

镇江市暴雨防涝预警模型的建立

刘兴坡¹ 李树平¹ 王美秋¹ 谢莹莹¹ 刘遂庆¹ 喻一萍²

(1. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 镇江市给排水管理处, 江苏镇江 212002)

Storm waterlogging-prevention & pre-warning system of Zhenjiang city

LIU Xing-po¹, LI Shu-ping, WANG Mei-qiu, XIE Ying-ying, LIU Sui-qing¹, YU Yi-ping

College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

Zhenjiang Water Utilities, Zhenjiang, Jiangsu province, 212002 China)

摘要: 建立暴雨防涝预警模型是城市防治内涝的重要非工程措施之一。首先, 介绍了城市暴雨预警系统的目标和构成。然后介绍了建模平台 SWMM 及其建模理论、数据需求, 最后对镇江市区的排水建模实践进行了研究。

关键词: 城市排水管网; 雨水管网; 防涝; 预警; SWMM

中图分类号: TU992

Abstract: Storm waterlogging-prevention & pre-warning system is one of the important non-engineering measures for the storm-related disaster mitigation. In the paper, the aim and structure of the system are presented. In addition, the modeling theories and data demand of the modeling platform, SWMM 5.0 are also highlighted. Finally, urban drainage modeling practice of Zhenjiang city is studied.

Key words: urban drainage networks, storm sewer networks, waterlogging-prevention, pre-warning, SWMM

引言

镇江市地处长江下游南岸, 长江与大运河的交汇处, 属于“一水横陈, 三面连岗”的河谷盆地, 特殊的地理位置和城市格局使得镇江市区面临外洪与内涝的夹击。每值汛期, 常常会出现上有客洪侵袭、下受江潮顶托、南有山洪压顶、北受台风的威胁。由于存在客洪侵袭、山洪压境和江潮倒灌、自排受阻, 常常会引起市区洼地内涝问题。

同时, 由于城市化进程的加快, 城区内不透水地表面积增大, 地表入渗水量变少, 地表糙率变小, 城市雨水径流总量与峰值流量增大, 汇流速度变快, 洪峰出现时间提前, 使得内涝的排蓄条件不断恶化, 道路积水问题时有发生, 干扰了城市交通, 干扰了社会生活秩序。城市暴雨内涝已成为镇江发展进程中的一个公害。

防止城市暴雨内涝的传统措施主要是提高新建雨水管网系统的设计标准、现有排水管网扩容以及设置滞洪池等。这些工程措施的实施对于提高城市内涝的设防水平具有积极意义。然而, 由于排水管网基建投资的经济性要求, 城市排水管道只能防止特定标准之内的降雨造成的灾害, 加之未来时期内降雨事件变化不确定性, 当此期的降雨强度大于设计标准时, 就会导致城市内涝的发生。因此, 仅仅依靠工程措施无法达到暴雨减灾的目的。

鉴于城市内涝灾害是一种自然随机现象，如果要将涝灾损失降低到最小程度，就必须将防洪排涝工程措施和非工程措施结合起来。城市暴雨防涝预警系统即是城市暴雨减灾的非工程措施之一，其目标就在于，在暴雨来临之前，预测暴雨内涝灾害的可能发生范围、灾害程度等信息，做到未雨绸缪，防患于未然。

1 镇江城区暴雨防涝预警系统的目标与结构

1.1 目标

在 GIS 和 SCADA 系统的数据支持下，通过排水建模软件预测城市排水系统在降雨时的水力表现，给出管道水位、流量，以及检查井水位、溢流等特性数据，预测特定地点在降雨之后的积水状况，据此发布内涝预警信息，为交通绕行、事故抢险等提供科学依据。

