

# Study on Urban Storm Water Modeling at Jinan City Using SWMM Model\*

Haijun Yu, Guoru Huang<sup>#</sup>, Chuanhao Wu

School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou  
Email: <sup>#</sup>huanggr@scut.edu.cn

Received: Jul. 21<sup>st</sup>, 2012; revised: Aug. 13<sup>th</sup>, 2012; accepted: Aug. 25<sup>th</sup>, 2012

**Abstract:** In accordance with characteristic of Jinan city, the urban storm-flood simulation model for Jinan city was established based on Storm Water Management Model (SWMM). The model is tested by simulating the flood events between 2006 and 2007. The results showed that the established model has satisfied precision and it can be used in simulation of urban storm-flood and provide technique support for flood protection. By using the model and design storms in Jinan City, drainage system is verified and evaluated and the rationality of the recent urban flood control planning projects is analyzed.

**Keywords:** Urban Flood Modeling; SWMM; Jinan City; Piedmont City

## 基于 SWMM 模型的济南城市雨洪模拟研究\*

喻海军, 黄国如<sup>#</sup>, 武传号

华南理工大学土木与交通学院, 广州  
Email: <sup>#</sup>huanggr@scut.edu.cn

收稿日期: 2012 年 7 月 21 日; 修回日期: 2012 年 8 月 13 日; 录用日期: 2012 年 8 月 25 日

**摘要:** 在城市尺度上构建了基于 SWMM 模型的济南市城市雨洪模型, 利用 2006 年和 2007 年暴雨洪水资料对该模型进行验证, 结果表明所构建的模型具有良好的精度和可靠性, 能为济南市防洪决策提供科学依据。运用构建的城市雨洪模型对济南市城市排水系统进行检验与评价, 并对济南市应对突发性暴雨防灾减灾规划的合理性进行剖析, 以检验该模型在城市雨洪防灾减灾分析评价以及规划实践中的应用效果。

**关键词:** 城市雨洪模型; SWMM 模型; 济南市; 山前平原型城市

### 1. 引言

城市快速发展使得人口、产业、财富快速地向城市地区聚集, 在相同的洪涝灾害条件下, 城市洪涝灾害的损失明显比以前增加, 间接损失和社会影响不断增大。与此同时, 由于人类活动、气候变化、人口增长等原因, 城市暴雨洪水的出现频率与潜在风险也在

不断增大。最近几十年济南市城市化进程明显加快, 使得下垫面发生较大变化, 不透水面积随之增加, 暴雨洪水特性发生了显著变化。2007 年 7 月 18 日, 济南市遭遇了有气象记录以来最大的暴雨袭击, 引发了特大暴雨洪水灾害, 造成了惨重的人员伤亡和巨大的经济损失。这次特大暴雨由于降雨强度大、历时短, 雨量主要集中在城区, 且市区南部汇水面积较大、坡度较陡, 导致洪水以很快的速度沿坡向汇集, 形成类似于山洪性质的街巷洪水, 而市区北部地势低洼、积

\*基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费资助项目(200801033)。

<sup>#</sup>通讯作者。

作者简介: 喻海军(1988-), 湖北人, 博士生, 主要从事水文水资源研究。

水严重,形成了南冲北淹的局面。因此,城市化的水文效应与山前平原型城市特有的浅碟状地形是济南“7.18”特大洪涝灾害的两个主要成因<sup>[1]</sup>。

济南市地处鲁中南低山丘陵与鲁西北冲积平原的交接带上,地势南高北低,属于典型的山前平原型城市。与一般城市相比,山前平原型城市还存在着山洪灾害问题,面对高强度降雨,其受灾更频繁、损失更大。因此,对济南市暴雨洪水机理进行研究以及进行洪水预报预警具有重要的现实意义,建立适合济南市的城市雨洪模型对山前平原型城市雨洪模型的构建也具有指导意义。在国内外众多的城市雨洪模型中,SWMM模型比较适用于水文水力条件比较复杂、以管渠排水为主的市区,在国内外许多地区得到了广泛的应用<sup>[2-8]</sup>。在以往研究中,多将SWMM模型应用于城市小型排水区或者实验区,在大尺度大范围上应用的成果并不多见,本文尝试将SWMM模型引入到城市尺度上构建济南市雨洪模型,验证模型的可靠性与适用性,并将其应用于济南市市政规划和防洪工程评价中。

