

张大伟<sup>1</sup> 赵冬泉<sup>1,2</sup> 陈吉宁<sup>1</sup> 王浩正<sup>2</sup> 王浩昌<sup>1</sup>

(1 清华大学环境科学与工程系,北京 100084;2 北京清华城市规划设计研究院环境与市政所,北京 100084)

**摘要** 基于城市暴雨强度公式,应用芝加哥降雨过程线模型产生了典型降雨过程曲线,并对清华大学校园内一个典型雨水排水系统进行了模拟运算和分析。研究中采用我国各大城市普遍使用的暴雨强度公式类型和国际上普遍使用的暴雨管理模型(Storm Water Management Model, SWMM),将芝加哥降雨过程线模型应用在排水系统模拟中,并对模拟结果进行了分析。该方法可作为城市排水系统模拟的典型应用流程,可用于对排水管网系统服务性能进行总体评价、瓶颈识别以及辅助管网系统的改造和更新方案设计,对提高城市排水系统的规划设计和运行管理水平有重要借鉴意义。

**关键词** 芝加哥降雨过程线模型 暴雨强度公式 设计暴雨 排水系统 SWMM

## 0 前言

由于城市自身的特点以及城市化的发展使城区不透水地面比例增大,城市暴雨径流量随之增加,而随着环境污染防治工作与研究的深入,城市点源污染得到了有效的控制,从而使得径流污染对城市水环境的影响越来越突出。利用数学模型对城市排水系统进行模拟是研究城市径流污染产生来源和输送规律的有效手段<sup>[1,2]</sup>。另外城市排水系统模型还广泛地应用于排水管网系统服务性能总体评价和瓶颈识别,为排水管网的改造和更新方案设计提供决策支持。

在排水管网设计中,为了确定雨水管渠的尺寸和坡度,必须首先确定管渠的设计流量,而雨水管渠的设计流量主要取决于地区的降雨强度<sup>[3]</sup>。可见对于城市排水系统模型的应用,设计典型的能够有效反映区域降雨特征的降雨过程线尤为重要。本文讨论了芝加哥降雨过程线法在城市排水系统模拟中的典型应用,并结合国内大部分城市普遍使用的暴雨强度公式类型,对实例排水模型的应用过程及模拟结果进行了分析。

## 1 城市排水模型

20世纪80年代初期国外的研究者就已经在城市排水系统模拟方面进行了研究和开发,并出现了大量的统计模型、机理模型及管理规划模型,如著名的暴雨管理模型(SWMM)。SWMM是由美国环

保署(USEPA)在20世纪70年代开始开发,是最早提出的、最广泛应用于城市非点源产生以及在排水系统中迁移转化的模型之一。经过30多年的发展,开发者对SWMM进行了大量的测试,目前已经发展到SWMM 5.0版本<sup>[4]</sup>。各国的工程师利用SWMM构建了大量的城市排水模型<sup>[5-9]</sup>。

通过对排水系统中节点、管道、汇水区以及其他排水构筑物的流量、水深和流速等时间序列的仿真模拟,SWMM提供的结果可以用来分析现状排水管网系统的工作状态,合流制管网系统的溢流风险,暴雨对城市水文/水质可能发生的影响或城市雨洪利用设施(如BMP)的利用效率。

另外,SWMM可以完整地模拟回水影响、逆流、明渠、地下管网、环状管网以及各种复杂的排水构筑物<sup>[4]</sup>。SWMM将会帮助管理者解决管网运行中出现的问题,有效地提高管网的管理及运行水平,为合理规划管网,减少管网漏损,优化管网及泵站的运行提供决策支持。

## 2 芝加哥降雨过程线

芝加哥流量过程线模型以统计的暴雨强度公式为基础设计典型降雨过程。在我国排水管渠设计中,暴雨强度公式一般采用式(1)<sup>[10]</sup>:

$$q = \frac{167A_i(1 + C_i g P)}{(t_d + b)^c} \quad (1)$$

式中  $q$ ——平均暴雨强度,mm/min 或 L/(s·hm<sup>2</sup>);

- $A_1$  ——重现期为 1 年的设计降雨的雨量;
- $C$  ——雨量变动参数,是反应设计降雨各历时不同重现期的强度变化程度的参数之一;
- $P$  ——设计降雨重现期,  $a$ ;
- $t_d$  ——暴雨历时,  $\text{min}$ ;
- $b, c$  ——常数,共同反应重现期的设计降雨随历时延长其强度递减变化的情况。