1.2 研究框架

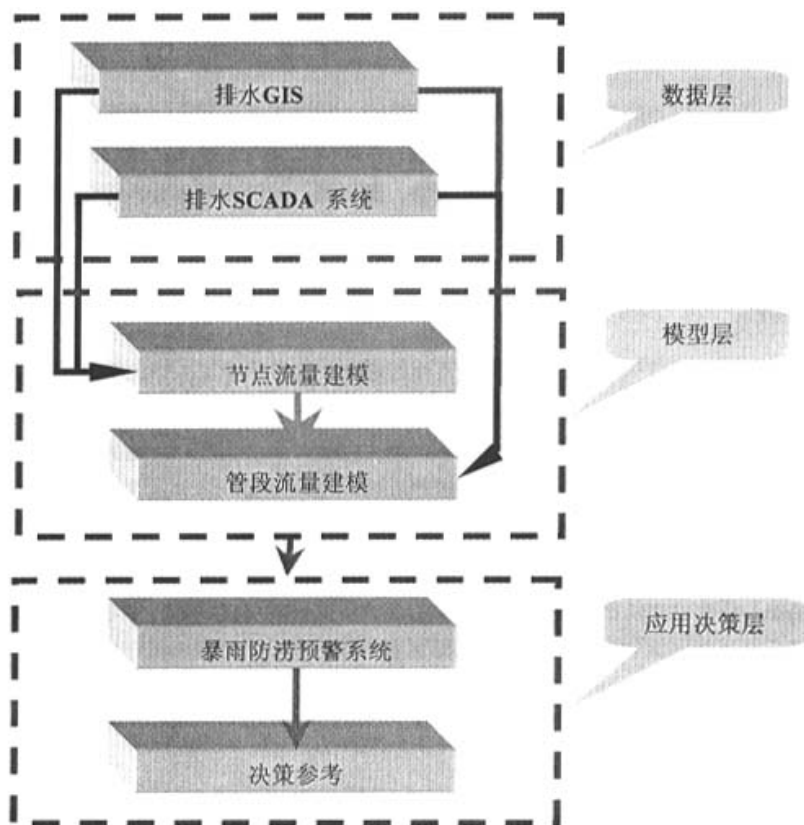


图 1-1 城市暴雨防涝预警系统框架图

排水 GIS 和排水 SCADA 系统是城区防涝预警系统的数据支持模块,其中排水 GIS 描述着城市排水管网如何存在,而排水 SCADA 系统则描述城市排水如何运行,排水计算机模型包括节点流量和管段流量计算两个部分。通过计算机模型可以获知排水管网在未来时期内的运行状态,从而为城区内涝防治提供科学依据。

2 建模过程

2.1 SWMM5.0 模型简介

暴雨雨水管理模型 (Storm Water Management Model, SWMM) 是一个面向城市区域的雨水径流水量和水质分析的综合性计算机模型。其最新版本为基于 Windows 平台开发的 SWMM5.0,这也是本文所采用的建模平台。

SWMM5.0 适用于城市区域内单场降雨以及长期的(连续的)径流水量和水质模拟,其径流模块能够模拟一系列汇水区域上降雨形成的径流量和污染负荷,管网演算模块则能够模拟径流在管道、渠道、调蓄/处理设施、泵站、控制设施的流量和水质变化。SWMM 能够在多个模拟时段内跟踪每个汇水区域或每条管道中的径流水量和水质变化。

SWMM5.0 可用于城市区域暴雨径流、合流制管道、污水管道和其它排水系统的规划、分析和设计环节,也可应用于非城市区域。SWMM5.0 整合了研究区域数据输入、城市水文、水力和水质模拟、模拟结果浏览等功能,具有时序图形和表格、断面图、动画和频率分析等多种模拟结果表现形式^[1]。

2.2 SWMM5.0 的建模方法

2.2.1 地表产流模型

在 SWMM 模型中,首先需要将所研究的汇水区域划分为若干个汇水子区域,每个汇水子区域包括洼蓄透水面积、洼蓄不透水面积、无洼蓄不透水面积三部分。这三类地面的径流形成特性不同。对于透水性地面,降雨量首先满足地面前下渗需求,当雨强超过下渗强度时,地面开始积水,至其洼地最大滞水量时,即形成地面径流;对于有滞流能力的不透水地面,降雨量首先满足地面最大滞水量后,即开始形成径流;对于无滞流能力的不透水地面,降雨量除地面蒸发外基本上都成为径流量,当雨强大于蒸发量时即形成径流现象。因此,在相同条件下,无滞流能力的不透性地面、有滞流能力的不透水地面和透水地面依次形成径流。每个汇水子区域根据划分的三部分地表类型分别进行径流演算,三种不同下垫面面积的径流出流相加即可获得该汇水子区域的出流过程线。

