

Analysis of Storm Runoff Simulation in Typical Urban Region of Wuhan Based on SWMM

Lei Yan¹, Lihua Xiong^{1,2}, Jingyun Wang³

¹State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan

²Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan University, Wuhan

³Wuhan Water Resources Development Investment Company, Wuhan

Email: yanl@whu.edu.cn

Received: May 8th, 2014; revised: May 13th, 2014; accepted: May 19th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

With the continuing urbanization, waterlogging problems in Chinese cities become more and more prominent, thus putting big pressures on the urban drainage network. In the urban drainage system design in China, the design recurrence interval of rainfall is often set to be very low, thus urban waterlogging can easily happen once big heavy rainstorm happens. Also, traditional rational formula method is still wildly used to calculate peak flow from rainfall. This article introduces a hydrological model package named SWMM to simulate the rainfall-runoff processes in a typical urban region, named the Chu rivulet, in Wuhan city. Major steps of applying models include the use of GIS to discretize the study area into a number of sub-drainage areas and the extract of the attribute information for each sub-drainage area, the drainage network generalization, and the parameters setting and calibration. In order to analyze the operation conditions of the drainage system, the established model is applied in the study area under the rainfall scenarios with different frequencies. The results show that with the increase of recurrence interval of rainfall, the total runoff and peak flow at the Chu rivulet outlet increase, and the surcharging of the drainage network becomes more and more serious. It is concluded that the designed drainage system can drain away rainwater with recurrence interval of 1 year, but with the increase of recurrence interval of rainfall, the performance of drainage system degrades significantly.

Keywords

Waterlogging, Rainfall-Runoff Simulation, SWMM, Urban Drainage Network, Design Flood Peak

作者简介: 闫磊(1990-), 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源方面研究。

基于SWMM的武汉市典型城区降雨径流模拟分析

闫 磊¹, 熊立华^{1,2}, 王景芸³

¹武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉

²武汉大学水资源安全保障湖北省协同创新中心, 武汉

³武汉水资源发展投资有限公司, 武汉

Email: yanl@whu.edu.cn

收稿日期: 2014年5月8日; 修回日期: 2014年5月13日; 录用日期: 2014年5月19日

摘 要

近年来, 越来越突出的城市内涝问题对城市排水系统规划设计提出了更高的要求。目前我国城市排水系统规划设计中仍然主要以推理公式法计算洪峰流量, 同时市政排水系统的设计重现期也偏低, 一旦发生较大的暴雨, 便可能导致城市内涝现象的发生。本文引进在国内外得到广泛应用的计算机数学模型 SWMM(Storm Water Management Model)进行武汉市典型城区的降雨径流计算。建模步骤包括利用 GIS 进行汇水区的划分和属性数据的提取, 管网系统概化、以及参数设置。应用所构建的模型对不同降雨情景下研究区排水管网运行状况进行了模拟。结果显示, 随着重现期的增加, 沙湖出水口径流总量和洪峰流量增加明显, 同时管网节点溢流和管道超载情况趋于严重。研究区的排水管网系统能够满足设计标准, 顺利的排走1年重现期的暴雨, 但是随着重现期的增加, 管网性能降低明显。

关键词

城市内涝, 降雨径流模拟, SWMM, 城市排水管网, 设计洪峰

1. 引言

近年来, 我国许多城市发生严重内涝, 给人民生活和生产造成了极不利的影响。造成这种现象的原因除了极端天气的频发外, 还因为我国市政排水系统的规划设计中存在的一些问题。比如我国城市排水管网设计标准较低, 一旦发生较大的暴雨, 其雨水流量就会超过城市排水系统的排水能力, 形成内涝。此外, 我国市政规划设计中仍一直采用推理公式法来进行雨水设计流量的计算。近年来随着国内外学者对推理公式局限性的认识以及计算机技术的发展, 推理公式的适用范围已经局限于小型的排水系统[1], 利用计算机数学模型对城市排水系统进行模拟已经成为研究的有效手段[2]。国外研究人员开发了多种城市水文模型来模拟城市径流产生和输送规律, 其中由美国环保署提出的城市雨洪管理模型(SWMM)在国内得到广泛的应用。如任伯帆等[3](2006)通过对长沙市霞凝港区的三场降雨径流过程的模拟, 证明 SWMM 模型在港区小流域的雨洪分析中有较高的精度, 可用于港区雨水排水的径流模拟。丛翔宇等[4](2006)选取北京市典型小区, 建立 SWMM 模型并计算了不同频率设计暴雨下小区排水管网排水效果以及坡面流等情况, 同时进行不同 LID 模拟情景下的暴雨洪水模拟并评价其影响。赵冬泉等[5](2008)在澳门某小区实现了基于 GIS 空间分析技术对 SWMM 城市排水管网模型的快速构建, 并进行了应用和案例

分析。我国最新修订的《室外排水设计规范(GB50014-2006)》[6]按照城镇类型和城区类型,适当的提高了雨水管道的设计重现期,规定了推理公式的适用范围,并建议采用计算机数学模型来进行雨水管网的设计。在这种背景下,本文利用地理信息系统(GIS)对 SWMM 模型进行汇水区域的划分、排水管网空间信息以及模型部分水文数据的提取,经过管网系统概化、参数设置等步骤构建了武汉市典型城区的城市雨洪模型,并对不同频率设计暴雨条件下的研究区排水管网运行状况进行模拟计算,为将来城市区域排水工程规划、设计,改造提供技术支持。

