

基于SWMM模型的快速城市化建成区内涝及面源污染模拟研究

侯萌萌, 吴属连, 赵建成, 黄 静, 朱柏露, 余欣童

深圳市源清环境技术服务有限公司, 广东 深圳

收稿日期: 2023年3月5日; 录用日期: 2023年4月6日; 发布日期: 2023年4月13日

摘 要

随着城市化进程的加快, 降雨径流产生的城市内涝及径流污染问题日益凸显, 降雨径流的研究对城市规划建设提供科学依据。本研究应用SWMM模型, 以深圳市宝安区前海片区为研究区域, 构建符合研究区域实际情况的降雨模型, 模拟不同重现期下降雨径流情况及径流污染产生和分布情况。结果表明, 随着降雨量的不断增加, 地表径流量、洪峰流量逐渐增加, 产生洪峰流量的时间逐渐提前, 径流系数增加, 且增加幅度有逐渐减小的趋势。此外, 随着降雨量的不断增加, 由于冲刷产生的径流污染不断增加, 城市接纳水体的承污压力不断加大。研究结果表明了不同重现期下城市内涝及径流污染的实际情况, 对城市内涝治理及径流污染控制有重要意义。

关键词

径流污染, SWMM模型, 洪峰流量, 城市内涝

Simulation of Waterlogging and Non-Point Source Pollution in Rapid Urbanization Built-Up Area Based on SWMM Model

Mengmeng Hou, Shulian Wu, Jiancheng Zhao, Jing Huang, Bailu Zhu, Xintong Yu

Shenzhen Yuanqing Environmental Technology Service Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

Received: Mar. 5th, 2023; accepted: Apr. 6th, 2023; published: Apr. 13th, 2023

Abstract

With the acceleration of urbanization, urban waterlogging and runoff pollution have become in-

文章引用: 侯萌萌, 吴属连, 赵建成, 黄静, 朱柏露, 余欣童. 基于 SWMM 模型的快速城市化建成区内涝及面源污染模拟研究[J]. 环境保护前沿, 2023, 13(2): 270-277. DOI: 10.12677/aep.2023.132036

creasingly prominent. The research of rainfall runoff provides a scientific basis for urban planning and construction. The SWMM model is applied to construct the storm water model in Qianhai District, Bao'an District, Shenzhen, China, which simulates rainfall-runoff and runoff pollution generation and distribution in different recurrence periods. The results show that with the increase of rainfall intensity, the total runoff, peak flow and runoff coefficient would augment. The time of generating peak flow is gradually advanced, and the runoff coefficient increases, and the increasing range tends to decrease gradually. In addition, with the increase of rainfall intensity, the pollution-bearing pressure of urban receiving water is increasing caused by the increasing runoff pollution. The results reveal that the actual situation of urban waterlogging and runoff pollution in different recurrence periods is of great significance to urban waterlogging control and runoff pollution control.

Keywords

Runoff Pollution, SWMM Model, Peak Discharge, Urban Waterlogging

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

随着社会经济的发展,城市化进程的加快,随之而来的降雨径流问题逐渐凸显。快速的城市化发展,地表的不透水面积比例增加[1],地表径流总量增大、峰值提前、入渗减小,进而导致暴雨内涝频发,降雨径流所携带大量污染物直接排入受纳水体造成严重污染。

党的十九大吹响了打赢污染防治攻坚战的战斗号角,习近平总书记在全国生态环境保护大会上特别强调要坚决打好污染防治攻坚战,推动生态文明建设迈上新台阶。作为水环境综合整治的重要组成部分,近年来,国家、省、市进一步强化面源污染防治要求,着力打好水污染防治攻坚战。在此背景下,加强面源污染防治,带动水环境质量整体提升,努力走出一条经济社会持续发展、生态环境持续改善、生活质量不断提升的发展道路迫在眉睫[2]。

2. 材料与方法

目前国内外使用的城市非点源水量水质模型主要有 SWMM、MIKE URBAN [3]、Info Works CS、SUSTAIN、STORM 和 MOUSE 等,其中当前影响较大、应用较广的模型是主要是 SWMM、MOUSE、STORM 等。每个模型都有各自的特点特性和适用范围:STORM 的缺点、局限是模型结构较简单,不能模拟污染物的迁移转化过程,不适合连续时间尺度的模拟。MOUSE 模型复杂,参数的率定繁杂,基础数据获取困难,不确定性较大[4]。

