

DOI: 10.5846/stxb201408121604

刘文, 陈卫平, 彭驰. 社区尺度绿色基础设施暴雨径流消减模拟研究. 生态学报, 2016, 36(6): - .

Liu W, Chen W P, Peng C. Modeling the Effects of Green Infrastructure on Storm Water Runoff Reduction at Community Scale. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(6): - .

社区尺度绿色基础设施暴雨径流消减模拟研究

刘 文, 陈卫平*, 彭 驰

中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

摘要:当前快速的城市化进程导致了城市地区内涝事件频繁发生。绿色基础设施是减轻城市洪涝的有效措施之一。SWMM (Storm Water Management Model) 等模型的复杂性使得规划管理者对模型的操作和应用存在困难, 而且缺乏对绿色基础设施径流消减机制的展现。目前的研究中, 比较单个与综合绿色基础设施配置径流消减效果的研究相对较少。本研究基于水量平衡和城市水文过程, 开发了社区尺度绿色基础设施消减作用的暴雨径流模型, 并以北京市一典型社区为例, 模拟研究了 1 年一遇和 5 年一遇两种暴雨条件下不同绿色基础设施配置对暴雨径流流量和峰值的消减效率。结果表明: 用两场野外监测的降雨和径流数据验证模型得到的决定系数分别为 0.68 和 0.71, 纳什效率系数分别达到 0.99 和 0.96, 表明模型是可靠的。在 1 年一遇和 5 年一遇两种暴雨条件下, 将常规绿地改造成 5 cm 深度的下凹式绿地, 径流量分别减少了 8.23% 和 23.30%, 径流峰值分别减少了 20.31% 和 29.11%; 在建造 300 m³调蓄池的情景下, 径流量分别减少了 84.90% 和 20.97%, 径流峰值分别减少了 88.99% 和 0.10%; 在 50% 的不透水地表铺装透水砖情景下, 径流量分别减少了 46.51% 和 38.52%, 径流峰值分别减少了 39.96% 和 35.48%。3 种绿色基础设施都可以较好的消减社区暴雨径流, 但是随着暴雨强度的增强, 下凹式绿地的消减效果略增强, 调蓄池的消减效果变差, 透水砖铺装的消减效果较稳定。综合 3 种措施对暴雨径流具有显著消减效果, 可以 100% 消减 1 年一遇暴雨产生的径流, 在 5 年一遇设计暴雨条件下, 分别消减 75.47% 的总径流量和 64.52% 的径流峰值。

关键词:绿色基础设施; 暴雨径流; 下凹式绿地; 调蓄池; 透水砖铺装; 社区

Modeling the Effects of Green Infrastructure on Storm Water Runoff Reduction at Community Scale

LIU Wen, CHEN Weiping*, PENG Chi

State Key Laboratory for Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Rapid urbanization has greatly changed the underlying surface, resulting in frequent floods and waterlogging in urban areas and causing enormous economic damage and loss of life. Of the innovative storm water management strategies, green infrastructure (GI), which uses vegetation, soils, and natural processes to manage storm water and create healthier urban environments, has proved to be an effective measure to mitigate urban flooding. The runoff reduction effectiveness of green infrastructure facilities under different scenarios can be simulated by mathematical models. However, complex models like the storm water management model are difficult for planners and managers to operate and apply. Furthermore, they are inadequate in demonstrating the runoff reduction mechanisms of green infrastructure. Although the performance of green infrastructure in mitigating urban flooding has been extensively investigated, few studies have attempted to examine and compare runoff reduction effectiveness between integrated green infrastructure and single green infrastructure facilities under different storm recurrence periods. In this study, a community-scale simulation model based on water balance and urban hydrological processes was developed to quantify the reduction effect of green infrastructure on storm water runoff. A typical

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAC13B04); 国家自然科学基金(41271501)

收稿日期: 2014-08-12; 网络出版日期: 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wpchen@cees.ac.cn

community in Beijing was selected as a case study to assess the reduction effectiveness of different green infrastructure configurations, based on the volume and peak flow of storm water runoff under 1-year and 5-year storm events. Four scenarios of green infrastructure configuration were considered, namely: converting to concave green land; constructing a storage pond; converting to porous brick pavement; and combining the previous three measures. Field-monitored runoff data of two rain events were used to validate the model. The validation results yielded determination coefficients of 0.68 and 0.71 respectively for the two rain events, while the Nash-Sutcliffe efficiencies were 0.99 and 0.96 respectively, indicating that model performance was satisfactory and reliable. For the scenario of concave green space with 5 cm depth, runoff volume was reduced by 8.23% and 23.30% and peak flow was reduced by 20.31% and 29.11% respectively for 1-year and 5-year storm events. For the 300 m³ storage pond scenario, runoff volume was reduced by 84.90% and 20.97% respectively for 1-year and 5-year events, while peak flow was reduced by 88.99% and 0.10% respectively. For the scenario in which 50% of impervious surface area was modified to porous brick pavement, runoff volume was reduced by 46.51% and 38.52%, and peak flow was reduced by 39.96% and 35.48% respectively for 1-year and 5-year events. These results indicate that each of the three facilities showed good runoff reduction effectiveness. With increased rainfall intensity, the reduction effectiveness of concave green space, storage pond, and porous brick pavement was slightly enhanced, decreased, and relatively stable respectively. The integrated green infrastructure configuration scenario showed significant reduction effects, with 100% reduction of runoff generated by the 1-year storm; runoff volume and peak flow were reduced by 75.47% and 64.52% respectively under conditions of the 5-year storm, as well as showing increased rainwater infiltration and harvesting for utilization. Therefore, the integrated green infrastructure configuration is among the optimal strategies for storm water runoff reduction and rainwater resource utilization in communities.