SWMM 模型中入渗过程模拟可选用霍顿公式、格林-安普特公式以及 SCS CN (Curve Number) 法。

2.2.2 地表汇流模型

地表汇流演算就是对汇水子区域的洼蓄透水面积、洼蓄不透水面积、无洼蓄不透水面积形成的地表径流到雨水口的演进过程进行模拟,是近似将其作为非线性蓄水水库来进行的,即非线性水库法。

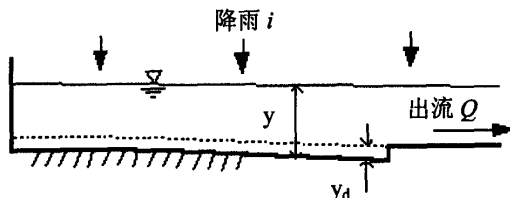


图2 非线性水库方法的集水区概化图

图2为一个集水区的概化示意图，将其概念化为一个水深非常浅的水库。降雨是水库的入流，渗流和地表径流就是水库的出流。该模型假设：集水区出口处的地表径流为水深等于 $(y - y_d)$ 的均匀流，且水库的出流量是水库水深的非线性函数。该系统的连续性方程可以写成：

$$A \frac{dy}{dt} = A(I - f) - Q \quad (1)$$

式中， A 为集水区的面积； I 为降雨强度； f 为入渗率； Q 为集水区的出流量； y 为地表径流的平均水深；图中 y_d 为集水区的洼蓄量。

根据曼宁公式，可以获得集水区的出流量：

$$Q = W(y - y_d)^{5/3} S^{1/2} / n \quad (2)$$

式中， W 为集水区的特征宽度； n 为集水区曼宁摩擦系数的平均值； S 为地表平均坡度。

联立以上两式，就可以获得一个关于水深 y 的非线性微分方程，利用有限差分法，可以得到离散方程：

$$\frac{y_2 - y_1}{\Delta t} = \bar{I} - \bar{f} - \frac{WS^{1/2}}{An} \left[\frac{y_1 + y_2}{2} - y_d \right]^{5/3} \quad (3)$$

式中， Δt 为时间步长； y_1 为时段起始时刻的水深； y_2 为时段结束时刻的水深； $\bar{I}$ 为时段内的平均降雨强度； $\bar{f}$ 为时段内的平均下渗率。

2.2.3 管网汇流模型

排水管网非恒定流汇流演算的控制方程是由连续方程和动力方程组成的圣·维南方程组。方程的未知函数包括横断面平均流速 $v = v(x, t)$ 以及由管底至自由水面的水深 $h = h(x, t)$ 。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q}{gA} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q}{A} \right) + \frac{\partial h}{\partial x} - (S_0 - S_f) = 0 \tag{5}$$

其中, A 为管道过水断面面积(m^2); Q 为流量(m^3/s); t 为时间(s); x 为沿水流方向管道的长度(m); g 为重力加速度(SI 制); h 为水深(m); S_0 为管道底坡; S_f 为阻力坡降。

对污水管道水流进行动态模拟实质上是对圣·维南方程组进行求解的过程, 一般采用数值解法。当联立偏微分方程 (4) 和 (5) 求解时, 其解为圣·维南方程组全解, 国外称为动力波解。当忽略公式 (5) 左边第一项时, 其解称为准恒定动力波解; 如果再忽略左边第二项, 其解称为扩散波解; 如果再忽略左边第三项, 其解称为运动波解^[2]。

在 SWMM 模型中, 管网汇流演算可选用恒定流模型、运动波模型和动力波模型。

2.3 SWMM5.0 的建模模型输入

表 1 SWMM5.0 模型所需要的输入数据

模型参数	具体参数
产流模型参数 (以霍顿公式为例)	最大入渗率; 最小入渗率; 衰减常数; 最大入渗体积
地表汇流模型参数	汇水区域面积; 汇水区域的特征宽度; 地表平均坡度; 不透水区面积; 不透水区面积所占的比例 (%); 不透水区的曼宁糙率值; 透水区的曼宁糙率值; 不透水区的洼蓄值; 透水区的洼蓄值; 没有洼蓄的不透水区面积所占的比例 (%)
排水管网特性数据 (以圆管为例)	管段长度; 管道坡度; 曼宁糙率; 管道管径
模型边界条件	• 上游边界条件 (如雨强过程线) • 下游边界条件 (如潮汐或汛期水位变化曲线等)

