, 上海 200092; 3. 镇江市给排水管理处, 江苏 镇江 212002)

摘要: 为了预防道路积水等城市型水灾害, 基于暴雨雨水管理模型(SWMM)平台建立了镇江市主城区排水管网计算机模拟模型。结合建模实践, 对排水管网计算机实用建模方法进行了探讨, 可分为汇水子区域划分、参数获取、模拟情境设计、灵敏度分析及模型预校准等步骤, 为后续
的模型微观校准提供了有利条件。该方法对现阶段建模数据不完备地区的排水管网建模具有借鉴
意义。

关键词: 排水管网; 建模方法; 暴雨雨水管理模型; 汇水子区域划分

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2007)11-0042-05

Computer Modeling Method for Drainage Networks in Central Zone of Zhenjiang City

LIU Xing-po^{1,2}, LIU Sui-qing², LI Shu-ping², HU Jian³, YU Yi-ping³

(1. College of Ocean Environment and Security Engineering, Shanghai Maritime University,
Shanghai 200135, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Tongji
University, Shanghai 200092, China; 3. Department of Water Supply and Drainage of
Zhenjiang City, Zhenjiang 212002, China)

Abstract: In order to prevent urban water-related disasters such as road waterlogging, computer simulation model for drainage networks in the central zone of Zhenjiang City was constructed based on the storm water management model (SWMM) platform. Combining the modeling practice, the practical computer modeling method for the drainage networks was discussed. The method consists of sub-catchment delineation, model parameter determination, simulation scenario design, sensitivity analysis, macro-level calibration and so on. It is propitious to the later model micro-level calibration and provides referential basis for modeling the present drainage networks with data scarcity.

Key words: drainage networks; modeling method; storm water management model; sub-catchment delineation

镇江市地处长江下游南岸与大运河的交汇处, 属于“一水横陈, 三面连岗”的河谷盆地地形, 特殊的地理位置和城市格局使得城区排水不畅, 部分城区积水、淹水严重。应用改进的暴雨雨水管理模型

(SWMM)平台建立的镇江市主城区排水管网计算机模型可以解决很多问题: 评价排水管网系统运行性能; 识别特定降雨条件下排水系统的瓶颈; 为改扩建策略及应急预案优化提供分析平台; 预防城区道

路积水等城市型水灾害。笔者结合建模实践,主要对建模数据相对不完备的排水管网建模过程及方法进行了探讨,以期现阶段我国其他城市实施排水管网建模提供参考依据。

1 建模区域概况

建模区域位于镇江市中心城区,面积约为 366 hm^2 ,包括 YH-1、YH-2 和 YH-3 三个排水流域(如图 1 所示),其中 YH-1、YH-2 区域以合流制为主,YH-3 区域则以分流制为主。建模区域属于古运河流域,分流制雨水排放口分布在古运河两岸,直接排入古运河,而合流污水则进入古运河两岸敷设的污水截流系统。



图 1 建模区域图

Fig. 1 Map of modeling area

2 建模过程及方法

建立排水管网模型旨在确定模型的结构与参数。每个排水管网模型软件一般都提供了一种或几种模型结构。因此,建模时首先要选择适宜的排水管网模型软件,即选择一定的排水管网模型结构。然后将模型软件应用于特定的建模区域,按照排水管网模型软件的模型结构将研究对象参数化,即汇水子区域、排水系统及其中的水流过程要用一系列参数组合来表征。

2.1 建模软件

暴雨雨水管理模型(SWMM)是美国环境保护署(EPA)推出的面向城市区域的雨水径流量和水质分析的综合性计算机模型,适用于城市区域内单场降雨以及长期(连续)降雨的径流量和水质的模拟。SWMM 是一个自由计算引擎,为了便于应用,对 SWMM 进行了适当的改进。