Key Words: green infrastructure; storm water runoff; concave green land; storage pond; porous brick pavement; community

随着全球城市化进程的加快,城市地区不透水地表面积增加,直接改变了城市下垫面条件,使自然的水循环机制发生改变^[1]。城市区域雨水径流增多,雨水汇流速度加大给当前的雨水基础设施带来很大压力^[2]。近年来,全球气候变化导致某些区域强降雨事件的频率增加,使得城市地区严重积水和暴雨洪水事件频繁发生^[3],给人民群众生命财产造成的损失与日俱增,已成为社会各界关注的问题之一^[4]。

传统的雨水管理方法是利用大的管道和混凝土渠道使雨水尽可能快地排出,造成城市河道生态环境恶化和雨水资源严重浪费^[5]。近些年,发达国家提出新的城市雨水管理方法如绿色基础设施 (Green Infrastructure, GI),与之类似的是低影响开发 (Low Impact Development, LID),这些雨水管理策略从源头上通过一系列现场的截留和滞留等径流调控措施,实现城市雨洪的资源化利用^[6-7]。尽管人们对绿色基础设施在消减城市雨洪的认识和关注不断增加,但是真正将这些雨洪管理策略付诸实践的步伐却很慢。主要原因之一是由于缺乏有效的绿色基础设施设计和评估工具,而有效的绿色基础设施模拟软件可为设施实践的工程应用提供设计指导^[8]。

近年来,随着绿色基础设施和低影响开发理念和体系的发展,国外模拟这些措施效能的雨洪模型逐渐开发并推广,目前已取得了很大进展。SWMM、MUSIC (Model for Urban Stormwater Improvement Conceptualization)、SUSTAIN (System for Urban Stormwater Treatment and Analysis Integration) 和 L-THIA-LID (Long-Term Hydrologic Impact Assessment-Low Impact Development) 等模型被广泛的用来模拟不同暴雨特征和设施空间布局对设施消减控制径流的效果^[9-13],评价措施的选择方案和成本比较^[14-15]。近年来,我国学者对绿色基础设施和低影响开发措施模拟研究工作的开展已有不少案例,但大多集中在对 SWMM 模型的应用方面^[16-18]。

SWMM 等模型对地形、汇水区划分和排水管网汇水的计算导致模型较为复杂,模型开发应用需要深入分

析和专业技能,超越了一般公众的能力^[19],使得规划管理者对模型的操作应用存在困难,而且复杂的模型掩盖了对自然水文机制的定量刻画^[20-21]。由于水文模型中一些概念化参数通过实测不易获得,以及目前针对城市下垫面和绿色基础设施的径流在野外监测存在困难^[19],用来验证和率定模型的实测数据很少,限制了模型在城市雨洪规划管理中的推广应用。本研究的目标为结合水量平衡和城市水文循环,建立耦合绿色基础设施消减作用的社区尺度暴雨径流模型,通过野外监测数据评估模型的有效性,进而模拟研究不同绿色基础设施配置对社区暴雨径流的消减作用。旨在设计开发易于操作和实用的社区绿色基础设施消减暴雨径流模拟与管理软件,为绿色基础设施雨水管理的决策和城市可持续的雨洪管理提供科学依据。

1 研究方法

1.1 模型简述:

由于城市中不同地表类型的下垫面会产生不同的水文响应,为了计算的方便,将城市地表概化为不透水地表、透水地表和水体 3 种类型模块单独计算,如图 1 所示。不透水地表的径流量为降雨量扣除填洼和蒸发的剩余水量。透水地表的径流计算分为冠层截留、蒸发、入渗和填洼过程。水体调蓄雨水径流主要根据流入量、流出量和蓄水容量计算。为了达到实用的目的,模型在整体计算过程中基于水量平衡和水文物理过程,而在每个水文过程选择偏重于参数较少和普遍适用的经验型方程。绿色基础设施主要模拟其雨水入渗、滞留和存储的能力和出流量,在计算过程中替换相对应地表的径流计算模块。社区降雨总的径流量是 3 类地表和绿色基础设施产生和流出的径流总和,流量峰值是整个径流过程时间段内的最大流量^[22]。