## 2. SWMM 模型简介

SWMM模型为20世纪70年代美国环保局为设计与管理城市雨洪而研制开发的降雨径流模型,已在世界范围内被广泛地应用于城市暴雨洪水、排污管道及其它排水系统的规划、设计和评估,模型最新版本为5.0,由水文、水动力及水质三部分组成,可以完整地模拟城市降雨径流和污染物运动过程<sup>[4,5]</sup>。

考虑到空间变异性,SWMM模型将计算区域划分成若干个子流域,分别计算径流过程,并通过流量演算方法将各子流域的出流组合起来。根据不同的地表特性,各子流域被概化成不透水面积和透水面积两部分,其中不透水区又划分为有滞蓄库容的不透水面积和无滞蓄库容的不透水面积。

SWMM模型中,各子流域产流计算分3个部分:无滞蓄库容不透水面积上的产流等于其上的降雨量减去蒸发损失;有滞蓄库容不透水面积上的产流等于其上的降雨量减去注蓄量;透水面积上的产流不仅要扣除注蓄量,还要扣除下渗引起的初损。三种类型地表面单独进行产流计算,子流域出流量等于三个部分出流量之和。地表汇流计算采用非线性水库模型,即联

立求解连续方程和曼宁方程。

SWMM模型提供三种方法用于连接管道的汇流计算:恒定流法、运动波法和动力波法。恒定流法假定在每一个计算时段流动都是恒定和均匀的,运动波法可以模拟管渠中水流的空间和时间变化,动力波法则通过求解完整的圣维南方程组来进行汇流计算,是最准确也是最复杂的方法。这三种方法中,只有动力波法可以考虑管渠的蓄变、回水、入口及出口损失、逆流和有压流动。

## 3. 济南城市雨洪模型构建

### 3.1. 研究区域概化

SWMM模型采用松散型分布式物理模型思想构建,数字化的下垫面是模型计算的核心要素。下垫面数字化可分为子流域划分、子流域信息提取及概化、排水系统信息提取及概化三个步骤。本文的研究区域为济南市黄台桥水文站以上的市区及地表分水线以内的近郊区,控制面积约为403 km<sup>2</sup>。

借助GIS技术能够实现子流域自动划分以及属性数据自动提取,但由于划分技术以及数据精度等限制,基于GIS的自动划分较之传统人工方法仍有差距<sup>[6,7]</sup>。本文采取自动划分和人工方法相结合进行子流域划分,根据资料详尽程度与质量好坏,子流域划分时对济南市区及近郊区采取不同策略,共划分子流域827个。

SWMM模型中反映子流域特性、具有空间特征的属性信息包括汇水区面积、不透水率、平均坡度以及漫流宽度等,其中子流域的汇水面积在子流域划分时确定。子流域的不透水率根据资料情况,市区部分根据1:10,000济南市区图提取,近郊区部分根据济南市卫星影像图提取。为简化数据处理及输入,将提取的子流域不透水率进行分级处理,级差为5%,结果见图1。运用ArcGIS的空间分析功能提取子流域平均坡度,将提取后的平均坡度进行分级处理,结果见图2。分级处理结果显示概化后的研究区域地形基本符合济南市地形走势,可信度较高。由于测量技术限制,流长难以精确获取<sup>[5,8]</sup>,故将子流域漫流宽度作为模型率定参数。