2. SWMM 模型介绍

暴雨洪水管理模型 SWMM 最早于 1971 年由美国环境保护局 EPA(Environmental Protection Agency) 开发。SWMM 是一个基于水动力学的降雨 - 径流模拟模型,它是一个内容相当广泛的城市暴雨径流量、水质模拟和预报模型,既可以用于城市场次洪水研究也可以用于长期连续模拟,也可以对任一时刻每一个子汇水区产生径流的水量和水质,包括流速、径流深、每个管道和管渠的水质情况进行模拟[7]。模型自开发以来,在世界范围内被广泛的应用于城市地区暴雨洪水、合流式管道、污水管道以及其它排水系统的规划和设计。

2.1. 模型结构

SWMM 模型由若干“块”组成,主要包括 5 个计算模块(径流模块、输送模块、扩展输送模块、调蓄/处理模块、接纳水体模块)和 6 个服务模块(执行模块、降雨模块、温度模块、图表模块、统计模块、合并模块)。在实际应用中以上模块可以同时应用,也可以根据需要选取其中的几个应用。每个模块相互联系又具备各自独立的功能,同时其计算结果又被存放在存储设备中供其他模块调用[8],各模块之间的关系结构如图 1 所示。

2.2. 模型原理

SWMM 是一个综合性的数学模型,可以模拟城市降雨径流过程的各个方面,包括地表径流和排水系统中的水流、雨洪的调蓄处理过程。考虑到空间变异性,将整个汇水区划分成若干个子汇水区(汇水区的划分),并根据各子汇水区地表特征(渗透性、洼蓄量)的不同将子汇水区概化为三种类型的地表(图 2)。分别推求三类地表径流过程,然后将它们的径流出流叠加得到子汇水区的径流出流过程线,并作为管网汇流系统的输入,用来推求管道出流过程线。模型的主要物理原理及计算方法如下:

2.2.1. 子汇水区的概化

每个子汇水区被分为三个部分:有洼蓄的不透水地表 A_1 、无洼蓄的不透水地表 A_3 和透水地表 A_2 。

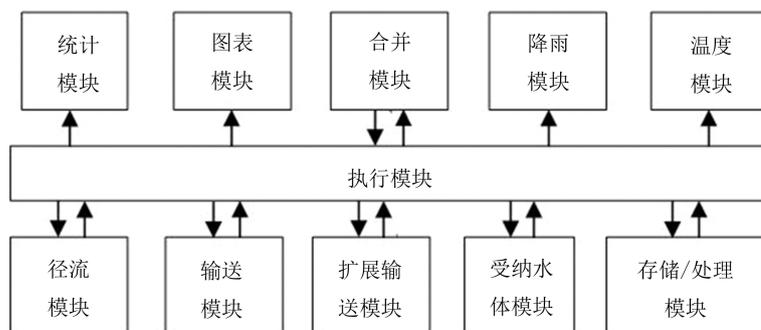


Figure 1. Structure diagram of SWMM model

图 1. SWMM 模型结构示意图

A_2 的宽度等于整个子汇水区的宽度(W)， A_1 、 A_3 的宽度与它们各自的面积占不透水面积的比例成正比。如图 2 所示。

2.2.2. 地表产流计算

城市地表产流计算主要需要确定土壤洼蓄量和下渗损失量。在 SWMM 模型中，初期损失，即降雨初期阶段的填洼、湿润和截留统一用洼蓄水深 d_p 来表示，有洼蓄不透水地表洼蓄水深为 d_{p1} ；透水地表洼蓄水深为 d_{p2} ；无洼蓄不透水地表洼蓄水深为 0。只有当降雨量满足洼蓄水深 d_p 后，产流才会发生。无洼蓄不透水地表 A_3 上的产流等于降雨量($d_p=0$)；有洼蓄不透水地表 A_1 上的产流等于降雨量扣除洼蓄量(d_{p1})；透水地表 A_2 上的产流等于降雨扣除洼蓄量(d_{p2})和入渗损失量。SWMM 模型中提供了霍顿(Horton)模型、格林-安普特(Green-Ampt)模型以及 SCS 曲线数下渗模型来计算入渗量。

2.2.3. 地表汇流计算

如图 3 所示，在进行汇流计算时，将各子汇水区的三类地表均处理为非线性水库，水库容量由各自的洼蓄水深 d_p 决定。以透水地表为例，水库的流入项有降雨和上游子汇水区的出流；流出项包括下渗、蒸发和出流 Q 。水库水深 d 由水量平衡计算得出，并且随着时间不断更新。非线性水库可以通过联立连续方程和曼宁方程求解。

连续方程：

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = A(i - f) - Q \quad (1)$$

式中： $V = A \times d$ ，为地表积水量(m^3)； d 为水深(m)； A 为子汇水区面积(m^2)； i 为降雨强度(m/s)； f 为入渗强度(m/s)； Q 为出流量(m^3/s)。

曼宁方程：

$$Q = W \frac{1.49}{n} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} \quad (2)$$