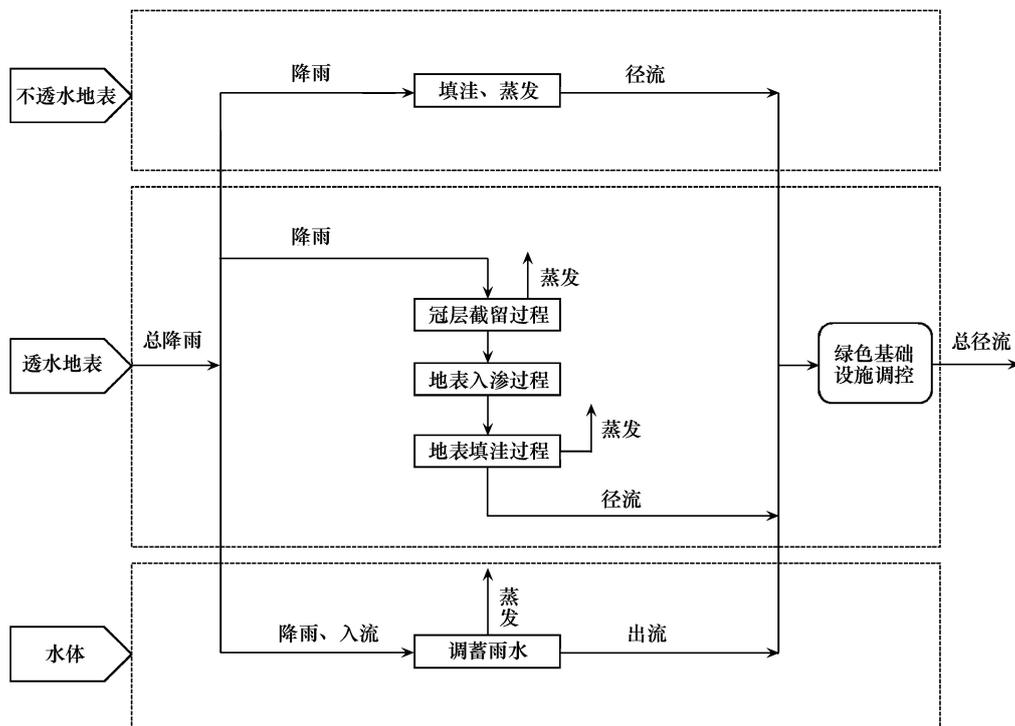


图 1 模型径流计算原理图

Fig. 1 Schematic depiction of the model calculation

1.1.1 不透水地表径流计算

假设不透水地表是 100% 不透水,降雨量减去蒸发、填洼和存储的雨水量就是径流量^[23]。不透水地表产生的径流量(R_{imp} , mm)为:

$$R_{imp} = \begin{cases} P - (D - ST) - E_D & P - E_D > D - ST \\ 0 & P - E_D \leq D - ST \end{cases} \quad (1)$$

$$E_D = \min(E_p, ST) \quad (2)$$

式中: P 指降雨量 (mm), D 指不透水地表的填注量 (mm), ST 指填注存储水平 (mm), E_D 指填注水的蒸发量 (mm), E_p 指时间步长内的潜在蒸发量 (mm)。

1.1.2 透水地表径流计算

透水地表的模拟分别计算冠层截留、蒸发、地表入渗和地表填注过程,再根据水量平衡计算得到产流量。

(1) 冠层截留过程

植被冠层截留量的计算采用 Wang 等^[24]改进的 Rutter 模型方法,截留量 (SI_c , mm) 的计算表达式为:

$$SI_c = \begin{cases} SI_0 + P - P_f - E_c & SI_0 + P - P_f - E_c \leq S_c \\ S_c - E_c & SI_0 + P - P_f - E_c > S_c \end{cases} \quad (3)$$

式中: SI_0 指前一时期的截留雨水量 (mm), P_f 是自由穿透冠层雨量 (mm), 由下式计算:

$$P_f = P e^{-\kappa LAI} \quad (4)$$

$$E_c = \left(\frac{SI_c}{S_c} \right) 2/3 E_p \quad (5)$$

$$S_c = S_L LAI \quad (6)$$

式中: κ 指消光系数, LAI 指叶面积指数, E_c 指时间步长内叶面截留水的蒸发量 (mm), S_c 指冠层的储水能力 (mm), S_L 指特定的叶面储水量 (mm)。

(2) 蒸发过程

潜在蒸发量的计算采用基于气温的 Hargreaves 方法^[25], 潜在蒸发量 (E_p , mm/d) 计算公式为:

$$E_p = 0.0023 \times 0.408 \left(\frac{RA_{max}}{\lambda} \right) (T_{max} - T_{min}) 0.5 (T_{av} + 17.8) \quad (7)$$

式中: RA_{max} 指地外辐射 (MJ/m²/d), λ 指水的气化比潜热 (MJ/kg), 通常取值为 2.45 MJ/kg, T_{max} 指日最高温度 (°C), T_{min} 指日最低温度 (°C), T_{av} 指日均温度 (°C)。

(3) 地表入渗过程

扣除截留后的降雨抵达地表后,这部分降雨将发生地表入渗、地表填注和地表径流。采用 Mein 与 Larson 改进的 Green-Ampt 模型方法^[26]模拟降雨入渗的过程,入渗速率 (f , mm/min) 的计算公式如下:

$$f = \begin{cases} K_s [1 + (\theta_s - \theta_i) S_f / F] t > t_p \\ it \leq t_p \end{cases} \quad (8)$$

$$t_p = F_p / i \quad (9)$$

$$F_p = \frac{(\theta_s - \theta_i) S_f}{i / K_s - 1} \quad (10)$$

式中: K_s 指饱和导水率 (mm/min), θ_s 指饱和含水量 (%), θ_i 指初始含水量 (%), S_f 指湿润锋处的平均吸力 (mm), F 指累积入渗量 (mm), t_p 指开始积水的时间 (min), F_p 指开始积水时刻的入渗量 (mm), i 指冠层截留之后净雨的雨强 (mm/min)。

(4) 地表填注过程

剩余降雨量留存于地表,部分进行填注,部分成为地表径流参与汇流。初始时刻的地表填注雨水储量 (Sd_0 , mm) 根据 Linsley 于 1975 年推导出的经验公式计算^[27]:

$$Sd_0 = Sd_{\max} \left(1 - \exp \left(- \frac{PC}{Sd_{\max}} \right) \right) \quad (11)$$