3、研究实例

3.1 建模区域概况

研究区域位于镇江市主城区, 面积约 366 公顷, 包括 YH-1、YH-2 和 YH-3 三个规划区域, 属于古运河流域, 雨水排放出口分布在古运河两岸。其中, YH-1、YH-2 区域以合流制管线为主, YH-3 区域以分流制管线为主。本文以 YH-3 区域为例进行介绍。

YH-3 区域面积约为 119 公顷, 主要包括正东路、环城路 (一中到南水桥区间)、解放南路 (永安路口到古运河)、南门大街 (海马大酒店到古运河)、健康路 (四中门口到古运河) 等干道。所建模的排水管网包括 162 个检查井节点、162 条管段以及 6 个出水口节点, 分为 6 个独立的排水系统。

古运河是建模区域雨水的受纳水体，它自东南向西北贯穿城区，东自大运河，北至京口闸（与长江隔开），全长 16.38km，汛期最高水位 7.47 m，最低水位 2.85 m。

3.2 排水管网拓扑结构的建立

建模区域排水管网拓扑结构的确立由排水管网实际勘测获得，其结果以 CAD 格式保存。据此可将排水管网勘测结果描绘到 SWMM 平台上。排水管网流向变向点位置通过排水普查结果获得。

3.3 汇水子区域划分

汇水区域边界划分的成果是获得若干个汇水子区域，此处主要以研究区域背景图和地形图作为划分依据。汇水子区域划分主要按照以下优先级进行：（1）地形；（2）社会单位建制；（3）就近排放原则。YH-3 建模区域划分为 118 个汇水子区域，每个汇水子区域面积大约在 0.5-5 公顷之间。每个汇水子区域的径流流入下游检查井节点或者下游的汇水子区域。划分结果如图 3 所示。

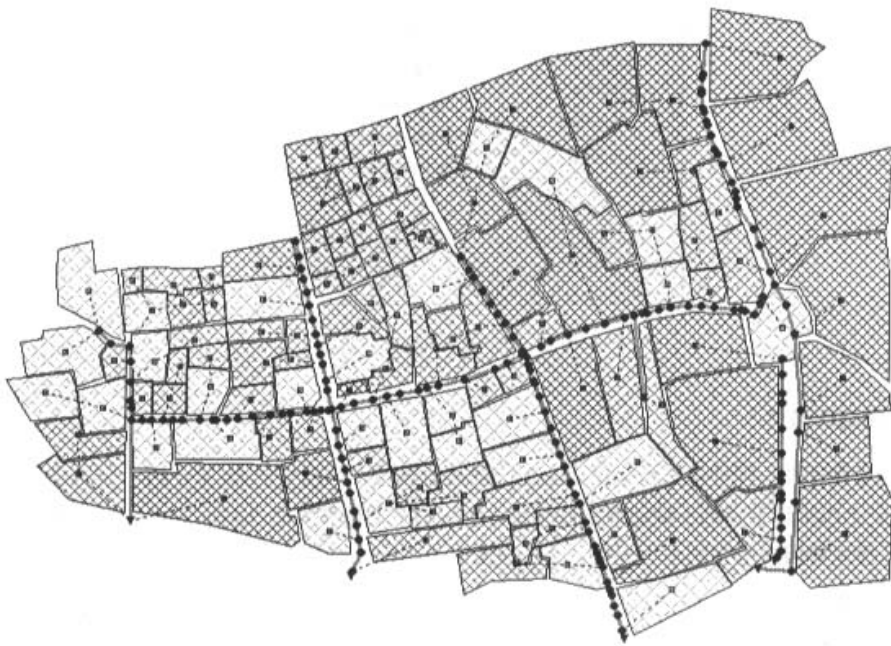


图 3 YH-3 建模区模型图

3.4 模型参数确定

划定汇水子区域边界之后，就需要收集和率定各个汇水子区域的模型参数数据。各个汇水子区域的现状土地利用功能根据标有建筑物名称的 CAD 图获得。一些地理特性数据，如地表平均坡度等通过地形图获得，其他一些模型参数则采用参数经验值。如不透水区的注蓄量取值为 2-5mm；透水区的注蓄量取值为 3-10mm^[3]。其他参数的选用参考了文献[4-9]。