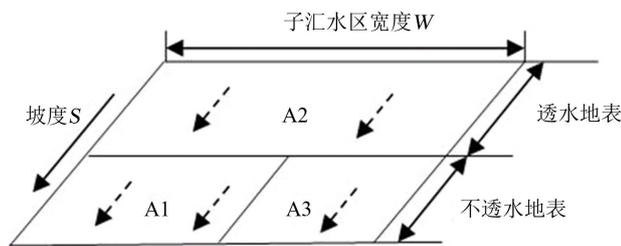


Figure 2. Scheme of subcatchment division
图 2. 子汇水区概化图

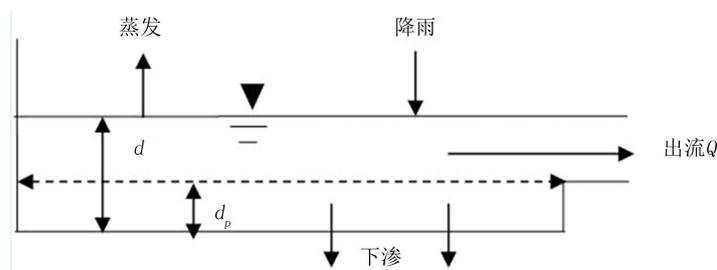


Figure 3. Sketch of the nonlinear reservoir model
图 3. 非线性水库概化图

式中： W 为子汇水区宽度(m)； n 为曼宁糙率系数； d_p 为地表洼蓄水深(mm)； S 为子汇水区地表平均坡度。

无洼蓄不透水地表和有洼蓄不透水地表的求解方法与透水地表的类似。区别在于前一种情况 f 和 d_p 取 0，而后一种情况 f 取 0。同时注意三类地表曼宁系数、宽度的不同。将不同时刻三类地表的出流量进行叠加组合即可得到子汇水区的径流过程线。

2.2.4. 地表汇流计算

降雨流经各子汇水区地表后，立即汇入街道边沟及管道中，在模型中，管网汇流子系统的流量演算可以通过输送模块或扩展的输送模块，采用对质量和动量平衡方程(圣维南方程组)求解来实现。经管网汇流子系统的流量演算后可以得到出口流量过程线，进而可以得到洪峰流量 Q_{max} ，径流总量 Q 。

3. SWMM 模型在武汉市典型城区的建立与应用

3.1. 研究区概况

本文选取武汉市内典型城区—楚河汉街汇水区作为研究区域，研究区位于武汉市武昌区东湖和沙湖之间，内有商业步行街、住宅区、高校、医院、广场、公园、绿地、人工河，土地利用状况复杂。汇水面积 344 公顷，总不透水面积 287 公顷。平均坡度 6.26%，2009 年根据武汉市规划设计研究院制定的《东沙湖连通渠(楚河)修建规划》[9]，对楚河汇水区现状雨水管道进行了改造。研究区雨水管道设计重现期为 1 年，采用雨污分流排水体制。东沙湖地区部分雨水经楚河两岸排水管道收集之后排入楚河，并最终排入沙湖调蓄。另有中北路以西地区雨水经管道收集之后直接排入沙湖，由新生路泵站抽排出江；中北路以东地区雨水汇入水果湖，经东湖、新沟渠、罗家港等泵站抽排出江。研究区雨水管道总长度 10 km 以上。研究区现状土地利用图、管网系统图见图 4、图 5。