式中: Sd_{\max} 指透水地表填注量(mm), PC 指累积剩余降雨量(mm),即降雨减去截留和入渗的雨量。

其它时间步长的填注量(Sd , mm)由下式计算:

$$Sd = \begin{cases} PC + Sd_t - E_s & PC + Sd_t - E_s < Sd_{\max} \\ 0 & PC + Sd_t - E_s \geq Sd_{\max} \end{cases} \quad (12)$$

$$E_s = \min(Sd_t, E_p) \quad (13)$$

式中: Sd_t 指前一时间步长内的填注量(mm), E_s 指之前填注雨水的蒸发量(mm)。

透水地表总的径流量(R_{per} , mm)计算采用水量平衡方法,即降雨减去截留、入渗和填注的雨量就是透水地表的径流量,计算式为:

$$R_{per} = P - (SI_c - SI_0) - f \cdot \Delta t - Sd - E_s \quad (14)$$

式中: Δt 指模拟的时间步长(mm)。

1.1.3 水体出流量计算

根据水量平衡,水体的出流量(Q_w , m^3)计算公式如下:

$$Q_w = \begin{cases} 0, & \left(\frac{A_p}{A - A_c} \right) (\alpha R_{imp} + \beta R_{per}) A + (P - E_w) \cdot A_c \leq H - V_w \\ \left(\frac{A_p}{A - A_c} \right) (\alpha R_{imp} + \beta R_{per}) A + (P - E_w) \cdot A_c - H + V_w, & \left(\frac{A_p}{A - A_c} \right) (\alpha R_{imp} + \beta R_{per}) A + (P - E_w) \cdot A_c > H - V_w \end{cases} \quad (15)$$

式中: A_p 指流入水体的雨水汇水面积(m^2), A 指社区的面积(m^2), A_c 指水体的表面积(m^2), α 指不透水面积的比例(%), β 指透水面积的比例(%), E_w 指水面蒸发量(mm), H 指水体的最大存储能力(m^3), V_w 指降雨之前水体的存储水平(m^3)。

1.1.4 绿色基础设施径流消减模拟

(1) 下凹式绿地

下凹绿地低于周围路面可以更多的容纳雨水。当积水深度超过绿地下凹深度时,多余的雨水量即外溢流出绿地。下凹式绿地的出流量(Q_s , m^3)计算如下:

$$Q_s = \begin{cases} (i\Delta t + q - f_s - \frac{1}{2}h_s)\beta A & i\Delta t + q - f_s > \frac{1}{2}h_s \\ 0 & i\Delta t + q - f_s \leq \frac{1}{2}h_s \end{cases} \quad (16)$$

式中: q 指下凹绿地上前一时段的净雨量(mm), f 指下凹绿地入渗量(mm), h_s 指绿地下凹深度(mm)。

(2) 调蓄池

调蓄池的作用是容纳流入的雨水,当调蓄池存储的水量超过其容量时,调蓄池不再调蓄,流入的雨水从溢流口流出。假定降雨时期内调蓄池内的雨水不回用,计算过程中不考虑雨水的渗漏。调蓄池流出的雨水量(Q_r , m^3)用下式表示:

$$Q_r = \begin{cases} \mu R_c - (H_r - V_{r0}) & \mu R_c > H_r - V_{r0} \\ 0 & \mu R_c \leq H_r - V_{r0} \end{cases} \quad (17)$$

式中: μ 指雨水收集比例(%), R_c 指时间步长内累积的径流量(m^3), H_r 指调蓄池雨水存储能力(m^3), V_{r0} 指降雨之前调蓄池存储的水量(m^3)。

(3) 透水砖铺装路面

透水砖的雨水渗透速率远大于降雨强度,对降雨入渗无阻碍作用^[28]。透水砖层、找平层和垫层的有效空隙率和厚度决定了可容纳的最大雨水量。透水砖路面产流量(Q_p , m^3)计算公式如下:

$$Q_p = \begin{cases} (P - \eta\Delta t + F_c - H_p) \alpha A \omega & P - \eta\Delta t + F_c > H_p \\ 0 & P - \eta\Delta t + F_c \leq H_p \end{cases} \quad (18)$$

式中: η 指地基土壤的入渗率(mm/min), F_c 指地基土壤累积容纳的雨水量(mm), H_p 指透水砖路面雨水存储能力(mm), ω 指不透水地表透水铺装改造的比例($\%$)。

1.2 模型参数

模型参数值的选取依据文献研究的结果和经典模型参数默认值,如表 1 所示:

表 1 模型模拟的参数取值表

Table 1 The parameter values of model simulation

参数 Parameters	取值 Values	单位 Units	来源 Sources
径流产流参数 Runoff yield parameters			
不透水地表填注量 Depression of impervious areas	3	mm	[29]
透水地表填注量 Depression of pervious areas	4	mm	[30]
气象条件参数 Meteorological conditions			
日均最高温度 Maximum daily temperature	31	℃	北京气象数据
日均最低温度 Minimum daily temperature	22	℃	北京气象数据
日平均温度 Average daily temperature	26.5	℃	北京气象数据
土壤性质参数 Soil properties			
饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity	0.144	mm/min	[31]
湿润锋处平均吸力 Wetting front suction	69.696	mm	[32]
饱和含水量 Saturated water content	40.627	%	[31]
初始含水量 Initial water content	26.279	%	[31]
植被特征参数 Vegetation characters			
叶面积指数 Leaf area index	3.85	—	[33]
消光系数 Extinction coefficient	0.3	—	[24]
特定叶面储水量 Special leaf storage	0.2	mm	[24]
生态设施特征参数 Green infrastructures characters			
调蓄池雨水存储能力 Water storage capacity of storage pond	300	m^3	模型假定
雨水收集比例 Rainwater collection ratio	100	%	模型假定
绿地下凹深度 Depth of concave green space	50	mm	模型假定
地基土壤入渗速率 Infiltration rate of subsoil	0.3	mm/min	[28]
透水铺装的储水能力 Water storage capacity of porous pavement	32.86	mm	[28]