基于上述各种模型之间的比较,可知 SWMM 不仅对数据输入时间间隔可以是任意的,输出的结果也可以是任意的整数步长,而且对于计算区域的面积大小和土地类型也没有限制,所以是一个通用性很好的模型。SWMM 模型不但可以对单个降雨事件模拟,而且可以对连续降雨模拟。在 SWMM 模型中,整个城市排水系统被简化为水流和物质在一些主要环境设施或者要素之间的进行迁移和转化,作为分布式的连续模拟模型在城市区域排水管网的非点源污染模拟方面有较明显的优势[5][6][7][8]。

2.1. SWMM 模型简介

SWMM (storm water management model, 暴雨洪水管理模型)是一个动态的降水-径流模拟模型,主要

用于模拟城市某一单一降水事件或长期的水文和水质模拟[3]。水文过程模拟是在子汇水区的基础上完成的。由于不同类型下垫面的影响,子汇水区一般被划分为透水区、有洼蓄的不透水区、无洼蓄的不透水区三部分,整个子汇水区出流量为三部分出流量之和。地表径流通过联立连续性方程和曼宁方程,将透水区和不透水区近似看作非线性水库处理,计算得到地表产流量[9]。透水区下渗水量计算模型有 Horton 方程、Green-Ampt 模型和径流曲线数值方法。

水质模块在模拟管线中运动水质变化过程时,假定导管中水是充分混合的,时段末流出连接导管污染物浓度可以由质量平衡方程计算得出,对时段内可能发生变化的项目,如流量和管道容积等,取其在时段中的平均值。SWMM 模型为水流在管线中的运动提供了三种计算方法:稳定流法、运动波法、动力波法,其中动力波法能够解决节点处水深和优雅水流在管道中的运动问题,适用于任何管网系统。

2.2. 研究区域概况

为推动水环境综合整治,打响治水提质攻坚战,宝安区将行政范围划分为四大片区,分别为茅洲河片区、大空港片区、前海片区、铁石片区,分片区进行正本清源改造,改变原有小区的错接乱接、雨污混流、污废不分等现象,从源头上落实雨污分流。

前海片区西濒珠江口东岸,南邻前海自贸区,东邻铁岗水库,北连机场外排渠、钟屋排水渠的围合片区,行政区域属于宝安区新安街道、西乡街道以及航城街道(部分)。研究区域属亚热带海洋性气候,多年平均降雨量约为 1700~2000 mm,降雨量季节分配不均衡,主要集中在 4 月至 9 月,降雨量占全年降水的 85%以上。

2.3. 设计不同重现期降雨条件

研究不同降雨条件下城市降雨径流的特点,雨型设计采用芝加哥雨型,对 0.5 年、1 年、3 年、5 年、10 年一遇的情景进行短历时(2 个小时)设计雨型,时间步长为 1 min,雨峰系数选用经验值 0.4。研究区域暴雨强公式[10]为:

$$q = \frac{167 \times 9.914 \times (1 + 0.460 \times \lg T)}{(t + 6.840)^{0.555}}$$

式中, q 为暴雨强度, mm/min; T 为暴雨重现期, a; t 为暴雨历时, min。

不同重现期下的暴雨过程如图 1。

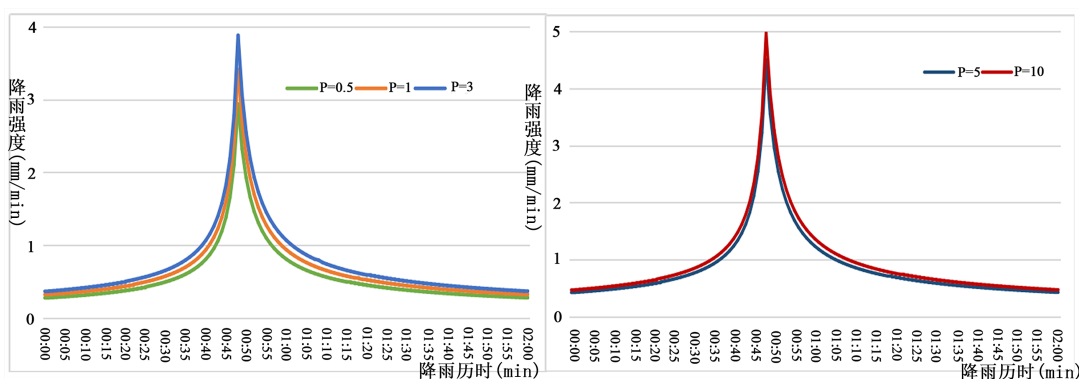


Figure 1. The variation of rainfall intensity with time in different return periods (unit: mm/min)