可见  $q$  反应了一定降雨历时  $t_d$  内与单位面积上的超过频率为  $P$  的平均雨深。如果设计重现期和设计降雨历时已经确定,就可通过式(1)求得设计降雨强度。由于对于某一区域给定重现期下暴雨强度公式的分子  $167A_1(1 + ClgP)$  为常数,设为  $a$ ,将式(1)简化即为 Horner 降雨强度公式见式(2)。

$$i_{ave} = \frac{a}{(t_d + b)^c} \quad (2)$$

式中  $i_{ave}$  ——平均暴雨强度,计算见式(3)。

$$i_{ave} = \frac{1}{t_d} \int_0^{t_d} i(t) dt \quad (3)$$

$i(t)$  为降雨强度随时间变化的曲线,将式(2)和式(3)合并可得:

$$\frac{a}{(t_d + b)^c} = \frac{1}{t_d} \int_0^{t_d} i(t) dt \quad (4)$$

对(4)两边微分可得:

$$i(t) = \frac{d}{dt} \left[ \frac{atd}{(t_d + b)^c} \right] = \frac{a[(1 - c)t_d + b]}{(t_d + b)^{1+c}} \quad (5)$$

在排水管网系统设计过程中,如果引入参数雨峰系数  $r(0 < r < 1)$  来描述降雨峰值发生的时间,则降雨时间序列将分为峰前时间序列  $i(t_b)$  和峰后时间序列  $i(t_a)$ 。

式(6)和式(7)即为芝加哥暴雨过程线模型求得了指定频率各种历时的设计雨量后,通过式(6)和式(7)就可以求得设计暴雨的时程分配。芝加哥暴雨过程线法在北美地区得到了广泛的应用。

由于暴雨强度公式的多样性,对于不同的暴雨强度公式类型需要进行参数转换,转换成标准的 Horner 降雨强度公式的格式才能进行暴雨的时程分配。

$$i(t_b) = \frac{a \left[ \frac{(1 - c)t_b}{r} + b \right]}{\left( \frac{t_b}{r} + b \right)^{1+c}} \quad (6)$$

$$i(t_a) = \frac{a \left[ \frac{(1 - c)t_a}{1 - r} + b \right]}{\left( \frac{t_a}{1 - r} + b \right)^{1+c}} \quad (7)$$

### 3 案例应用

#### 3.1 模型构建

选取清华大学校内一个具有独立分流制管网系统的雨水收集排放小流域作为研究区域,研究区总面积  $12.9 \text{ hm}^2$ ,由 64 根雨水管道组成。研究区管网系统结构见图 1。

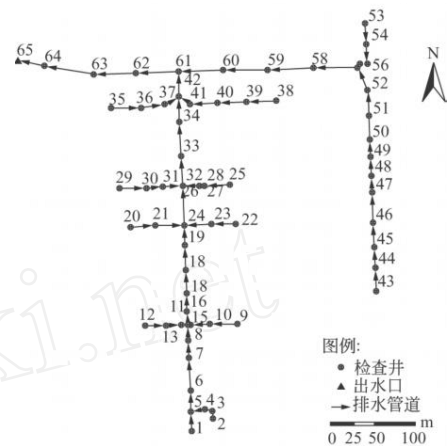


图 1 研究区管网系统示意

将该排水系统在 SWMM 中建模,并选用 2007 年 10 月 5 日的一场典型降雨(历时 3 h,总雨量  $10.5 \text{ mm}$ )的流量监测数据进行模型参数的率定和识别。采用蒙特卡罗法模拟 10 000 次,采用 Nash-Sutcliffe 效率系数<sup>[11]</sup>来估计模拟结果曲线与监测结果的吻合程度,见式(8)。

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{sim}} - Q_i^{\text{obs}})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{obs}} - Q^{\text{av}})^2} \quad (8)$$

式中  $NS$  ——Nash-Sutcliffe 效率系数,用来反映模拟结果曲线与监测结果的吻合程度;

$Q_i^{\text{sim}}$  —— $i$  时刻的模拟值;

$Q_i^{\text{obs}}$  —— $i$  时刻的观测值;

$Q^{\text{av}}$  ——观测值的平均值。

由公式可知  $NS > 1$ ,  $NS$  值越接近于 1,说明模拟结果与监测曲线的吻合程度越高<sup>[12]</sup>。选取 Nash-Sutcliffe 效率系数最高的参数组为最优参数。率定所得最优参数组经另外一场独立降雨事件(2007 年