1.3 模型评价

采用模拟径流值与实测径流值线性回归的决定系数(R^2)以及纳什效率系数(Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE)来评价模型对实测水文过程模拟的好坏。纳什效率系数的计算公式如下^[34]:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{s_i} - Q_{o_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{o_i} - \bar{Q}_o)^2} \quad (19)$$

式中: NSE 为用于衡量模型模拟实际时间序列上流量误差的纳什效率系数, Q_{s_i} 和 Q_{o_i} 为时间步长 i 的径流模拟值和观测值(m^3/min), N 为整个模拟时间段的时间步数, \bar{Q}_o 为模拟时间段内实测径流的平均值(m^3/min)。当 $R^2 > 0.6$ 以及 $NSE > 0.5$ 时认为模拟的结果是较满意的^[35-36]。

1.4 模拟情景

选择北京市海淀区一典型城市社区进行情景模拟分析,社区总面积 24635 m²,社区内包括住宅楼、办公楼、广场、草坪和道路等,绿地面积比率为 31.4%,无水体;其中绿地为透水地面,其它均为不透水地面。此情况下社区内无绿色基础设施配置,作为基本情景。

暴雨的设计采用北京市暴雨公式,计算得到降雨历时 2 h,时间步长为 5 min,重现期分别为 1 年一遇($P=99.9\%$)和 5 年一遇($P=20\%$)的 2 种类型暴雨,降雨过程的雨量分配如图 2 所示^[37]。2 h 总的降雨量分别为 21.6 mm 和 67.2 mm。设计暴雨的计算公式如下:

$$q = \frac{2001(1 + 0.811 \lg P)}{(t + 8)0.711} \quad (20)$$

式中: q 指设计暴雨强度, P 指设计重现期, t 指降雨历时。

绿色基础设施设计以下 4 种情景:(1) 绿地改造成下凹深度 5 cm;(2) 建造地下调蓄池 300 m³;(3) 50% 的不透水面用混凝土透水砖铺装;(4) 综合情景,包含前面 3 种设施,即绿地下凹式改造、建造调蓄池和透水砖铺装。

2 结果与讨论

2.1 模型验证

模型验证选择北京市某小区南汇水区,汇水区的面积为 29,500 m²,透水面积比例占总面积的 30.2%。2013 年 7 月到 9 月在雨水出口处安装 ISCO 6712 全自动采样仪,用 750 面积速度流量计模块和 674 雨量计分别监测径流流量和记录降雨量 (Teledyne ISCO, NB, USA)。研究区域的用地类型分布和实验监测点的信息如图 3 所示。研究区中绿地主要以大面积的草地为主,灌木和乔木的冠层较小,而且分布很少,在本研究中为了简化,都按照草地来计算。

在 2013 年 7 月 15 日和 8 月 11 日下午 2 场典型的降雨事件下(降雨量分别为 62.2 mm 和 26.5 mm),模拟降雨径流和监测径流线性回归的决定系数 R^2 分别为 0.68 和 0.71(图 4),纳什效率系数 (NSE) 分别达到 0.99 和 0.96,表明模型效率是满意的。对较小的降雨事件下的径流过程,模型验证的效果不理想。由于模型中未划分汇水区和利用排水管网信息,对径流汇水过程没有考虑,造成模型对实际径流过程模拟的一致性和精确度不高;但是总的径流量和径流峰值作为模型重点模拟和关注的输出结果,模型验证的精度是可以接受的。因此,模型是可靠和合理的。