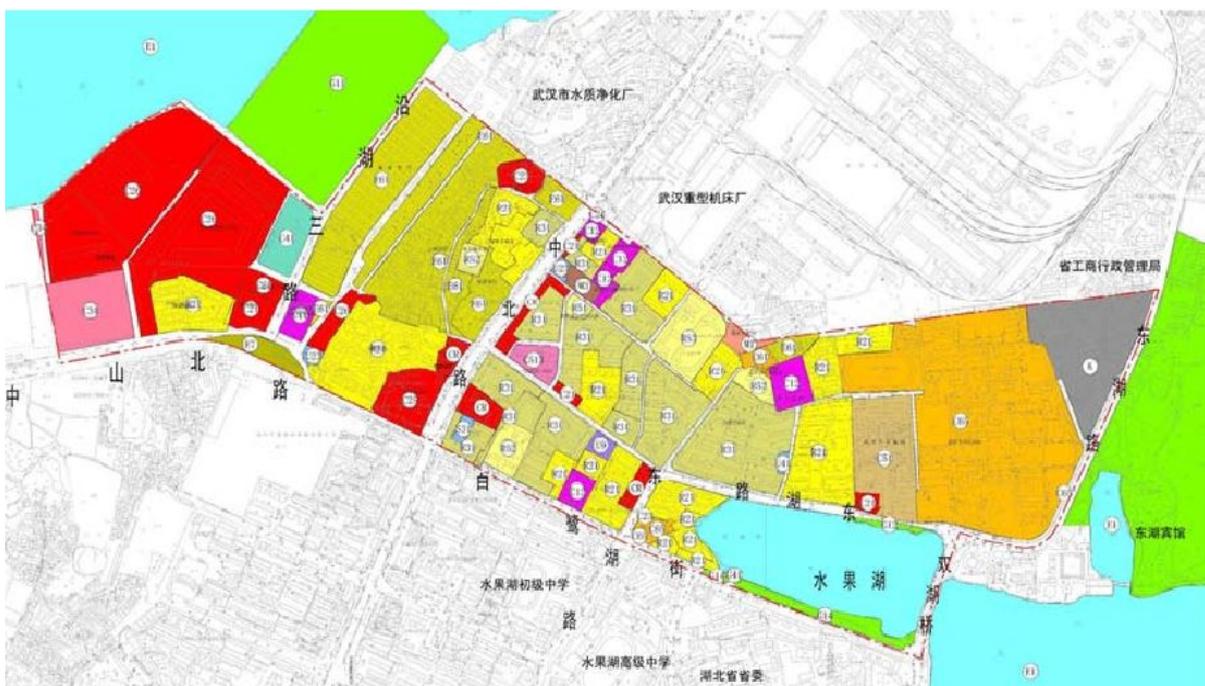


Figure 4. The land-use map of the study area
图 4. 研究区现状土地利用图



Figure 5. Drainage network of the study area

图 5. 研究区雨水系统图

3.2. 建模步骤

3.2.1. 排水管网的概化

以研究区遥感影像图作为工程底图，根据研究区雨水系统图中标注的排水管网布置、管径、流向等信息，在工程中绘制研究区排水管网图，并在管道形状、尺寸具有显著变化处增加节点。管段起始节点的初始高程数据利用 ArcGIS 中的空间分析工具提取，并综合考虑各种市政管线布置和雨水系统图中的管道流向，确定雨水管道的埋深。研究区管网被概化为 52 条管段、51 个节点(雨水口、检查井)以及 7 个出水口。管道断面为圆形，直径在 600 mm 至 1800 mm 之间。根据《楚河排水规划修建说明书》[10]将楚河概化为直角梯形断面，最小底宽 $B = 20\text{ m}$ ，最大水深 2 m，北岸边坡系数为 1:2，南岸为直角水岸。粗糙系数 0.03。如图 6 所示。

3.2.2. 汇水区的划分

在实际建模过程中，子汇水区通常以地形、区块单元及雨水按就近排放的原则通过手工描绘得到，难以获得物理意义较强的参数。考虑到城市排水管道的设计多为根据管道坡度，利用重力原理由高处向低处流动的，所以对已建成的管网系统建立管网模型时，可以基于数字高程模型，使用 ArcGIS 对研究区进行汇水区划分使管网系统的入流量分配更符合实际情况[11]。

本文利用 ArcGIS 拓展工具 Arc Hydro Tools 按照水流的方向进行汇水区划分。然后再考虑到实际的街道分区和管线布置，根据就近排放原则，通过 ArcGIS 的 Editor Tools 对划分后的子汇水区进行调整。这样既考虑到地表坡度的影响，也根据实际情况的不同做出调整和细分。将划分后的汇水区、排水管网、排水节点绘制到工程中。如图 7 所示。

3.2.3. 参数的设置

- 1) 不同类型面积比例确定

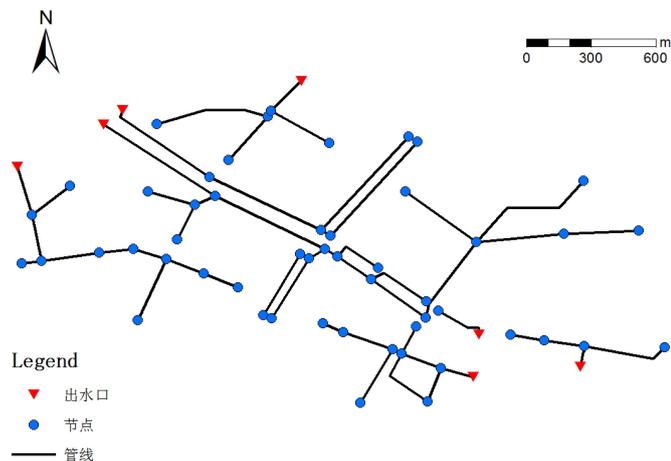


Figure 6. Layout of the extracted drainage network
图 6. 概化后的管网布置图

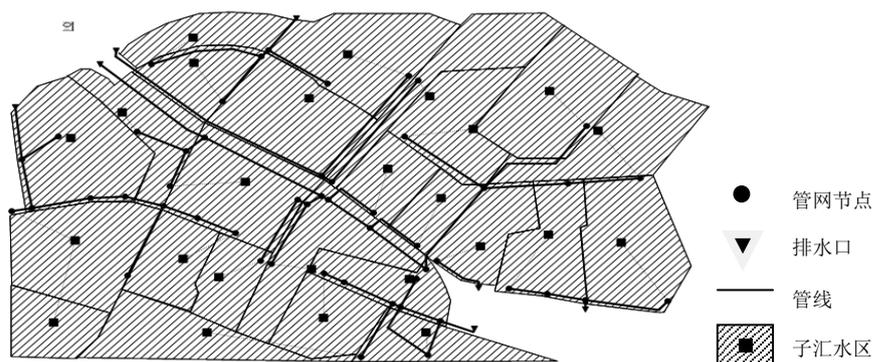


Figure 7. Configuration of the study area
图 7. 研究区 SWMM 模型概化图

根据《武汉市城市总体规划(2010-2020)——主城区用地规划图》[12]、《武汉市 A110105、A110206 局部控制性详细规划》[13]、Google Earth 遥感图确定研究区不透水地表面积所占比例，无洼蓄的不透水地表面积比例采用模型用户手册[14]推荐的工程默认值 25%。

2) 子汇水区平均坡度 S 的确定

平均坡度一般可根据实际勘测的地表标高进行估测，在没有实际测量条件时，子汇水区平均坡度多采用模型推荐的典型城市坡度值，与实际地形情况存在着较大的差异。本文基于研究区数字高程模型，利用 ArcGIS 的坡度分析(slope)和区域统计(zonal statistics)工具，提取子汇水区的平均坡度 S 。

3) 子汇水区宽度 W 的确定

模型采用用户手册推荐的 $W = A/\text{Flow_length}$ 的方法来计算子汇水区宽度。 A 为子汇水区面积，Flow_length 是汇流长度。汇流长度是子汇水区距汇流节点最远处到汇流节点的距离，使用模型中自带测量工具确定。