图 1. 不同重现期下降雨强度随历时的变化情况(单位: mm/min)

本文选取 0.5 年、1 年、3 年、5 年、10 年共 3 个重现期,降雨历时 2 小时,时间步长为 1 分钟,分

别计算降雨量为 70.16 mm、81.44 mm、92.72 mm、107.63 mm。

另外,水质模拟选取 2018 年的实际检测数据进行参数的率定和验证,最终形成适用于研究区域的水质模拟模型。

2.4. 研究区域概化

本研究主要数据来源包括深圳市遥感影像图、DEM 数据、深圳市宝安区排水管网资料、深圳市土地利用资料、宝安区气象站实测降雨数据等。

本研究借助 ArcGIS 的数据处理、空间分析、数据采集等功能,结合宝安区前海片区实际情况进行概化,概化的主要内容包括汇水区概化划分及管网概化(图 2)。

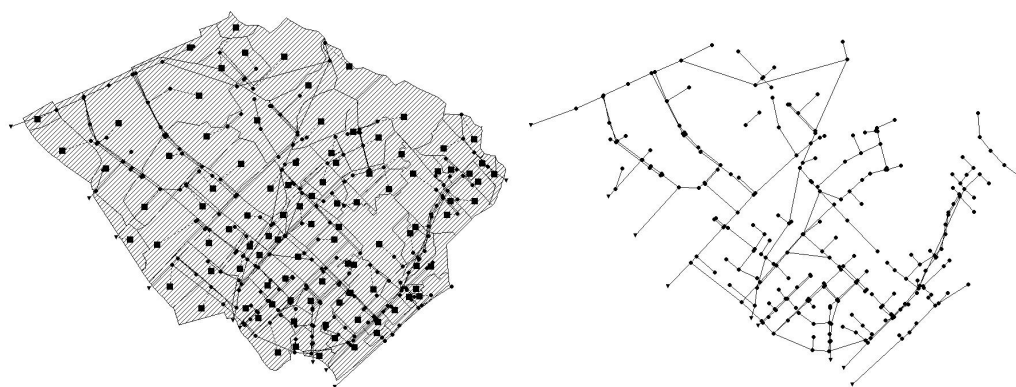


Figure 2. The generalized results of the pipe network and catchment area in the study area
图 2. 研究区域管网及汇水区概化结果

2.4.1. 汇水区及管网概化

利用地形图确定各子汇水区坡度,利用排水管网设计图及河道多年统计数据等资料,将河道概化成管网,并确定管道和排水节点的属性。共计概化出子汇水区 119 个,管网 249 段。

2.4.2. 模型参数设置及验证

(1) 模型参数的设置及率定

SWMM 模型中的水动力参数有些可以根据研究区域的实际情况予以事先确定,比如流域的面积、坡度、汇水区不透水率等,其他一些参数如汇水区漫流宽度、不透水区曼宁系数,霍顿产流参数等则根据相关文献资料选定[3]。水动力参数中,灵敏度最高的为子汇水区漫流宽度和不透水地表曼宁系数,其次为最小入渗率和不透水地表注蓄量[11],具体率定结果见表 1。

Table 1. Calibration results of parameters with high hydrodynamic sensitivity
表 1. 水动力灵敏度较大的参数率定结果

| 序号 | 系数名称 | 率定结果 |
|----|--|-------|
| 1 | 汇水区漫流宽度 | 150 |
| 2 | 不透水地表曼宁系数 | 0.015 |
| 3 | 管道曼宁系数 | 人工管渠 |
| 4 | | 河道 |
| 5 | 最小入渗率($\text{inch}\cdot\text{h}^{-1}$) | 0.2 |
| 6 | 不透水地表注蓄量(inch) | 0.06 |