2.2 情景模拟结果

用验证的模型分别模拟在基本情景和绿色基础设施情景下的径流量和流量峰值,并分析绿色基础设施对比基本情景的暴雨径流消减效率。

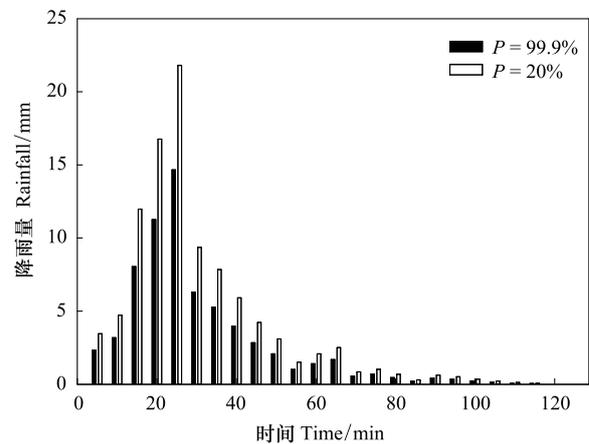


图 2 设计暴雨的雨型分布

Fig. 2 The rainfall pattern distribution of designed storms



图 3 研究区用地类型分布图

Fig. 3 Land use distribution of study area

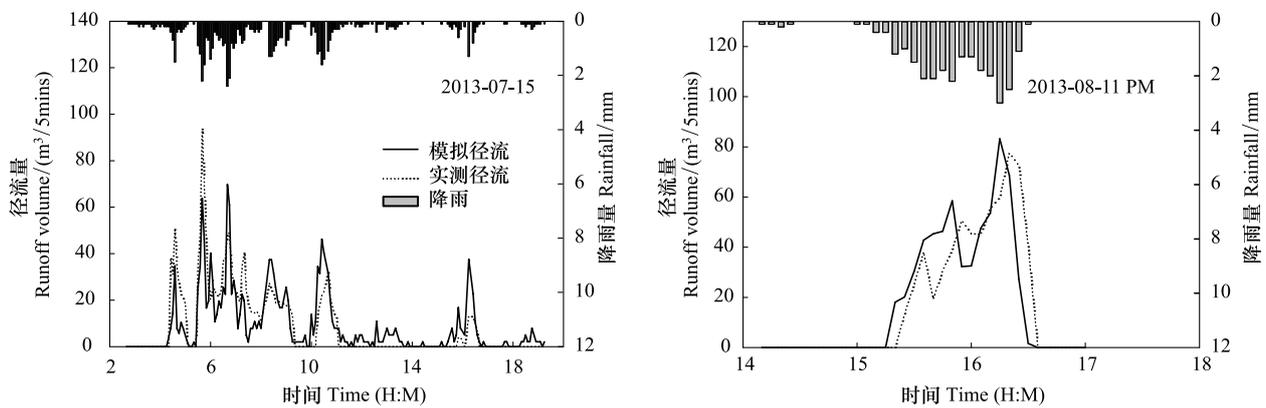


图 4 模拟与实测的径流水文图

Fig. 4 The hydrography of simulated runoff and observed runoff

2.2.1 基本情景

在 $P=99.9\%$ 和 $P=20\%$ 的暴雨条件下,社区模拟的总径流量分别为 357.12 m^3 和 1455.56 m^3 ,径流峰值分别为 19.89% 和 $69.78 \text{ m}^3/\text{min}$,表明随着降雨强度的增大,径流量和峰值显著增加。 $P=99.9\%$ 与 $P=20\%$ 重现期下的暴雨径流相比较,径流降雨比率从 67.07% 增加到 87.87% ,入渗降雨比率从 23.89% 降低到 10.82% (表 2)。

表 2 不同情景下的降雨与径流量和入渗量比率

Table 2 The ratios of runoff and infiltration to rainfall under different scenarios

模拟情景 Scenarios	$P=99.9\%$ 1-year storm		$P=20\%$ 5-year storm	
	径流-降雨比率 Runoff to rainfall ratio	入渗-降雨比率 Infiltration to rainfall ratio	径流-降雨比率 Runoff to rainfall ratio	入渗-降雨比率 Infiltration to rainfall ratio
	基本情景 Base scenario	67.07%	23.89%	87.87%
下凹式绿地 Concave green land	61.55%	29.41%	67.40%	31.29%
调蓄池 Storage pond	10.13%	23.89% ^a	69.44%	23.89% ^b
透水砖铺装 Porous brick pavement	35.88%	55.08%	54.03%	44.66%
综合情景 Integrated scenario	0%	60.61%	21.56%	65.14%

a, b 调蓄池没有雨水入渗,结果同基本情景。

2.2.2 绿地下凹式改造情景

常见的绿地和地面齐平,在大暴雨的情景下雨水流出绿地,并没有充分的发挥绿地的蓄渗能力。下凹式绿地利用下凹空间可以充分蓄积雨水,显著增加雨水入渗时间,具有渗蓄雨水和消减洪峰流量等优点^[38]。本研究的情景中,将平式绿地改造成低于周围路面 5 cm ,未考虑屋面和道路等不透水面径流流入绿地。在设计暴雨 $P=99.9\%$ 重现期下,下凹式绿地情景径流降雨比率降低到 61.55% ,入渗降雨比率增加到 29.41% (表 2),总径流量减少了 8.23% ,径流峰值减少了 20.31% (表 3);在 $P=20\%$ 设计暴雨事件下,下凹式绿地情景径流降雨比率降低到 67.40% ,入渗降雨比率增加到 31.29% ,总径流量减少了 23.30% ,径流峰值减少了 29.11% 。由于模拟的情景中下凹式绿地并没有考虑接纳不透水地面的径流,因此下凹绿地只是消减了绿地产生的大部分径流,造成了 1 年一遇暴雨径流削减的比例小于 5 年一遇削减比例。下凹式绿地对总径流量的消减效果较小,是由于绿地对社区总径流的贡献较低^[9],在 1 年一遇和 5 年一遇的暴雨下分别占到总径流的 7.0% 和

23.0%,因而调控雨洪的作用有限。国内的一些研究结果也证实了凹式绿地相比于平式绿地良好的径流消减效果^[39-41]。凹式绿地在大的降雨条件下径流消减效果略好于小的降雨条件,是由于更多的雨水被绿地截蓄入渗到土壤。凹式绿地可以充分利用有限的绿地空间,增加绿地消减径流的潜力,增加绿地的雨水入渗能力,更进一步补充地下水。

表 3 不同绿色基础设施情景下的径流消减效果

Table 3 The runoff reduction effectiveness of different green infrastructure scenarios