4) 经验系数的确定

模型中的经验系数主要根据模型用户手册确定，透水地表曼宁系数取 0.24，不透水地表曼宁系数取 0.015，管道粗糙系数取 0.013；透水地表洼地蓄水深 d_{p2} 取 2.5 mm，不透水地表洼地蓄水深 d_{p1} 取 1.52 mm。选取霍顿下渗模型模拟入渗，模型最大下渗速率取 50.8 mm/h，土壤最小入渗速率取为 6.6 mm/h。衰减常

数设为 4。

3.3. 模拟暴雨情景的构建

本文选用在国内外得到广泛应用的芝加哥降雨过程线模型来构建研究区暴雨情景。在我国的市政规划设计中，暴雨强度公式一般采用[15]：

$$\bar{i} = \frac{167B_1(1+C \lg P)}{(t+b)^n} \quad (3)$$

式中： \bar{i} 为平均暴雨强度， mm/min 或者 $\text{L}/(\text{s} \cdot \text{hm}^2)$ ； B_1 为重现期为 1 年的设计降雨雨量； C 为雨量变动参数，反应不同重现期的设计降雨强度变化程度； P 为设计降雨重现期， a ； t 为降雨历时， min ； b, n 为常数，共同反应设计降雨随历时增长其强度递减变化的情况。

对于某一区域给定重现期下式(3)的分子为常数，设为 a ，可得：

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

式中 $i(t)$ 为降雨强度随时间的变化曲线。对式(4)变形后微分可得：

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

芝加哥降雨过程线模型引入雨峰系数 $r(0 < r < 1)$ 来描述在一场降雨事件中降雨峰值发生的时间，雨峰系数将降雨时间序列分为峰前时间序列 $i(t_b)$ 和峰后时间序列 $i(t_a)$ [16]：

峰前上升阶段：

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

峰后下降阶段：

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

根据文献[15]，式(1)中取 $b = 6.37$ 、 $n = 0.604$ 、 $C = 1.58$ 、 $B_1 = 5.299$ 即可得到研究区暴雨强度公式。根据我国雨水管网的设计重现期，本文设计了 $P = 1 \text{ a}$ 、 2 a 、 3 a 、 5 a 、 10 a ，降雨历时为 24 h 的降雨。选取雨峰系数 $r = 0.4$ ，根据式(6)和式(7)进行时程分配。结果见图 8。由暴雨强度公式可知，取 $t = 0$ 即可得到峰值雨强 i_m ，设计暴雨统计见表 1。

3.4. 模拟选项设置

汇流方式选择为动态波，报告时间步长为 1 分钟，雨季径流时间步长为 1 分钟，演算时间步长为 60 秒。其他的选项采用模型默认设置。加载不同的降雨情景，运行模型。根据模型提供的模拟结果报告单，分别对研究区的出水口状态、节点溢流和管道超载等情况进行分析。

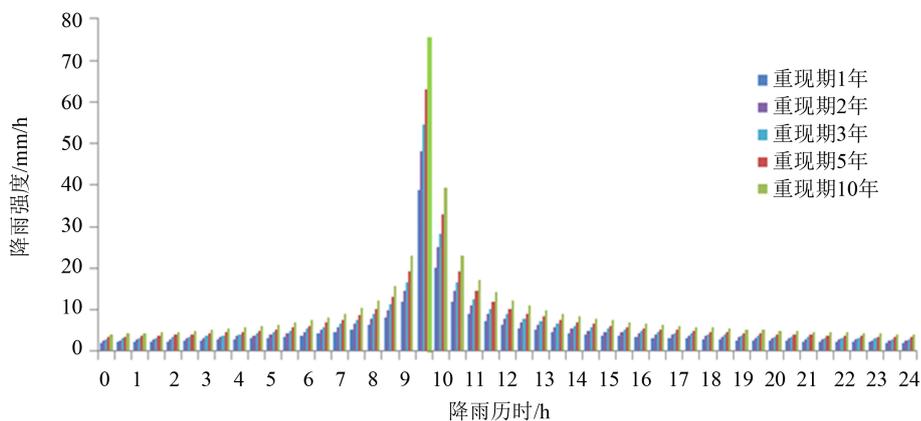


Figure 8. The 24-hour rainfall process for different design frequencies

图 8. 不同重现期下 24 小时降雨时程分配图

Table 1. Statistics of the design rainstorm for different design frequencies

表 1. 不同降雨重现期设计暴雨统计

降雨重现期 P/a	峰值雨强 $i_m/(mm/h)$	平均雨强/(mm/h)	总降雨量/mm
1	38.84	5.02	123.09
2	48.16	6.23	152.64
3	54.47	7.05	172.64
5	63.09	8.16	199.96
10	75.61	9.78	239.63

4. 模拟结果与分析

4.1. 出水口状态

出水口排水状态对上游防洪排涝有重要影响。出水口的状态包括径流总量、洪峰流量、最高水位、流量过程线，通过调用模型统计模块得到。沙湖出水口状态见表 2，流量过程线见图 9。

根据表 2 可知， $P = 1 a$ 时径流总量为 $130.808 m^3$ ，随着重现期的增加出水口径流总量分别比 $P = 1 a$ 时增加 22.3%、37.0%、56.8%、84.7%，增加明显。5 种降雨情景下出水口水深分别为 1.73 m、1.76 m、1.77 m、1.79 m、1.81 m，均小于楚河设计最高水位 2 m 以及堤顶高程 20.65 m，可以保证两岸商业区和道路的安全。