城市排水系统是由节点连接而成的排水通道(管道、河道、沟渠等)形成的网络,在排水通道形状、

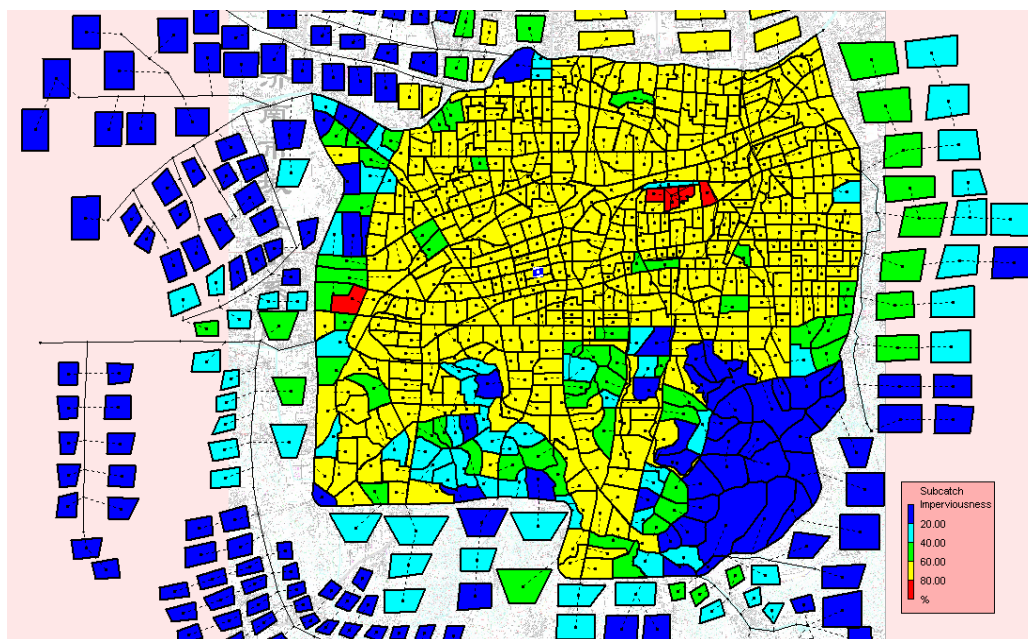


Figure 1. The classification result of impervious surface  
图 1. 子流域不透水率分级处理结果

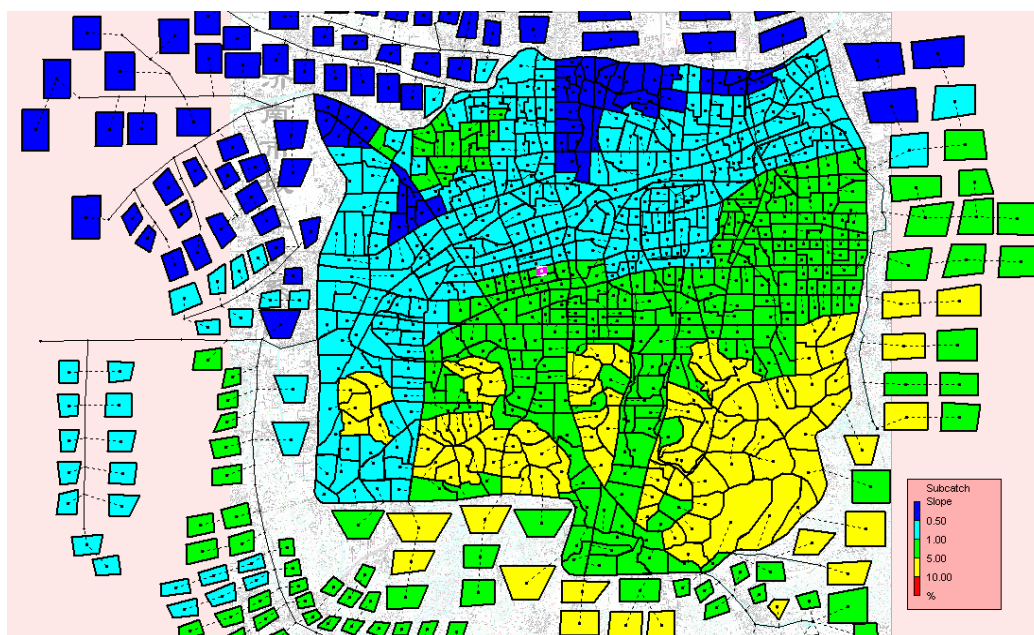


Figure 2. The classification result of sub-catchment average slope  
图 2. 子流域平均坡度分级处理结果

尺寸、坡度或糙率等有显著变化的地方, 设置实际或假设的节点。通常情况下, 实际排水通道都极为复杂, 不可能也不需要完整、精确地模拟一个大的排水区内的所有排水通道。概化时只保留较大的排水通道, 将串联的短通道合并成较长的通道, 合并后的通道采用平均坡度和统一断面进行模拟。基于以上原则, 研究