模拟情景 Scenarios	$P=99.9\%$ 1-year storm		$P=20\%$ 5-year storm	
	总径流量减少 Total runoff reduction	径流峰值减少 Peak flow reduction	总径流量减少 Total runoff reduction	径流峰值减少 Peak flow reduction
凹式绿地 Concave green land	8.23%	20.31%	23.30%	29.11%
调蓄池 Storage pond	84.90%	88.99%	20.97%	0.10%
透水砖铺装 Porous brick pavement	46.51%	39.96%	38.52%	35.48%
综合情景 Integrated scenario	100%	100%	75.47%	64.52%

2.2.3 增设调蓄池情景

考虑到城市雨水资源的短缺,社区内可建造地下调蓄池,收集存储雨水再利用。假设在小区雨水出口处建造一调蓄池,拟建容积为 300 m³。与基本情景的模拟结果对比,在 $P=99.9\%$ 的设计暴雨事件下,调蓄池情景的降雨比率降低到 10.13% (表 2),总径流量减少了 84.90%,径流峰值减少了 88.99% (表 3);在 $P=20\%$ 设计暴雨下,降雨比率降低到 69.44%,总径流量减少了 20.97%,径流峰值减少了 0.10%。在 2 个暴雨重现期下,调蓄池的消减效果相差较大。在小的降雨事件下对总径流量和流量峰值的消减效果很好,但是在大的降雨下消减效果较差,这是因为调蓄池的调控能力是由自身的体积大小限制的。而且,由于设计的暴雨事件中,暴雨强度峰值靠后,在峰值来临之前,调蓄池的储水量已满,无调蓄作用,导致其对径流峰值的消减效果甚微。尽管调蓄池对径流的消减效果受到降雨量的影响波动较大,但是其更多的目的是收集和存储雨水。目前北京市正在居住小区内推广调蓄池建设,收集的雨水用来绿地灌溉、补充水景观和洗车等,实现暴雨径流的消减和雨水的资源化利用。值得注意的是,由于雨水季节性和成本因素,在工程实施中调蓄池的大小设计应充分考虑雨水利用效率和经济情况等^[41]。

2.2.4 路面透水砖铺装情景

随着城市化的快速发展,大量的不透水地表由于产流和汇流的迅速,增加了城市地区洪涝风险。采用渗透性良好的透水砖铺装路面是减少不透水面径流的有效途径之一^[42]。将 50% 的不透水面用混凝土透水砖铺装改造。与基本情景的模拟结果相比,在设计暴雨 $P=99.9\%$ 重现期下,透水砖铺装情景径流降雨比率降低到 35.88%,入渗降雨比率增加到 55.08% (表 2),总径流量减少了 46.51%,径流峰值减少了 39.96% (表 3);在 $P=20\%$ 设计暴雨事件下,透水砖铺装情景径流降雨比率降低到 54.03%,入渗降雨比率增加到 44.66%,总径流量减少了 38.52%,径流峰值减少了 35.48%。在 2 个暴雨重现期下相比较,透水砖铺装消减效果较稳定,但是在大的降雨事件下的消减效果略差于小的降雨事件,这是由于较大的雨强超过了透水铺装的渗透能力,雨水来不及入渗。透水路面通过入渗,在一定程度上恢复了自然的水文状况^[43]。由于透水路面减少和缓解了不透水地面的产流和汇流速率^[42,44-45],因此能够有效缓解不透水路面的积水和内涝问题。

总的来说,结合以上的结果分析和不同情景下径流过程图的比较分析(图 5)得出:凹式绿地和透水砖铺装设施都有良好的消减径流量和径流峰值,以及增加雨水入渗量的效果。随着降雨强度的增加,凹式绿地对径流的消减作用略增强,但是效果有限,透水砖铺装的消减效果比较稳定。调蓄池的消减效果取决于它

自身的体积和降雨量大小。调蓄池和透水砖铺装设施都表现出在小的降雨事件下消减效果好于大的降雨事件下的现象,与他人的一些研究结果相类似^[46-47]。因此需要综合这些设施的配置,来达到更好更稳定的消减效果^[48]。