根据《楚河排水修建规划说明书》中雨水工程规划设计标准规定，研究区雨水量的计算采用市政推理公式法，设计重现期为 1 年，楚河设计雨水汇流量为 $9 m^3/s$ 。从模拟结果(表 2、图 9)来看，相同设计频率下($P = 1 a$)楚河沙湖出水口洪峰流量比规划雨水汇流量小 19.8%，当 $P = 2 a$ 时，出水口洪峰流量比规划雨水汇流量小 7.6%，当 $P = 3 a$ 时，出水口洪峰流量等于设计雨水汇流量。随着重现期的增加，当 $P = 5 a$ 、10 a 时沙湖出水口的洪峰流量比设计汇流量分别大 10.0% 和 21.4%。

4.2. 节点溢流情况

从模拟结果来看，在不同的重现期下，研究区内多个节点发生不同程度的溢流现象。随着重现期的增加溢流节点数、溢流率、平均溢流时长以及总溢流量均有不同程度的增加，其中总溢流量增加最为明显，增幅分别为 140%、51%、53%、59%。 $P = 1 a$ 时平均溢流时长不足半小时，不会在地面形成明显的

积水。而 $P=2\text{ a}$ 、 3 a 、 5 a 、 10 a 时节点的平均溢流时长均超过半小时，地表易形成积水，给商业区内行人以及周围居民出行带来不便。节点溢流情况总结见表 3。

4.3. 管道状态模拟

SWMM 模型可以对结果进行动态显示和查询。可以查询所有的模型计算输出结果，也可以对任一时刻管道流量、最大水深、流速；节点的入流量、水深等结果进行动态显示。通过操作地图可视化系统在地图中显示模拟的对象，如图 10 所示，模型显示了在重现期为 1 年的降雨情景中，研究区内管道流量的

Table 2. The outflow results of the Shahu Lake under the rainfall scenarios of different frequency
表 2. 不同降雨重现期下沙湖出水口状态

降雨重现期 P/a	沙湖出水口		
	洪峰流量 $Q_{\max}/(\text{m}^3/\text{s})$	径流总量 Q/m^3	最高水位/m
1	7.207	130.808	1.73
2	8.304	160.060	1.76
3	8.998	179.259	1.77
5	9.904	205.058	1.79
10	10.929	241.642	1.81

Table 3. The summary of overflow situations of drainage nodes under the rainfall of different frequency
表 3. 不同降雨重现期下节点溢流情况总结

降雨重现期 P/a	溢流节点数/个	溢流率/%	平均溢流时长/h	总溢流量/ m^3
1	9	17.65	0.48	10.56
2	14	27.45	0.58	20.48
3	16	31.37	0.69	34.39
5	18	35.29	0.78	53.51
10	19	37.25	0.90	42.05

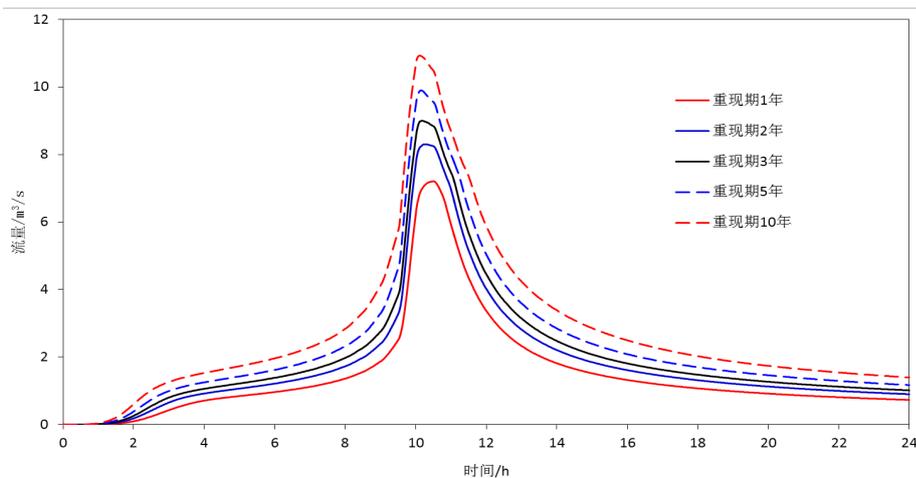


Figure 9. The process of discharge into the Shahu Lake for the rainfall scenarios of different frequency