区内共划分节点 941 个、排水管道 1518 条。研究区域子流域划分及排水系统概化情况如图 3 所示。

### 3.2. 模型参数率定

SWMM 模型需要率定的参数主要有地表注蓄深、地表曼宁系数、排水通道曼宁系数、子流域漫流宽度、

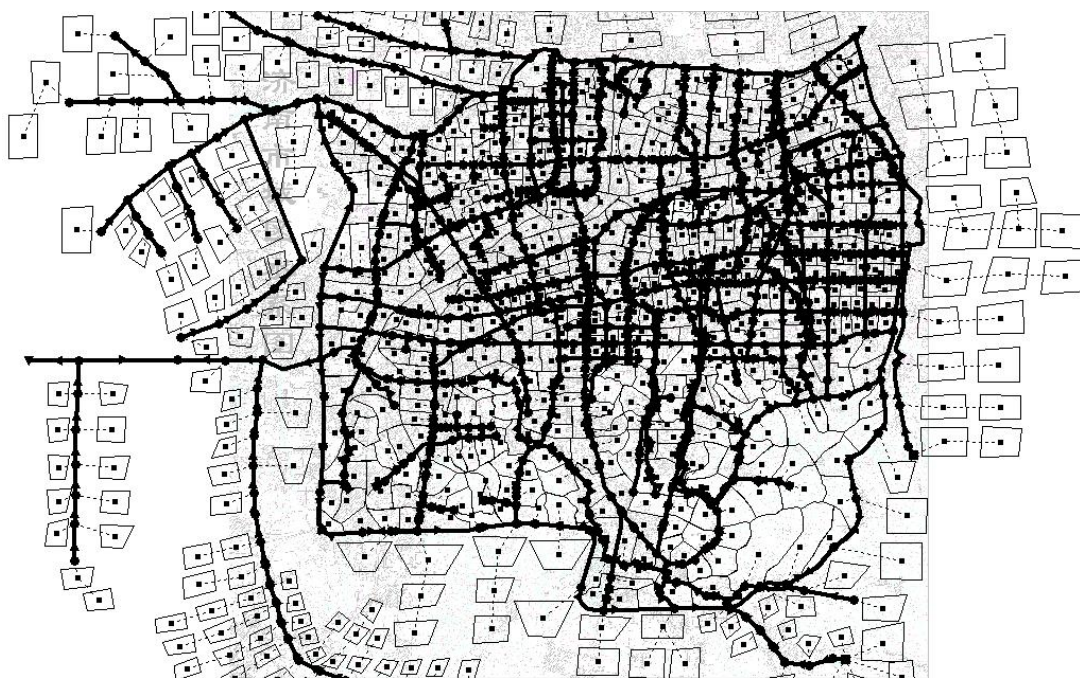


Figure 3. The regularization result of land use in study area  
图 3. 研究区域下垫面概化结果

下渗参数、日蒸发参数等。对于给定了取值范围的参数, 为了提高调参的效率, 选取与济南市地理位置相近的天津市和北京市作为参照区域<sup>[2,3]</sup>, 结合两市的参数结果对参数组合进行参数预估, 并在此基础上进行参数调试。济南市黄台桥水文站以上的市区及地表分水线以内的近郊区构成一个封闭流域, 这为模型参数校核和精度验证提供了条件。本文使用济南市 1998 至 2003 年 6 年间的 10 场暴雨洪水率定模型参数, 其中与子流域特性相关的几个参数率定结果见表 1。

### 3.3. 模型参数校核

采用济南市 2006 年和 2007 年最大 5 场暴雨洪水对模型进行验证, 模拟结果如表 2 和图 4~图 7 所示。

由表 2 可知, 模型模拟值与实测值较为接近, 径流量相对误差皆在 20% 以内, 从暴雨洪水过程来看也符合流域产汇流规律, 这说明模型基本符合济南市暴雨洪水特征。但洪峰流量、暴雨洪水模拟过程还存在一定偏差, 产生误差的可能原因有:

#### 1) 模型自身原因

SWMM 模型采用松散型分布式物理模型思想构建模型, 在概化过程中, 存在模型结构误差。在济南市下垫面数字化尤其是子流域划分过程中, 存在着较

强的人为性及不确定性。另外, 子流域上降雨资料输入虽然考虑了空间差异性, 但由于模型功能所限, 难以真实地反映降雨空间梯度。

#### 2) 初始条件及边界条件原因

模型初始条件仅考虑小清河干流初始水深, 其他河流初始水深假设为零, 这点与实际情况有出入; 对基流、日常生活排水、泉水、黄河引流等在睦里闸处采取概化处理也没有反映真实情况; 下边界采用黄台桥水文站实测水位序列, 由于实测资料及初始条件设置等误差, 同步性受影响。

#### 3) 济南市市区行洪的复杂性

济南市排水系统既有地下管网、人工河渠, 也有天然山洪性河道, 断面尺寸及形式多样化, 特大暴雨时还存在马路行洪问题; 排洪河道存在着垃圾堆积、泥沙淤积、盲目棚盖等阻水现象; 各排洪河道入小清河处均设有水闸, 部分设有排涝泵站, 排洪受人为影响较大; 城市化进程中的土地平整等改变了原有的汇水路径。以上这些都给降雨径流量分析带来了困难。

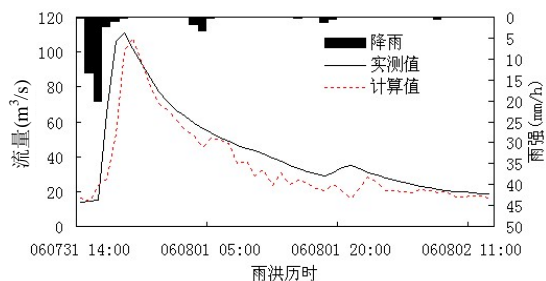
总体上讲, 基于 SWMM 模型构建的济南市雨洪模型模拟值与实测值符合径流总量模拟的精度要求, 且模拟洪水过程线与实测洪水过程线比较吻合, 说明模型较为可靠, 可用于济南市防洪排涝实践。

**Table 1. Calibration result of parameters associated with sub catchments**  
**表 1. 与子流域特性相关参数率定结果**

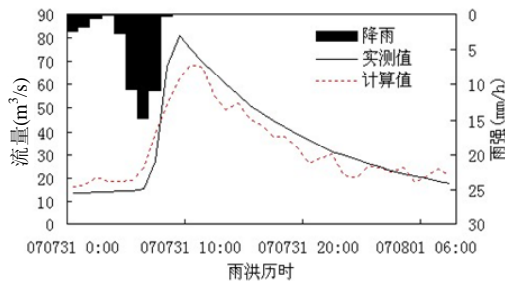
漫流宽度 (m)	地表曼宁糙率		洼蓄深 (mm)		Horton 公式参数		
	不透水	透水	不透水	透水	土壤初始下渗率 (mm/h)	下渗率 (mm/h)	下渗衰减系数 ( $h^{-1}$ )
700	0.017	0.5	3	13	103.81	11.44	2.75

**Table 2. Comparison between monitored and simulated hydrograph characteristics**  
**表 2. 模拟与实测值比较**

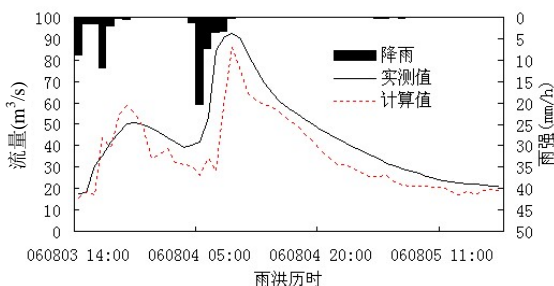
洪号	降雨量 (mm)	模拟径流总量 ( $m^3$ )	实测径流总量 ( $m^3$ )	径流量相对误差 (%)
20060731	45.4	6,066,720	7,301,440	-16.9
20060803	63.8	6,775,578	8,267,369	-18.0
20070718	147.3	16,229,196	17,050,704	-4.8
20070731	44.5	3,835,368	4,113,820	-6.8
20070809	77.4	7,316,208	8,727,265	-16.2