模型中的水质参数现根据现有文献进行预设,后采用西乡河 2022 年 6 月 7 日的实地监测数据进行率定,监测水质指标主要包括 COD、氨氮、TP、TN、TSS5 项。运用预设的参数组合进行模型计算,将计算结果与监测结果进行比较,以相对偏差最小为原则,率定出适用研究范围的参数最优值。根据研究区域面源污染物累积冲刷特点,累积模型选用饱和增长曲线,冲刷模型采用指数冲刷函数。具体率定结果见表 2。

Table 2. Calibration results of water quality simulation parameters

表 2. 水质模拟参数率定结果

| 土地利用类型 | 项目 | 参数名称 | COD | TN | TP | TSS |
|--------|------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 屋面 | 累积参数 | 最大累积量 | 76 | 4 | 0.2 | 135 |
| | | 半饱和常数 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| | 冲刷参数 | 冲刷指数 | 0.006 | 0.004 | 0.002 | 0.007 |
| | | 冲刷系数 | 1.8 | 1.7 | 1.7 | 1.8 |
| 道路 | 累积参数 | 最大累积量 | 165 | 6 | 0.2 | 283 |
| | | 半饱和常数 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| | 冲刷参数 | 冲刷指数 | 0.006 | 0.004 | 0.002 | 0.008 |
| | | 冲刷系数 | 1.8 | 1.7 | 1.7 | 1.8 |
| 绿地 | 累积参数 | 最大累积量 | 35 | 10 | 0.6 | 75 |
| | | 半饱和常数 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| | 冲刷参数 | 冲刷指数 | 0.0035 | 0.002 | 0.001 | 0.004 |
| | | 冲刷系数 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 |

(2)模型参数的验证

通过阅读文献资料预设水动力参数,由于缺少有效实测径流资料,选用传统径流系数法校准水动力系数。利用深圳市重现期为 1 年、3 年、5 年的降雨量共同验证。经模拟, $P = 1$ 时,研究区域径流系数为 0.495; $P = 3$ 时,研究区域径流系数为 0.514; $P = 5$ 时,研究区域径流系数为 0.538,符合城市化地区径流系数在 0.4~0.7 的范围。

本研究采用 2022 年 7 月 2 日的研究区域的水质监测数据进行模型的验证。本场降雨属于中雨,历时 75 分钟,总降雨量 54.8 mm。模型参数率定与验证的 Nash-Sutcliffe 效率系数如下: COD 模拟的 N-S 系数为 0.52,氨氮模拟的 N-S 系数为 0.68、TN 模拟的 N-S 系数为 0.71、TP 模拟的 N-S 系数为 0.49、TSS 模拟的 N-S 系数为 0.5。

3. 结果与分析

3.1. 内涝模拟结果

如表 3,由模拟数据可得,与重现期为 0.5 年相比,重现期为 1 年、3 年、5 年、10 年的径流总量分别增加了 21.45%、43.60%、74.45%及 98.13%;洪峰流量分别增加了 23.50%、48.35%、83.38%及 111.23%;径流系数分别增加 4.65%、8.67%、13.74%及 16.91%,说明随着暴雨重现期的增加,径流总量和洪峰流

量均在增加, 径流系数增加, 洪峰系数逐渐增大, 降雨的入渗量所占比例随着降雨强度的增大而减少。利用重现期径流总量及洪峰流量与上一个重现期对比, 径流总量的变化幅度为 21.45%、18.23%、21.49% 及 13.58%, 洪峰流量的变化幅度为 23.50%、20.12%、23.61% 及 15.18%, 说明重现期为 5 年时, 径流总量及洪峰流量的变化幅度达到峰值, 之后有变小的趋势。随着暴雨重现期的增加, 洪峰产生的时间系数逐渐减小, 说明洪峰流量产生的时间越来越早。

Table 3. Waterlogging simulation results in different recurrence periods
表 3. 不同重现期内涝模拟结果

| 重现期/a | 降雨量/mm | 径流总量/mm | 洪峰流量/(m ³ /s) | 洪峰产生时间 | 径流系数 |
|---------|--------|---------|--------------------------|--------|-------|
| P = 0.5 | 70.16 | 33.19 | 6.68 | 0.600 | 0.473 |
| P = 1 | 81.44 | 40.31 | 8.25 | 0.583 | 0.495 |
| P = 3 | 92.72 | 47.66 | 9.91 | 0.575 | 0.514 |
| P = 5 | 107.63 | 57.90 | 12.25 | 0.558 | 0.538 |
| P = 10 | 118.91 | 65.76 | 14.11 | 0.550 | 0.553 |