图 9. 不同重现期下沙湖出水口流量过程线

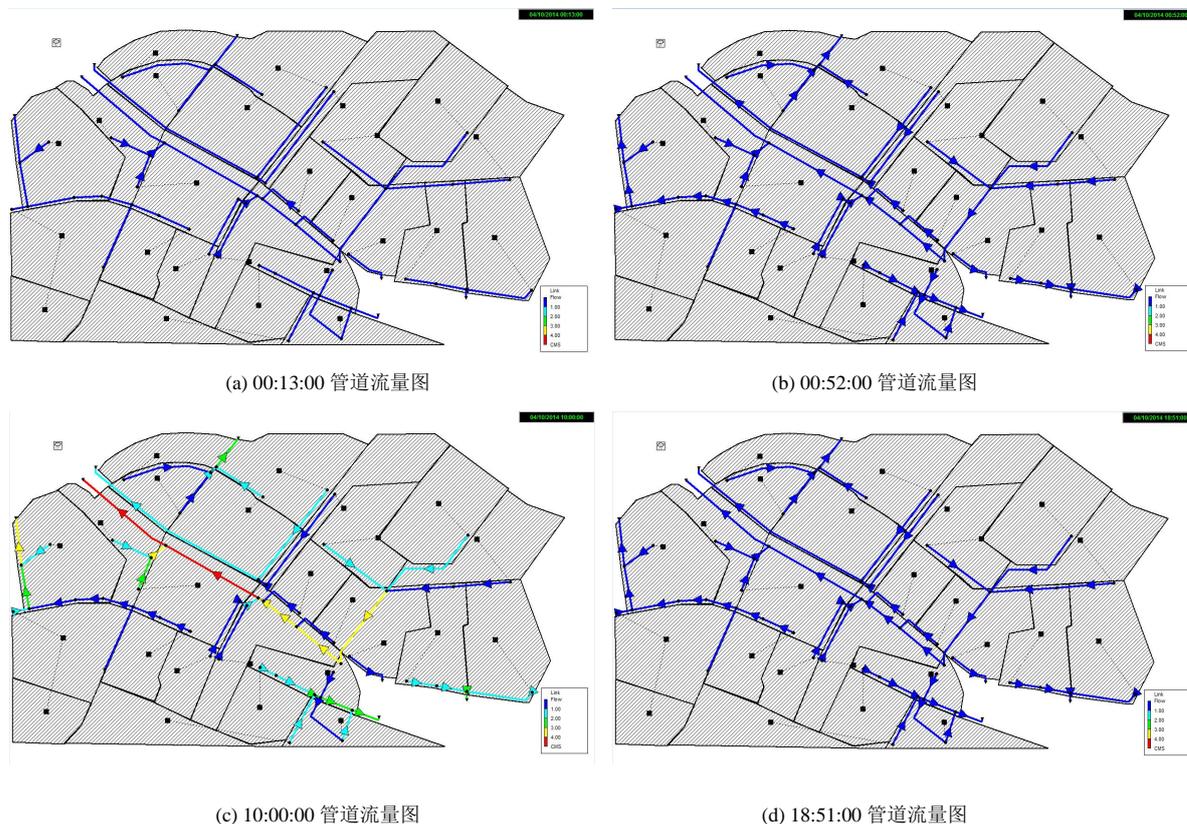


Figure 10. Flow situation in drainage pipes at different times
图 10. 不同时刻管道流量图

变化情况：降雨开始 13 分钟(图 10(a))之后，研究区内的管网开始有雨水汇入(箭头出现表示有雨水汇入管道)，52 分钟时(图 10(b))全汇水区内管道均有雨水汇入，全汇水区参与径流，10 小时(图 10(c))，管网中流量达到最大，之后管网中流量开始回落(图 10(d))。

4.4. 管道超载情况

模拟结果显示，当降雨重现期 $P = 1 a$ 、 $2 a$ 、 $3 a$ 、 $5 a$ 、 $10 a$ 时，研究区内分别有 12、16、20、23、24 条管道发生超载，超载率分别为 23%、31%、38%、44%、46%。当 $P = 1 a$ 时，75% 的超接管段满流历时不足 1 分钟，最长的满流历时为 37 分钟，管网能够顺利地排走汇水区的雨水。随着重现期的增加，超载率和管段满流历时发生不同程度的增加。 $P = 5 a$ 时，57% 的管道满流历时不足 1 分钟，39% 的管道满流历时接近和超过 30 分钟，13% 的超接管段满流历时超过 1 个小时，最大满流历时 72 分钟。特别的当 $P = 10 a$ 时，20% 的管段的满流历时超过了 1 个小时，42% 的管道满流历时超过了半个小时，管道排水能力明显下降，易在地面形成长时间的积水。由以上分析可知，《东沙湖连通渠(楚河)修建规划》中设计的满足重现期为 1 年城市排渍标准的排水管网系统能够顺利地排走设计重现期为 1 年的设计降雨。但是随着重现期的增加，管道的排水能力逐渐降低，当 $P = 5 a$ 、 $10 a$ 时下降较为明显。表 4 列出了研究区内管道的超载情况。

5. 结论

- 1) 基于 SWMM 模型所构建的研究区城市雨洪模型能够对城市降雨径流进行全程动态模拟，并且可

Table 4. Summary of the surcharging situations in drainage pipes
表 4. 管道超载情况总结

管道编号	满流历时/h					管道编号	满流历时/h				
	P = 1 a	P = 2 a	P = 3 a	P = 5 a	P = 10 a		P = 1 a	P = 2 a	P = 3 a	P = 5 a	P = 10 a
5	-	-	-	0.01	0.01	53	0.43	0.81	0.92	1.06	1.37
6	-	-	0.01	0.01	0.31	59	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
9	-	0.01	0.01	0.01	0.01	64	0.26	0.68	0.89	1.01	1.26
21	0.01	0.01	0.03	0.33	0.51	65	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
22	-	-	0.01	0.01	0.15	66	0.01	0.21	0.4	0.59	0.95
41	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	67	-	0.01	0.18	0.38	0.58
42	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	68	-	0.01	0.22	0.42	0.66
46	-	-	-	0.01	0.36	69	-	-	-	0.21	0.45
47	-	-	0.01	0.01	0.01	71	-	-	-	-	0.01
49	-	-	0.28	0.46	0.76	73	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
51	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	75	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
52	0.62	0.9	1.03	1.21	1.51	77	-	0.14	0.35	0.54	0.9