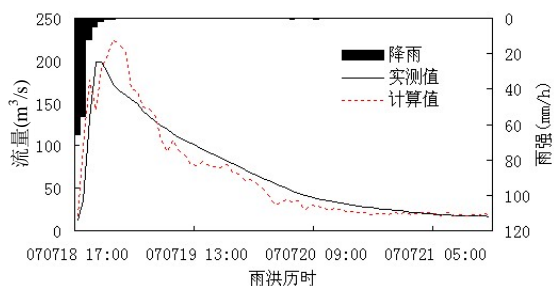
**Figure 4. Recorded and simulated hydrograph at 20060731 storm event**  
**图 4. 20060731 次暴雨洪水情况**



**Figure 7. Recorded and simulated hydrograph at 20070731 storm event**  
**图 7. 20070731 次暴雨洪水情况**



**Figure 5. Recorded and simulated hydrograph at 20060803 storm event**  
**图 5. 20060803 次暴雨洪水情况**



**Figure 6. Recorded and simulated hydrograph at 20070718 storm event**  
**图 6. 20070718 次暴雨洪水情况**

## 4. 模型实际应用与分析

利用构建的 SWMM 模型对济南市城市排水系统进行检验与评价, 并对济南市应对突发性暴雨防灾减灾规划的合理性进行剖析, 以检验该模型在城市雨洪防灾减灾分析评价以及规划实践中的应用效果, 从而进一步证明模型的可靠性以及在城市防洪排涝规划实践中的重要作用。

### 4.1. 排水系统评估与盲点标识

通过模拟计算不同设计暴雨条件下济南市城市排水系统的运行状况, 标识出不同降雨重现期下最有可能发生洪水的地区, 为济南市城市雨水排水系统改扩建提供指导。济南市城市设计暴雨由在国内外均有广泛应用的芝加哥雨型和济南市城市暴雨强度公式确定。

模型中排水通道分为地下管道、河渠以及路网, 总排水通道数为 1518 条, 其中: 地下管道 400 条, 河渠 493 条, 道路排水通道 625 条。不同重现期下排水通道出现过载情况统计见表 3。

**Table 3. Statistics of overload drainage channels under different return period**

**表 3. 不同重现期下排水通道超载情况统计(单位: 条)**

重现期	超载总数	地下管道	河渠	路网	重现期	超载总数	地下管道	河渠	路网
0.25-yr	455	358	60	37	5-yr	719	400	125	194
0.5-yr	536	378	82	76	10-yr	788	400	145	243
1-yr	596	384	102	110	20-yr	847	400	167	280

根据子流域划分及排水系统布置情况, 本模型概化后的排水节点总数为 941 个, 模型通过排水节点的淹没情况来反映不同重现期下地面的淹没情况, 节点淹没情况统计结果见表 4。

对不同重现期下济南市排水通道超载情况及地表淹没情况进行统计分析可发现以下几个特点: 1) 随着降雨量级的增大, 受灾情况增大; 2) 在 0.25 年一遇的降雨情景下, 地下管道的超载率达到 89.5%, 5 年一遇的降雨情景下, 管道全部达到满载, 出现这种现象的原因除了城市排水管网设计标准低、管道淤积外, 还与南部山区容易形成马路行洪有关; 3) 相比于管网, 河渠的超载率不高, 在 20 年一遇的降雨情景下, 超载率为 33.9%, 超载的多为与城市河道相连的渠道及暗涵, 城区河道除了小清河出口处以及大明湖附近少部分出现过载外, 其余均未超过排水能力; 4) 随着降雨量级增大, 道路超载增幅明显, 这是道路下排水管网超载所致。

根据模拟结果, 济南市排水瓶颈在于排水管网以及市区的部分沟渠, 排涝重点关注区域为小清河附近低洼区、大明湖附近以及山区河道入市区处。瓶颈的解除除了实施管网、沟渠改造外, 还要注意南部山区的水土保持以及进行必要的拦截工程。上述分析结果与济南市实际情况较为吻合, 说明本研究所构建的城市雨洪模型较为可靠, 能应用于济南市防洪排涝实践中。