2.2 排水管网模型拓扑结构的确立

排水管网模型的拓扑结构包括管网图形拓扑结构和入流荷载拓扑结构两方面。图形拓扑结构的确

立包括管网连通性检查、管网结构简化、水流变向点确定等程序。入流荷载拓扑结构的确立包括汇水子区域划分及其排水出路确定。

汇水子区域划分步骤为:①将主干道路、街巷确定为汇水子区域的分界线,并在管网综合地图上标示出来。此时建模区域被分割成面积不等的街区条块。②按照综合地图上的建筑物轮廓以及社会团体对街区条块细分,至此建模区域被划分为面积较小($\leq 2 \text{ hm}^2$)的汇水子区域。③按照就近排放原则以及汇水子区域上社会单位门口朝向将径流接入到靠近单位门口一侧道路且距离最近的检查井节点上。对于不直接靠近任何排水管道的汇水子区域,则遵循地势状况,与其下游最为邻近的汇水子区域建立关联性。图 2 所示为建模区域解放南路雨水排放子系统汇水子区域划分结果。



图 2 汇水子区域划分

Fig. 2 Sub-catchment delineation

2.3 水文/水力模型初始基准参数的确定

排水管网模型参数包括水文模型参数和水力模型参数。水文模型参数一般可分为 3 类:Ⅰ.具有明确物理意义的参数,可直接测量或利用物理试验和物理关系推求;Ⅱ.纯经验参数,可通过实测资料反演;Ⅲ.具有一定物理意义的经验参数,可先按照物理意义确定参数值的取值范围,然后由实测资料反演确定其取值。对于以上第Ⅱ、Ⅲ类参数的确定,需要用模型参数校准算法求解,或者在模型应用之前,评价其变化对模型结果的影响^[1]。水力模型参数主要是排水管网特性数据,通过排水管网普查可获得较为准确的数值。水力模型中不确定的参数主要

是管道摩阻系数。SWMM 软件的主要输入参数见表 1。模型初始基准参数值(或取值范围)的设置及获取方法如表 2 所示^[2~7]。

表 1 SWMM 软件的主要输入参数

Tab. 1 Key input parameters of SWMM software

模型类别		参数
产流模型 (Horton 公式)		初始入渗率、稳定入渗率、衰减系数等
地表汇流模型 (非线性水库模型)		汇水区区域面积、汇水区区域的特征宽度、地表平均坡度、不透水区面积、不透水区面积所占比例(%)、不透水区粗糙系数、透水区粗糙系数、不透水区注蓄量、透水区的注蓄量、无注蓄不透水区面积所占比例(%)
排水 管网 数据	检查井	井底高程、最大水深、初始水深、淹没水深、积水面积
	管道(圆管)	管道长度、管道上下游管底高程、粗糙系数、管道管径(最大水深)、管道上下游高程偏差等

表 2 排水管网模型基准参数值(取值范围)

Tab. 2 Initial values and determination methods for model parameters

参数		初始基准值 (取值范围)	获取方法
汇水区区域面积/hm ²		≤2	CAD 量算工具
特征宽度			汇水区区域面积/ 汇水距离
平均坡度			参考道路纵向坡度
排水管网特征参数			排水管网普查
不透水区面积率/%		70~90	区域地表特征分析
无注蓄不透水面积率/%		5~30	
粗糙 系数	不透水区	0.030	经验值
	透水区	0.015	
注蓄量 /mm	不透水区	3.5(2~5)	
	透水区	6.5(3~10)	
霍顿 公式	初始入渗率/ (mm·h ⁻¹)	76.2	
	稳定入渗率/ (mm·h ⁻¹)	3.18	
	衰减常数/h ⁻¹	0.000 6	
排水管道(混凝土)粗糙系数		0.014 (0.013~0.015)	

3 模拟情境

3.1 模拟降雨情境

由于可获得的实测降雨情境时间尺度为 1 h,对于汇水时间很短的城市流域而言,基于如此长的采样间隔来进行降雨事件模拟,可能会错过峰值流量。

为此,模拟降雨情境采用基于芝加哥过程线模型(Chicago Hydrograph Model, CHM)的合成降雨情境。CHM 是基于暴雨强度公式和雨峰系数的非恒定降雨情境合成方法。若暴雨强度公式为: $i = a/(t + b)^c$, 则可以得到其雨强过程^[8]。