注：“-”表示管道未满流。

以动态显示所有的模拟计算结果，查询任意时刻节点、管网的运行状况，为研究区雨水管网的规划、评价、改造提供技术支持。

2) 研究区雨水管渠设计暴雨采用 1 年一遇标准，虽然能够顺利排走重现期下的雨水，但是随着设计降雨重现期的增加，出水口峰值流量和径流总量都不同程度的增加，节点溢流和管道超载情况趋于严重，排水管网性能下降明显。我国城市化水平不断提高，许多重要道路增加了立交，地下通道等设施，道路交通重要等级显著提升。为了避免将来因为缺乏预知性带来的损失，在今后的城市雨水管网规划中，应当严格按照《室外排水设计规范(GB50014-2006)》提高雨水管网的设计重现期。

3) 由于模型的复杂性，汇水区的划分和研究区的部分参数的确定往往采用的是经验办法或者用户手册的推荐值。利用 GIS 对城市汇水区进行划分和部分关键属性数据增强了模型的物理意义和模拟的准确性，使模型更加接近研究区域的实际情况。

4) 在建立城市雨洪模型的过程中，对研究区基础数据的要求较高，而城市小区域往往缺乏实测降雨资料。采用芝加哥降雨过程线模型，基于当地暴雨强度公式来设计降雨过程，对缺乏降雨资料的地区有一定的借鉴意义。

基金项目

国家自然科学基金重大项目(51190094)；国家自然科学基金项目(51079098)。

参考文献 (References)

- [1] 王宝泉. 浅谈我国城市雨水排水系统中的问题 and 对策[J]. 河北工程技术高等专科学校校报, 2008, 4: 16-19.
WANG Bao-quan. Problems and countermeasures in urban rainwater drainage system in our country. Journal of Hebei Engineering and Technical College, 2008, 4: 16-19. (in Chinese)
- [2] 王海潮, 陈建刚, 孔刚, 等. 基于 GIS 与 RS 技术的 SWMM 构建[J]. 北京水务, 2011, 3: 46-49.
WANG Haic-hao, CHEN Jian-gang, KONG Gang, et al. SWMM construction based on GIS and RS technology. Bei-

- jing Water, 2011, 3: 46-49. (in Chinese)
- [3] 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.
REN Bo-zhi, DENG Ren-jian and LI Wen-jian. Principles of SWMM model and its application in Xianing port area. Port & Waterway Engineering, 2006, 4: 41-44. (in Chinese)
- [4] 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, 4: 64-67.
CONG Xiang-yu, NI Guang-heng, HUI Shi-bo, et al. Simulative analysis on storm flood in typical urban region of Beijing based on SWMM. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 4: 64-67. (in Chinese)
- [5] 赵冬泉, 陈吉宁, 佟庆远, 等. 基于 GIS 构建 SWMM 城市排水管网模型[J]. 中国给水排水, 2008, 7: 88-91.
ZHAO Dong-quan, CHEN Ji-ning, TONG Qing-yuan et al. Construction of SWMM urban drainage network model based on GIS. China Water & Wastewater, 2008, 7: 88-91. (in Chinese)
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 室外排水设计规范 GB 50014-2006(2014 年版)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2002.
The Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of outdoor wastewater engineering (GB 50014-2006), 2014. Beijing: China Planning Press. (in Chinese)
- [7] 徐宗学, 等. 水文模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
XU Zong-xue, et al. Hydrological models. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [8] 贾仰文, 王浩, 倪广恒, 等. 分布式流域水文模型原理与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
Jia Yang-wen, Wang Hao, Ni Guang-heng, et al. Principles and practice of distributed hydrological models for river basins. Beijing: China Water & Power Press, 2005. (in Chinese)
- [9] 武汉市规划设计研究院. 东沙连通渠(楚河)修建规划, 2009.
Wuhan Planning and Design Institute. Canal construction plan linking East Lake and Shahu Lake, 2009. (in Chinese)
- [10] 武汉市规划设计研究院. 楚河排水规划修建说明书, 2009.
Wuhan Planning and Design Institute. Construction plan direction of drainage system in Chu rivulet, 2009. (in Chinese)
- [11] 谢莹莹. 城市排水管网系统模拟方法和应用[D]. 上海: 同济大学, 2007.
XIE Ying-ying. The method and application of urban sewer system simulation. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [12] 武汉国土资源和规划局. 武汉市城市总体规划(2010-2020)[URL], 2011. <http://www.wpl.gov.cn/>
Wuhan Land Resources and Planning Bureau. Comprehensive planning of Wuhan (2010-2020), 2011. <http://www.wpl.gov.cn/> (in Chinese)
- [13] 武汉国土资源和规划局. 武汉市 A110105、A110206 局部控制性详细规划[URL], 2009. <http://www.wpl.gov.cn/>
Wuhan Land Resources and Planning Bureau. Local regulatory detailed planning of Wuhan (A110105, A110206), 2009. <http://www.wpl.gov.cn/> (in Chinese)
- [14] ROSSMAN, L. A. (2010) Storm water management model user's manual (Version 5.0). United States: Environmental Protection Agency.
- [15] 北京市市政工程设计研究总院. 给水排水设计手册(第二册)城镇排水. 第 2 版, 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute. Water supply & drainage design handbook (book two) urban drainage. 2nd Edition, Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (in Chinese)
- [16] 张大伟, 赵冬泉, 陈吉宁, 等. 芝加哥降雨过程线模型在排水系统模拟中的应用[J]. 给水排水, 2008, S1: 354-357.
ZHANG Da-wei, ZHAO Dong-quan, CHEN Ji-ning, et al. Application of Chicago approach in urban drainage network modeling. Water & Wastewater Engineering, 2008, S1: 354-357. (in Chinese)