**Table 4. Statistics of flooded nodes under different return period**

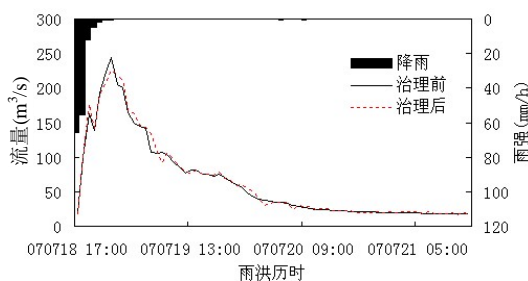
**表 4. 不同重现期下地表淹没情况统计**

重现期	受淹总数(个)	占总节点数百分比(%)	重现期	受淹总数(个)	占总节点数百分比(%)
0.25-yr	59	6.3	5-yr	226	24.0
0.5-yr	95	10.1	10-yr	279	29.6
1-yr	139	14.8	20-yr	332	35.3

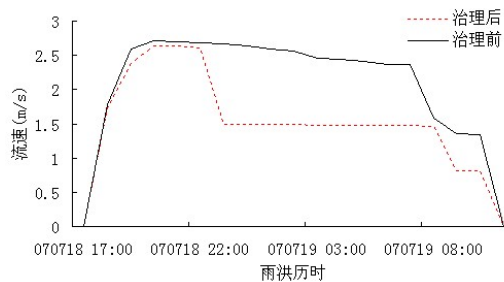
## 4.2. 防灾减灾规划合理性分析

为应对突发性暴雨洪水灾害, 济南市完善城区防洪工程体系的基本思路为分洪、扩挖、滞洪、拦蓄, 具体工程措施主要包括腊山分洪工程、小清河干流治理工程、小李家滞洪区工程、南部山区治理工程等<sup>[9]</sup>。为验证济南市应对突发性暴雨洪水防灾减灾规划的合理性, 在济南市城市雨洪模型的基础上, 根据防灾减灾规划中具体工程情况对模型进行改进, 并应用于 20070718 次暴雨洪水情景, 通过对比黄台桥水文站处流量过程、地表淹没情况、路面流速情况, 检验防灾减灾规划效果。对比结果见图 8~图 11。

根据模型计算结果, 治理后黄台桥处过洪量为 15,743,556 m<sup>3</sup>, 与治理前 16,229,196 m<sup>3</sup> 相比减少 3.0%, 由对比结果可见, 工程实施后能有效地减少小清河的行洪洪量, 有利于济南市城区内涝排除; 从城区地表排水节点的淹没情况以及路面行洪流速情况均可见城区地表的受灾情况有所缓解。工程实施后仍存在路面淹没及马路行洪的现象的原因主要有两点: 1) 城区排水管网标准偏低; 2) 20070718 次暴雨洪水的量级较大, 理论概率超 200 年一遇。以上分析说明了济南市应对突发性暴雨洪水防灾减灾规划较为合理, 能有效地缓解城区的受灾情况。