3.5 模型模拟选项设置

模拟选项的一般设置见图 4 所示。单位制选择米制单位，入渗模型选用霍顿模型，管网汇流演算选用动力波法。“动力波”页面选项采用默认设置。对于动力波演算，当节点总流量超过下游管道的排水能力时，水流会溢流出系统，并以池塘蓄水的形式暂存在节点处，待下游管道能力富余时再重新流回系统。此外，模拟时间步长采用 1min。

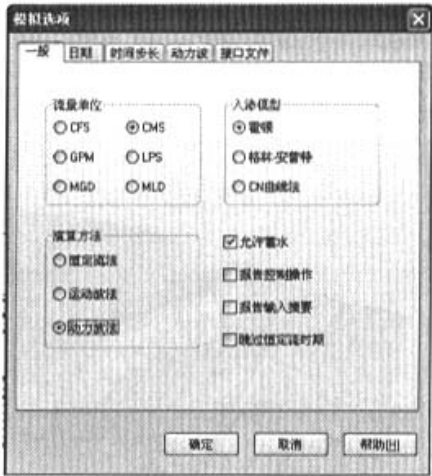


图 4 模拟选项设置（一般项）

3.6 上下游边界条件

上游边界条件，即降雨过程采用设定的降雨历时曲线，降雨历时为 3 小时，雨强序列间隔为 15min。6 个出水口节点的下游边界条件采用古运河的汛期最高水位 7.47m（恒定），以模拟设定降雨过程下排水管网在汛期的水力表现。为了模拟退水过程，模拟时间取为 6 小时。

3.7 模拟效果

模型参数设置完毕后，即可执行模拟。而后建模结果可以通过多种形式进行展示，包括时间序列图、剖面图、表格等形式。对于长期的连续模拟，也可以对模拟结果进行统计分析。

(1) 时间序列图

在展示对象的时间序列图时，可以选择展示对象的类型（节点、管段和汇水子区域）以及对象的水力特征值（以节点为例，包括水深、水头、体积、侧向入流量、总入流量、溢流量），然后需要选择所要展示的节点等对象编号，可以在一个时间序列图中同时展示多个对象的情况（见图 5）。

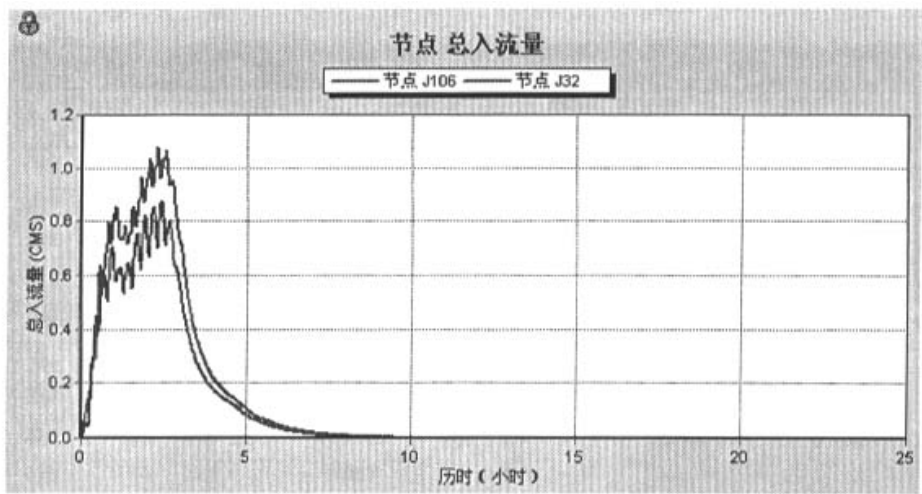


图 5 节点总入流量的时间序列图展示

(2) 剖面图

通过剖面图可以了解管道中水位的状况，配合动画形式，可以动态地展示管道中水位的变化情况。首先，需要设定剖面图管段的起始节点和结束节点，通过查找路径，确定该路径中所包括的管段，剖面图展示效果如图 6 所示。