10月4日)进行验证。率定事件的 Nash-Sutcliffe 效率系数为 0.94;验证事件的 Nash-Sutcliffe 效率系数为 0.87。在模型验证过程中,一般认为 Nash-Sutcliffe 效率系数大于 0.7 时就表示预测时间序列与监测时间序列达到了很好的吻合<sup>[13]</sup>。以上率定和验证结果证明了所构建的 SWMM 模型的准确性与可靠性。

### 3.2 模拟情景设定

在我国的市政雨水管渠的设计中,通常选择降雨强度最大的雨作为设计标准,这种降雨的特点是降雨强度大,降雨历时短,降雨面积小<sup>[14]</sup>,该方法设计简单,但不能综合反映区域的典型降雨特征。本文采用芝加哥暴雨过程线模型合成降雨情景,该方法是基于暴雨强度公式和雨峰系数的非恒定降雨情景合成方法。根据文献[10]可得北京市暴雨强度公式为:

$$q = \frac{2001(1+0.811lgP)}{(t+8)^{0.711}} \quad (9)$$

由于降雨强度公式中的单位包括两种 [mm/min 和 L/(s·hm<sup>2</sup>)],而芝加哥暴雨强度公式[式(6)和式(7)]采用单位 mm/min 来计算,北京市暴雨强度公式中的 q 单位为 L/(s·hm<sup>2</sup>),所以需要进行换算,换算方法为<sup>[13]</sup>:

$$q[L/(s \cdot hm^2)] = \frac{1 \times 1000 \times 10000}{1000 \times 60} i = 166.7i(mm/min) \quad (10)$$

根据式(10)将式(9)转换成 Horner 降雨强度公式格式[见式(2)],即可得出一定重现期下的芝加哥暴雨模型中的系数 a,然后根据式(6)与式(7)设计典型的暴雨强度曲线。为模拟排水管网系统在不同降雨情景下的运行状态,根据式(6)和式(7)合成了降雨重现期分别为 1 a 和 5 a,历时 2 h 的两种不同的典型降雨情景。合成降雨情景见图 2。

按照我国气象局规定:24 h 内的降雨量称之为日降雨量,凡是日雨量在 10 mm 以下称为小雨,10~24.9 mm 为中雨,25~49.9 mm 为大雨,暴雨为 50~99.9 mm,大暴雨为 100~250 mm,超过 250 mm 的称为特大暴雨。所以设计暴雨中重现期为 1 a 的属于大雨,重现期为 5 a 的属于暴雨。

采用经过验证的参数分别对以上两种降雨情景进行模拟。模拟过程中,降雨时间间隔为 5 min,模

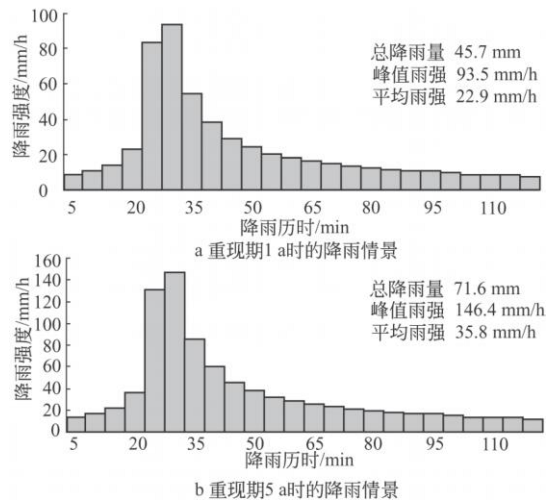


图2 典型设计降雨过程

拟计算步长为 10 s。

### 3.3 模拟结果分析

根据 SWMM 模型的输出报告分别统计试验区内的检查井溢流、管道满流和系统滞留状况。图 3 为不同降雨情景下出水口的水深变化,由于出水口上游管道为直径 1.1 m 的圆管,两种降雨情景下的出水口的最大水深都小于 0.8 m,说明该出水口在暴雨时能够安全排出研究区内的降雨。

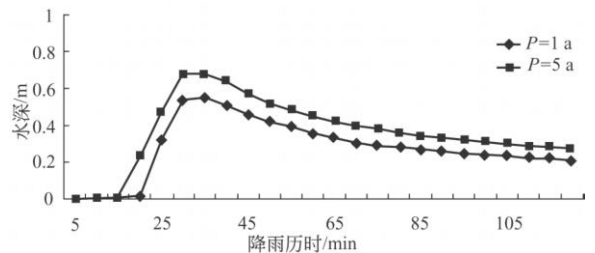


图3 研究区出水口在不同设计降雨情景下的水深变化曲线

从溢流结果中发现节点 9、22、38 和 39 四点在两种降雨情景下将发生溢流,节点 3、7、8 和 12 在 5 年一遇的降雨情景下发生短时间溢流。各点的洪峰流量和总溢流时间见表 1。