3.2. 产污量分析

针对研究区域各子汇水区污染物冲刷量进行统计, 由表 4 结果可知, 污染物排放量与降雨大小正相关。对比重现期为 0.5 年的污染物冲刷量, 其中 COD 冲刷量在重现期为 1 年、3 年、5 年、10 年是分别增加了 42.76%、94.48%、176.79% 及 249.82%; TN 冲刷量分别增加了 38.04%、82.87%、152.46% 及 212.90%; TP 冲刷量分别增加了 37.24%、81.03%、148.97% 及 207.76%; TSS 冲刷量分别增加了 42.83%、94.65%、177.12% 及 250.28%。说明随着降雨量的增加, 污染物冲刷量加大, 对城区接纳水体的污染越来越大, 因此, 控制雨季降雨径流污染对河道水环境质量有至关重要的意义。

Table 4. Simulation results of non-point source washoff pollution with different return periods
表 4. 不同重现期非点源冲刷污染模拟结果

| 重现期/a | COD/kg | TN/kg | TP/kg | TSS/kg |
|---------|---------|-------|-------|---------|
| P = 0.5 | 710.47 | 24.71 | 0.58 | 1364.61 |
| P = 1 | 1014.17 | 34.11 | 0.80 | 1949.04 |
| P = 3 | 1381.62 | 45.19 | 1.05 | 2656.20 |
| P = 5 | 1966.40 | 62.38 | 1.44 | 3781.63 |
| P = 10 | 2485.17 | 77.32 | 1.79 | 4779.99 |

3.3. 产污分布分析

本研究以重现期为 1 年(P = 1)的降雨模拟为例, 分析研究区域在恒定降雨强度下, 各污染物的分布情况。当 P = 1 时, 降雨历时 2 小时, 降雨量为 81.44 mm, 模拟结果显示(图 3), 研究区域 COD、TN、TP 及 TSS 污染物冲刷总量分别 1014.17 kg、34.11 kg、0.80 kg、1949.04 kg。统计各子汇水区污染物情况, 空间上看, COD 污染物主要分布区域为研究区域的北部及西部, 产污量较多的子汇水区 S247、S393、S395 主要土地利用类型为屋面及道路; TN 污染物主要分布区域为研究区域的北部偏西部, 产污量较多的汇水区 S393、S247、S243_1 土地利用类型为屋面、道路及绿地; TP 污染物主要分布区域为研究区域的北部偏西部, 产污量较多的汇水区 S393、S243_1、S247 土地利用类型为屋面、道路及绿地; TSS 污染物主要分布区域为研究区域的北部偏西部, 产污量较多的汇水区 S247、S393、S395 土地利用类型为屋面及道路。