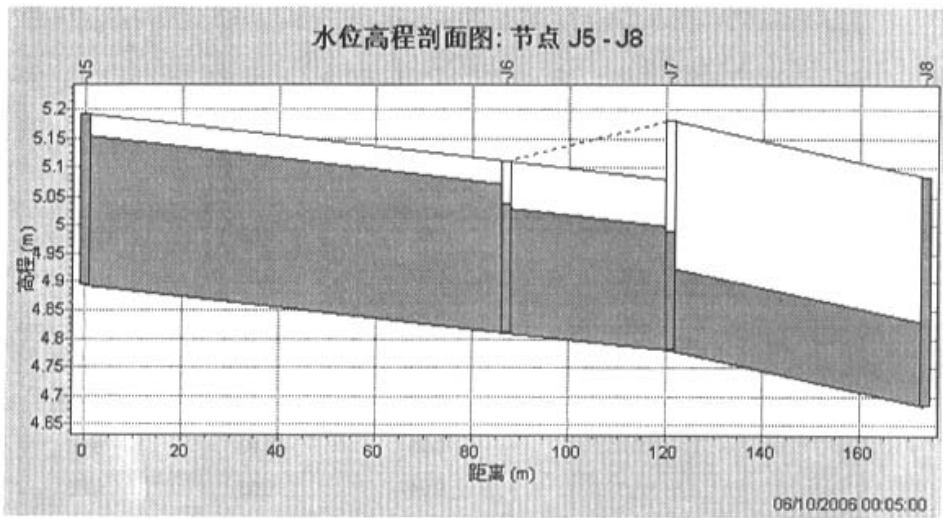


图 6 管道水位变化的剖面图展示

(3) 数据表格

通过选择菜单命令“报告/表格”，可以由表格形式展示建模结果。表格结果的展示可分为两种类型。一种是在同一表格中显示某个对象的多种水力信息（见图 7），另一种是显示多个对象的某种

多个对象的某种水力信息（见图 8）。

日	小时	水深 (m)	水头 (m)	体积 (m3)	总入流量 (CMS)
0	00:01:00	0.20	6.05	0.00	0.05
0	00:02:00	0.22	6.07	0.00	0.06
0	00:03:00	0.28	6.14	0.00	0.09
0	00:04:00	0.28	6.13	0.00	0.08
0	00:05:00	0.26	6.11	0.00	0.07
0	00:06:00	0.24	6.09	0.00	0.06
0	00:07:00	0.22	6.07	0.00	0.06
0	00:08:00	0.20	6.06	0.00	0.05
0	00:09:00	0.19	6.05	0.00	0.05
0	00:10:00	0.18	6.04	0.00	0.04
0	00:11:00	0.18	6.03	0.00	0.04

图 7 显示节点 J66 建模结果的表格

日	小时	节点 J66	节点 J65	节点 J67
0	00:01:00	0.05	0.01	0.00
0	00:02:00	0.06	0.06	0.02
0	00:03:00	0.09	0.07	0.05
0	00:04:00	0.08	0.06	0.08
0	00:05:00	0.07	0.05	0.08
0	00:06:00	0.06	0.05	0.08
0	00:07:00	0.06	0.04	0.07
0	00:08:00	0.05	0.04	0.06
0	00:09:00	0.05	0.03	0.05
0	00:10:00	0.04	0.03	0.05

图 8 显示多个节点总入流量建模结果的表格

参考文献:

- [1] Lewis A. Rossman, et al. STORM WATER MANAGEMENT MODEL USER' S MANUAL VERSION 5.0, 2004.
- [2] 周玉文, 赵洪宾. 排水管网理论与计算. 中国建筑工业出版社, 2000.
- [3] 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.
- [4] 刘迈. 城市暴雨雨水管理系统的初探. 南京市政, 2000, (2):1-13.
- [5] 曹韵霞, 张恭肃, 韦明杰. 用美国暴雨水管理模型计算北京城区防洪排水. 水文, 1993, (6):19-24.
- [6] 徐向阳, 杜文成. 北京市区降雨径流关系分析与综合. 中国给水排水, 1991, 7(2):33-34 .
- [7] 徐向阳, 李文起. 北京市管网排水流域雨洪模型研究. 水利水电技术, 1993, (4):1-5.
- [8] 刘俊. 城市雨洪模型研究. 河海大学学报, 1997, 25(6):21-24.
- [9] 徐向阳. 平原城市雨洪过程模拟. 水利学报, 1998, (8):34-37.

第一作者: 刘兴坡 (1977-), 男, 河北赵县人, 工学博士, 博士后。

E-mail:liuxpv@sohu.com。

通讯地址: 上海市四平路 1239 号同济大学环境科学与工程学院 214 室 (200092), 电话: 021-65985869(o)。

江苏省建设系统研究项目 (JS2004ZD02); 上海市科委博士后基金科研计划项目 (05R214144)