峰前上升段:

$$i_a = \frac{a}{(t_1/r + b)^c} [1 - \frac{ct_1}{t_1 + rb}] \tag{1}$$

峰后下降段:

$$i_b = \frac{a}{[t_2/(1-r) + b]^c} [1 - \frac{ct_2}{t_2 + (1-r)b}] \tag{2}$$

式中 r ——雨峰系数
 t_1, t_2 ——分别为峰前和峰后的时间
 i_a, i_b ——分别为上升段和下降段的瞬时暴雨强度

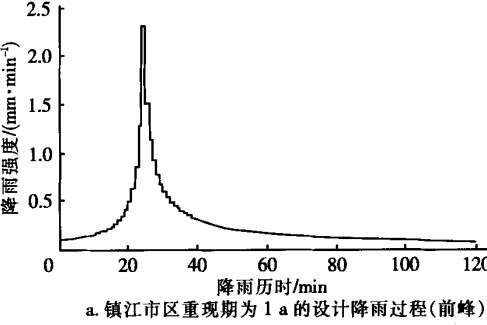
a, b, c ——暴雨强度公式中的地方参数

镇江市暴雨强度公式为: $q = 2\,418.16(1 + 0.787\lg P)/(t + 10.5)^{0.78}$ 。为了模拟排水管网系统在不同降雨情境下的表现,分别合成了前峰降雨(雨峰系数 $r = 0.2$)、中峰降雨($r = 0.5$)、后峰降雨($r = 0.8$),降雨重现期分别采用 $P = 1\text{ a}$ 、 $P = 2\text{ a}$ 和 $P = 3\text{ a}$,降雨历时采用 120 min。部分合成降雨情境见表 3 和图 3。

表 3 合成降雨情境

Tab. 3 Outline of synthetic precipitation scenarios

降雨情境	峰值雨强/ (mm·h ⁻¹)	2 h 降雨 量/mm	平均雨强/ (mm·h ⁻¹)
$r = 0.2, P = 3\text{ a}$	190.92	40.09	20.05
$r = 0.2, P = 2\text{ a}$	171.68	36.05	18.03
$r = 0.2, P = 1\text{ a}$	138.80	29.14	14.57
$r = 0.5, P = 3\text{ a}$	190.92	49.37	24.69
$r = 0.5, P = 2\text{ a}$	171.68	44.40	22.20
$r = 0.5, P = 1\text{ a}$	138.80	35.90	17.95
$r = 0.8, P = 3\text{ a}$	190.92	53.25	26.63
$r = 0.8, P = 2\text{ a}$	171.68	47.89	23.95
$r = 0.8, P = 1\text{ a}$	138.80	38.72	19.36