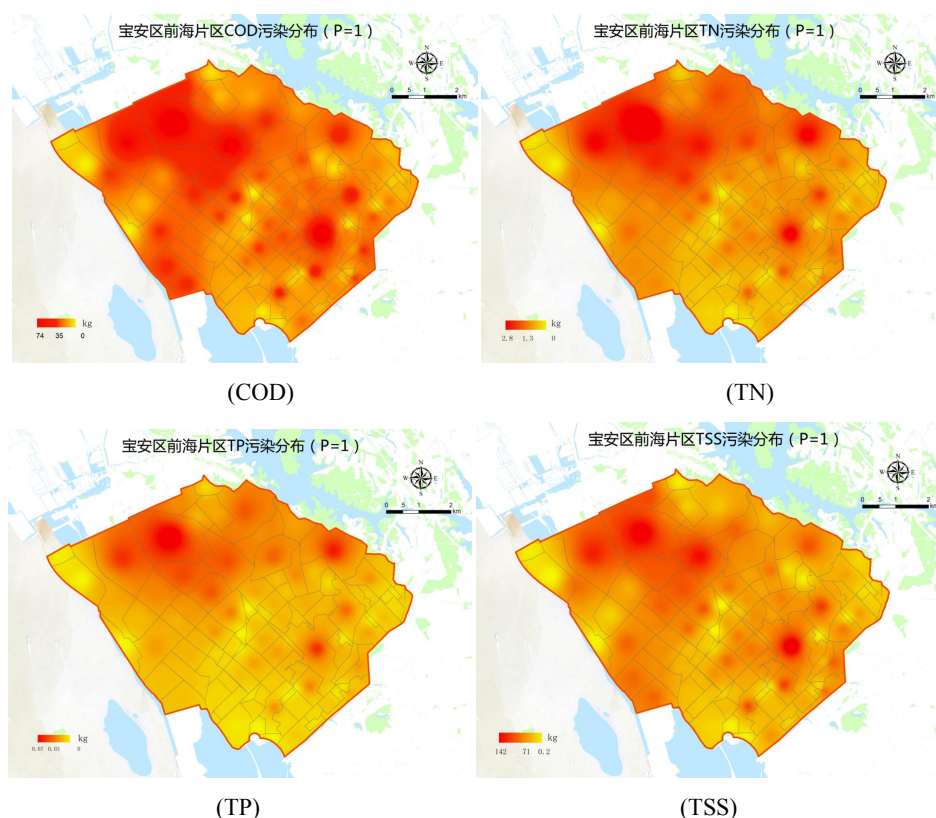


Figure 3. Pollution distribution in Qianhai area of Baoan District
图 3. 宝安区前海片区污染分布

4. 结论

本研究基于研究区域现状，建立 SWMM 模型，模拟不同重现期暴雨条件下研究区域的地表径流情况、径流污染产污量及产污分布情况，最终研究结论如下：

(1) 随着暴雨重现期的增加，径流总量和洪峰流量均会迅速增加，洪峰流量产生的时间越来越早，径流系数增加。且随着暴雨重现期的增加，洪峰流量及径流系数的增幅均有变小的趋势，当重现期为 5 年时，径流总量及洪峰流量的变化幅度达到峰值，之后有变小的趋势。

(2) 随着降雨量的增加，污染物冲刷量逐渐加大，对城区接纳水体的污染越来越大。因此，控制雨季降雨径流污染对河道水环境质量有至关重要的意义。

(3) 以研究区域为例，COD、TN、TP、TSS 四种污染物的主要分布情况是北部大于南部，西部大于东部，主要产污的土地利用类型为道路和屋面。TN、TP 污染物冲刷部分来自绿地。

(4) 是由于污染物附着表面且建设用地对污染物无吸附性。因此有关部门在城市规划建设时，路面建议采用透水沥青，道路绿化建议采用下沉式绿地，有效截断雨水冲刷路面后形成径流流入水体。此外，有序推进屋顶绿化，增加植被对污染物的吸附性。

参考文献

- [1] 唐双成, 罗纨, 贾忠华, 李山, 仵艳, 周萌. 雨水花园对暴雨径流的削减效果[J]. 水科学进展, 2015, 26(6): 787-794.
- [2] 黄慧诚. 坚决打好打赢污染防治攻坚战——解读《广东省打好污染防治攻坚战三年行动计划(2018-2020 年)》[J]. 环境, 2018(8): 14-19.

- [3] Rossman, L.A. (2007) Storm Water Management Model User's Manual.
- [4] 王建龙, 车伍, 易红星. 基于低影响开发的雨水管理模型研究及进展[J]. 中国给水排水, 2010, 26(18): 50-54.
- [5] 李玥, 俞快, 程娘珠, 余美萱. 低影响开发的 7 种城市雨洪管理模型[J]. 广东园林, 2016(4): 9-13.
- [6] 许迪. SWMM 模型综述[J]. 环境科学导刊, 2014, 33(6): 23-26.
- [7] 胡爱兵, 任心欣, 裴古中. 采用 SWMM 模拟 LID 市政道路的雨洪控制效果[J]. 中国给水排水, 2015, 31(23): 130-133.
- [8] 王文亮, 李俊奇, 宫永伟, 朱明靖, 张庆康. 基于 SWMM 模型的低影响开发雨洪控制效果模拟[J]. 中国给水排水, 2012, 28(21): 42-44.
- [9] 赵刚, 史蓉, 庞博, 等. 快速城市化对产汇流影响的研究: 以凉水河流域为例[J]. 水力发电学报, 2016, 35(5): 55-64.
- [10] 张大伟, 赵冬泉, 陈吉宁, 王浩正, 王浩昌. 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, 34(Z2): 354-357
- [11] 王蓉, 秦华鹏, 赵智杰. 基于 SWMM 模拟的快速城市化地区洪峰径流和非点源污染控制研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2015, 51(1): 141-150.