**Figure 8. Flow changes at Huangtaiqiao hydrological station**  
**图 8. 治理前后黄台桥水文站流量过程对比**



**Figure 9. Flow velocity changes at Yingxiongshan road**  
**图 9. 治理前后英雄山路路面流速对比**

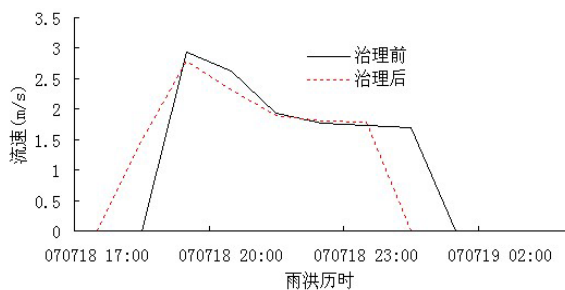


Figure 10. Flow velocity changes at Shungeng road  
图 10. 治理前后舜耕路路面流速对比

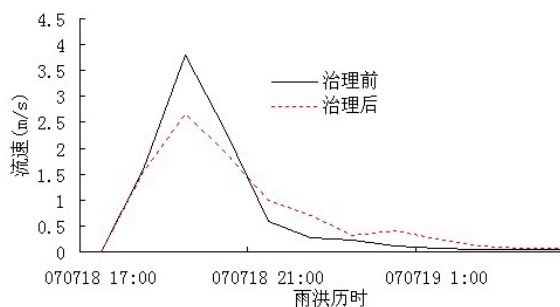


Figure 11. Flow velocity changes at Erhuandong road  
图 11. 治理前后二环东路路面流速对比

## 5. 结论

1) 针对济南市山前平原型城市的特点, 基于 SWMM 模型构建了济南市城市雨洪模型, 并验证了模型的可靠性与适用性。模拟结果表明模型具有良好精度, 可用于济南市防洪排涝实践, 并为其它山前平原型城市雨洪模型构建提供参考。

2) 利用构建的模型和设计暴雨对济南市排水系统健康进行诊断, 分析出济南市城市雨水排水特征, 标识出济南市城市排水瓶颈, 并提出了必要的解决方案。分析表明, 济南市目前的排水管网比较脆弱, 需要进行相应改善。

3) 在对所建立模型进行适当改进后, 对济南市暴雨防灾减灾规划的合理性进行了分析, 工程前后结果对比表明济南市应对突发性暴雨洪水防灾减灾规划

较为合理, 能有效地缓解城区的受灾情况。

## 参考文献 (References)

- [1] 陈淑芬, 张克峰, 汪峰. 济南市“7.18”严重洪涝灾害成因分析[J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2008, 23(4): 81-82.  
CHEN Shufen, ZHANG Kefeng and WANG Feng. Analysis the causes of the grievous flood disaster on July 18 in Jinan. Journal of Shandong Normal University, 2008, 23(4): 81-82. (in Chinese)
- [2] 刘俊, 徐向阳. 城市雨洪模型在天津市排水分析计算中的应用[J]. 海河水利, 2001, 1: 9-11.  
LIU Jun, XU Xiangyang. Application of urban storm water model in drainage analysis and calculation of Tianjin urban area. Haihe Water Resources, 2001, 1: 9-11. (in Chinese)
- [3] 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.  
CONG Xiangyu, NI Guangheng, HUI Shibo, et al. Simulative analysis on storm flood in typical urban region of Beijing based on SWMM. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 37(4): 64-67. (in Chinese)
- [4] ROSSMAN, L. A. Storm water management model: User's manual Version5.0.  
[http://www.epa.gov/ednrmrl/models/swmm/epaswmm5\\_user\\_manual.pdf](http://www.epa.gov/ednrmrl/models/swmm/epaswmm5_user_manual.pdf)
- [5] JORGE, G., LARRY, A. R. and JENNIFER, D. Storm water management model: Applications manual.  
[http://www.epa.gov/ednrmrl/models/swmm/epaswmm5\\_apps\\_manual.pdf](http://www.epa.gov/ednrmrl/models/swmm/epaswmm5_apps_manual.pdf)
- [6] 张书亮, 干嘉彦, 曾巧玲, 等. GIS 支持下的城市雨水出水口汇水区自动划分研究[J]. 水利学报, 2007, 38(3): 325-329.  
ZHANG Shuliang, GAN Jiayan, ZENG Qiaoling, et al. Automatic compartmentalization of urban rainwater catchments on water outlet supported by GIS technology. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(3): 325-329. (in Chinese)
- [7] 赵东泉, 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, 24(7): 88-91.  
ZHAO Dongquan, CHEN Jining, TONG Qingyuan, et al. Construction of SWMM urban drainage network model based on GIS. China Water & Wastewater, 2008, 24(7): 88-91. (in Chinese)
- [8] 王浩昌, 杜鹏飞, 赵东泉, 等. 城市降雨径流模型参数全局灵敏度分析[J]. 中国环境科学, 2008, 28(8): 725-729.  
WANG Haochang, DU Pengfei, ZHAO Dongquan, et al. Global sensitivity analysis for urban rainfall-runoff model. China Environmental Science, 2008, 28(8): 725-729. (in Chinese)
- [9] 孟庆斌, 曹升乐, 赵承忠. 济南防洪实践与探索[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.  
MENG Qingbin, CAO Shengyue and ZHAO Chengzhong. Practice and exploration of Jinan flood protection. Beijing: China Waterpower Press, 2008. (in Chinese)