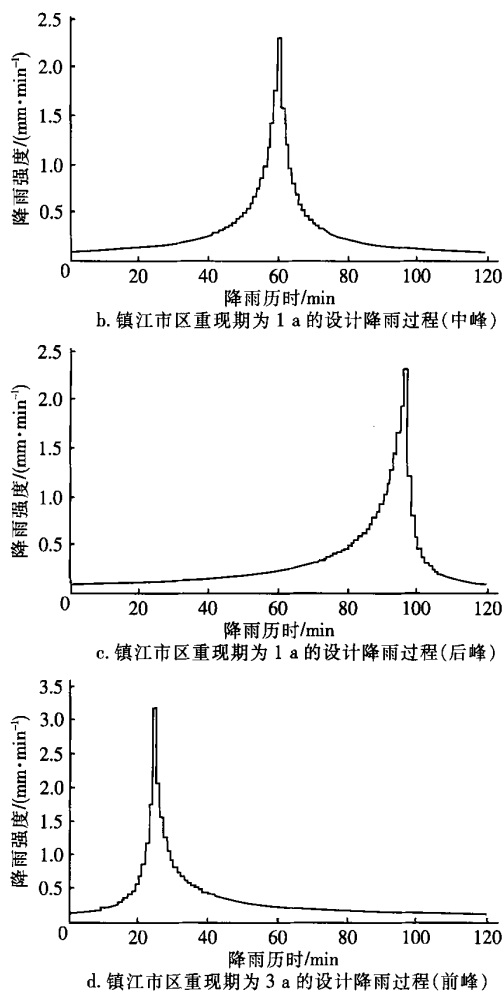


图3 合成降雨情境(部分)

Fig.3 Synthetic precipitation scenarios (part)

3.2 旱季入流

对于合流制管道,节点入流除雨水径流之外,还包括旱季污水入流。旱季入流过程线的确定可分为平均流量和流量变化模式两个步骤来进行。平均流量的确定采用间接折算法,即采用生活用水量标准和人口密度来推算的生活用水量标准(以面积计),然后乘以折算系数(取0.85),获得旱季污水排放量标准约为 $3.04 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{h})$ 。汇水子区域面积乘以旱季污水排放量标准(以面积计),就可以获得各个汇水子区域的旱季污水平均流量。检查井节点旱季入流量等于所连接的汇水子区域旱季入流量之和。

目前镇江市尚欠缺排水管道流量监测数据,污水流量变化模式不能直接获得,建模中采用用水量

变化模式代表污水量变化模式。至此,根据汇水子区域的面积、使用功能及其所占比例,可以获得汇水子区域的旱季污水排放量(即节点的旱季入流过程线)。

3.3 下游边界条件

古运河两端建有水闸,水位通常被调节在一定限度之内,变化相对平稳,故建模中以恒定的古运河水位来描述模型的下游边界条件。设定下游边界条件时考虑了排放口不同的出流状态(自由出流、半淹没和完全淹没出流),选择了3个特征水位,分别是汛期最高水位(7.47 m)、最低水位(2.85 m)和水位中间值(4.02 m)。因此,为了考虑下游回水影响,排水管网汇流的模拟方法采用动力波法。

3.4 初始条件

对于分流制雨水管网,在模拟初始,排水管道中没有水流或仅有少量入渗水流通过,为了保证数值计算的稳定性,可假设最大流量的5%作为基流^[9]。对于合流制管网,在模拟初始,初始条件可以选择为相应的旱季基流。

4 灵敏度分析与模型预校准

为了识别模型校准的关键参数,针对4个不同大小的汇水子区域、12个水文模型参数,采用9种不同的降雨情境进行局部灵敏度分析,目标函数采用汇水子区域地表径流过程线的峰值流量。按照灵敏度分析总体情况,各个参数对模型结果的灵敏度排序如图4所示。然后假定汇水子区域面积、特征宽度、平均坡度、排水管网特征数据等为可信度较高的基础数据,不再进行调整。模型校准主要调整不透水区粗糙系数、(透水区)初始入渗率。

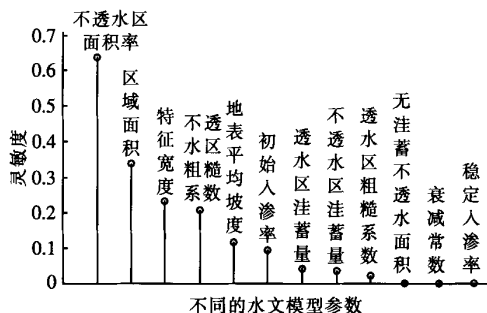


图4 水文模型参数灵敏度排序

Fig.4 Sensitivity of hydrologic model parameters to overland runoff peak flow

模型校准可分为预校准和微观校准两个步骤。鉴于镇江市排水管道流量监测资料欠缺,首先采用

了数据短缺条件下基于排水管网宏观水文特征的模型预校准方案。模型参数预校准以水文模型参数校准为主,水力模型参数校准为辅。

5 结语

该建模方法作为当前镇江市排水管网建模项目的阶段成果,其意义在于:①为后续的模式微观校准提供较优的初始参数集,有利于微观校准获得最优的校准结果;②从整体上控制模型的精度,并尽量将水文模型的误差减少到最小,譬如可以使模拟的汇水区区域径流系数与径流系数经验值(预期目标值)基本一致。