利用芝加哥降雨过程线模型合成的北京市典型降雨对清华大学校内的排水系统进行模拟发现,在暴雨情景下校园多个检查井将发生溢流状况,但大部分持续时间很短 (< 10 min),只是在短时间内滞留在地表不会形成洪水。但有部分检查井地表积水持续时间会较长,如 22 号和 38 号检查井(接近半小时),虽不会对校园环境造成较大威胁,但应在下次

表 1 典型降雨情景下研究区检查井溢流状况分析

降雨重现期/a	检查井编号	洪峰流量/m <sup>3</sup> /s	总溢流时间/min
1	9	0.106	14
	22	0.133	18
	38	0.080	19
	39	0.026	7
5	3	0.017	6
	7	0.022	5
	8	0.057	6
	12	0.013	4
	9	0.27	25
	22	0.285	28
	38	0.135	29
	39	0.096	16

管道改造时采取相应处理措施,如加大该处管径、增加管道坡度等。分析结果同时发现在暴雨情景下大部分管道满流现象比较严重,说明管道排水负荷已经偏高,在今后该区域进行建设和改造过程中,应该考虑减少硬化面积比例,如可以增加绿地比例、增大透水砖的铺装等,以保证该区域在暴雨期间排水的畅通。

#### 4 结论

利用芝加哥降雨过程线模型将暴雨强度公式转化为典型降雨过程,结合暴雨管理模型,可以计算典型降雨情景下雨水排除系统的检查井溢流、管道满流和系统负荷状况。模拟分析结果可为城市排水管理者提供决策支持,为排水系统的规划设计者提供方案优化调整的依据。

通过对清华大学校内一个研究区域的模拟发现,研究区内雨水排放系统运行状态良好,在 5 年一遇的暴雨情景下能够较好的排放区域内地表径流,但有个别点处(22 号和 38 号检查井)需适当增加管径以更好地提高系统的排水功能。

本研究通过标准的暴雨强度公式快速生成不同重现期和不同雨型的降雨过程线,并利用先进的排水系统模拟模型对区域的排水特征进行模拟分析。该方法具有一定的普遍性,可用于其他研究区域建立排水系统模型并进行降雨情景分析。

#### 参考文献

- 李怀恩,沈晋.非点源污染数学模型.西安:西北工业大学出版社,1996
- 宫莹,阮晓红,胡晓东.我国城市地表水环境非点源污染的研究进展.中国给水排水,2003,19(3):21~23
- 姚雨霖,任周宇,陈忠正,等.城市给水排水.第2版.北京:中国建筑工业出版社,1985
- Rossman L A. Storm water management model quality assurance report, EPA/600/R-06/097, U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, S 2006
- Campbell C W, Sullivan S M. Simulating time-varying cave flow and water levels using the Storm Water Management Model. Engineering Geology, 2002, 65(8): 133~139
- Zaghloul N A, Abu Kiefa M A. Neural network solution of inverse parameters used in the sensitivity-calibration analyses of the SWMM model simulations. Advances in Engineering Software, 2001, 32(7): 587~595
- Burian S J, Streit G E, McPherson T N, et al. Modeling the atmospheric deposition and stormwater washoff of nitrogen compounds. Environmental Modelling & Software, 2001, 16(5): 467~479
- 董欣,陈吉宁,赵冬泉. SWMM 模型在城市排水系统规划中的应用. 给水排水, 2006, 32(5): 106~109
- 任伯帜,邓仁健,李文健. SWMM 模型原理及其在霞凝港区的应用. 水运工程, 2006, (4): 41~44
- 北京市市政工程设计研究总院. 给水排水设计手册 城镇排水. 第2版. 北京:中国建筑工业出版社, 2004
- Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models, Part 1: a discussion of principles. J Hydrol, 1970, 10: 282~290
- Thanapakpawin P L, Richey J, Thomas D E, et al. Effects of landuse change on the hydrologic regime of the Mae Chaem river basin, NW Thailand. Journal of Hydrology, 2007, 334(1-2): 215~230
- Bennis S, Crobeddu E. New runoff simulation model for small urban catchments, Journal of hydrology engineering, 2007, 12(5): 540~544
- 姚雨霖,任周宇,陈忠正,等.城市给水排水.第2版.北京:中国建筑工业出版社, 1985

& 通讯处:100084 清华大学学研大厦 B 座 407  
 电话:(010)62785857  
 E-mail:zdq01@mails.tsinghua.edu.cn  
 收稿日期:2008-02-18