镇江市主城区排水管网建模方法是针对建模数据相对不完备的现状提出的,因此可以为其他城市现阶段的排水管网建模提供借鉴。建模数据短缺主要表现为:①缺少校准实测数据(如排水管道流量等);②降雨强度时间序列(雨强过程线)采样间隔大,会导致模型误差,可能会漏掉模拟的峰值流量,从而不能满足基于降雨事件的排水管网建模目标要求;③描述汇水区域地表特性及土壤特性的参数获取比较困难。

参考文献:

- [1] 杨晓华,杨志峰,郦建强,等. 水文模型参数识别算法研究及展望[J]. 自然科学进展,2006,16(6):657 -

661.

- [2] 岑国平,沈晋,范荣生. 城市暴雨径流计算模型的建立和检验[J]. 西安理工大学学报,1996,12(3):184 - 190.
- [3] William James. Best Modeling Practices for Urban Water System (Monograph 10) [M]. Guelph, Canada: CHI, 2002.
- [4] 刘俊. 城市雨洪模型研究[J]. 河海大学学报,1997,25(6):21 - 24.
- [5] 托马斯 H 罗斯. 场地规划与设计手册[M]. 顾卫华译. 北京:机械工业出版社,2005.
- [6] Choi K S, Ball J E. Parameter estimation for urban runoff modeling[J]. Urban Water, 2002, (4):31 - 41.
- [7] Liong S Y, Chan W T, Lun L H. Knowledge-based system for SWMM runoff component calibration[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1991, 117(5): 507 - 524.
- [8] 周玉文,赵洪宾. 排水管网理论与计算[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2000.
- [9] 任伯帜,邓仁健,李文健. SWMM 模型原理及其在霞凝港区的应用[J]. 水运工程,2006,(4):41 - 44.

电话:13482297351

E-mail: stormmodel@163.com

收稿日期:2006-12-21

(上接第31页)

当 W-SFCW 的水力负荷为 $0.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,其有机负荷达到了 $56 \sim 112 \text{ gCOD}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,氨氮负荷达到了 $20 \sim 28 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

参考文献:

- [1] 何成达,谈玲,葛丽英,等. 波式潜流人工湿地处理生活污水的试验研究[J]. 农业环境科学学报,2004,23(4):766 - 769.
- [2] 詹德昊,吴振斌,徐光来. 复合垂直流构建湿地中有机质积累与基质堵塞[J]. 中国环境科学,2003,23(5):457 - 461.
- [3] 沈昌明,谭章荣,董秉直,等. 往复流人工湿地处理城市污水的效能研究[J]. 中国给水排水,2006,22(9):90 - 92.
- [4] 陈长太,王雪. 国外人工湿地技术的应用与研究进展[J]. 中国给水排水,2003,19(12):105 - 106.

- [5] 尹炜,李培军. 潜流人工湿地的局限性与运行问题[J]. 中国给水排水,2004,20(11):36 - 38.
- [6] 龚琴红,田光明. 无阀垂直流湿地的冬季运行效果分析[J]. 中国给水排水,2006,22(7):22 - 24.
- [7] Cooper P. A review of the design and performance of vertical-flow and hybrid CW treatment systems[J]. Water Sci Technol, 1999, 40(3):1 - 9.
- [8] 王晟,徐祖信,李怀正. 潜流湿地处理生活污水时的强化方法[J]. 环境科学,2006,27(1):2432 - 2438.

作者简介:任拥政(1975 -),男,甘肃平凉人,博士研究生,讲师,主要研究方向为水处理新技术。

E-mail: renyz@163.com

收稿日期:2007-02-02