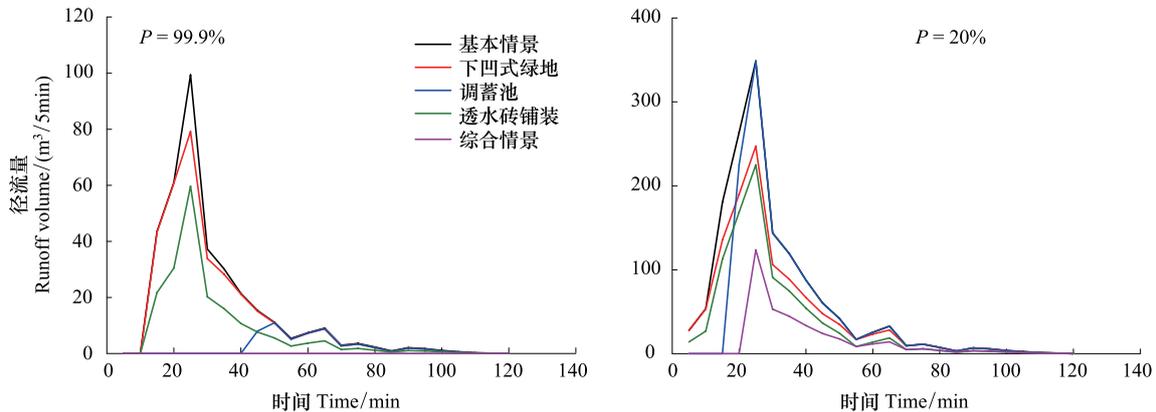


图5 不同模拟情景下的径流过程比较

Fig. 5 Comparison of runoff dynamic between different scenarios

2.2.5 综合情景

与基本情景的模拟结果相比,在设计暴雨 $P = 99.9\%$ 重现期下,综合情景下可以 100% 消减径流,入渗降雨比率增加到 60.61% (表 2); 在 $P = 20\%$ 设计暴雨事件下,综合情景的径流降雨比率降低到 21.56%,入渗降雨比率增加到 65.14%,总径流量减少了 75.47%,径流峰值减少了 64.52% (表 3)。与 3 个单独的设施情景相比,综合设施配置提高了径流消减效果,增强了不同降雨强度下的消减稳定性,在消减雨洪的同时,实现雨水入渗补给地下水和收集利用的效益。因此,合理设计综合的绿色基础设施配置可以达到最优的消减效果,实现雨洪调控和资源化利用,是科学可持续的雨洪管理途径之一^[22]。

3 结论

随着城市化的快速发展,城市发展过程中面临的洪涝灾害和水资源匮乏等共性问题日益严重。如何科学和可持续的调控管理城市雨洪是城市规划和管理者面临亟待解决的问题和挑战。本文介绍了绿色基础设施模拟模型设计理念和计算过程,并利用野外实地监测的降雨和径流数据验证了模型的准确性。在模型验证的基础上,模拟分析了下凹式绿地、调蓄池、透水砖铺装和综合配置情景对社区暴雨径流的消减效果,并且比较分析了不同绿色基础设施径流消减效果的优缺点。单个设施的径流消减效果较好,但是消减作用有限,效果单一。综合绿色基础设施配置不仅具有良好的径流消减效果,而且可以实现雨水入渗土壤和收集利用的环境经济效益,是社区消减雨洪和雨水资源利用的最优实践措施之一。

与同类模型相比,本模型结合水量平衡和城市水文的特点,综合了产流计算的准确性和参数的简化,注重了模型的可操作性,使这一模型适用于实施前期合理设计和科学评估绿色基础设施的需要。然而,在情景模拟设计中未考虑下凹式绿地接纳邻近屋顶和周围不透水路面部分径流的情形,导致下凹式绿地只是消减了绿地产生的大部分径流,造成了在 1 年一遇暴雨事件下的径流削减比例小于 5 年一遇削减比例。因此今后研究中需要结合实际情形合理设计绿色基础设施与不透水屋面和路面的水文连接方式,进一步深入分析和讨论两者之间不同水文连接方式对消减效果的影响;以及用实地监测的绿色基础设施径流数据来验证其消减效果。

参考文献 (References):

- [1] Whitford V, Ennos A R, Handley J F. "City form and natural process"—indicators for the ecological performance of urban areas and their application to Merseyside, UK. *Landscape and Urban Planning*, 2001, 57(2): 91-103.

- [2] Goonetilleke A, Thomas E, Ginn S, Gilbert D. Understanding the role of land use in urban stormwater quality management. *Journal of Environmental management*, 2005, 74(1): 31-42.
- [3] Villarreal E L, Semadeni-Davies A, Bengtsson L. Inner city stormwater control using a combination of best management practices. *Ecological Engineering*, 2004, 22(4/5): 279-298.
- [4] 胡伟贤, 何文华, 黄国如, 冯杰. 城市雨洪模拟技术研究进展. *水科学进展*, 2010, 21(1): 137-144.
- [5] Stone B Jr. Paving over paradise: how land use regulations promote residential imperviousness. *Landscape and Urban Planning*, 2004, 69(1): 101-113.
- [6] Mell I C. Can green infrastructure promote urban sustainability?. *Proceedings of the ICE-Engineering Sustainability*, 2009, 162(1): 23-34.
- [7] Coffman L. Low-impact development design strategies an integrated design approach: EPA 841-B-00-003. Prince George's Country, Maryland: Department of Environmental Resource, Programs and Planning Division, 2000.
- [8] 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. *中国给水排水*, 2010, 26(18): 50-54.
- [9] Brander K E, Owen K E, Potter K W. Modeled impacts of development type on runoff volume and infiltration performance. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2004, 40(4): 961-969.
- [10] Elliot A H, Trowsdale S A, Wadhwa S. Effect of aggregation of on-site storm-water control devices in an urban catchment model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009, 14(9): 975-983.
- [11] Gilroy K L, McCuen R H. Spatio-temporal effects of low impact development practices. *Journal of Hydrology*, 2009, 367(3/4): 228-236.
- [12] He Z, Davis A P. Process modeling of storm-water flow in a bioretention cell. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2011, 137(3): 121-131.
- [13] Qin H P, Li Z X, Fu G T. The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics. *Journal of Environmental Management*, 2013, 129: 577-585.
- [14] Spataro S, Yu Z W, Montalto F A. Life cycle implications of urban green infrastructure. *Environmental Pollution*, 2011, 159(8/9): 2174-2179.
- [15] Wang R R, Eckelman M J, Zimmerman J B. Consequential environmental and economic life cycle assessment of green and gray stormwater infrastructures for combined sewer systems. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(19): 11189-11198.
- [16] 侯爱中, 唐莉华, 张思聪. 下凹绿地和蓄水池对城市型洪水的影响. *北京水务*, 2007, (2): 42-45.
- [17] 晋存田, 赵树旗, 闫肖丽, 周玉文. 透水砖和下凹式绿地对城市雨洪的影响. *中国给水排水*, 2010, 1(26): 40-42, 46-46.
- [18] 赵冬泉, 董鲁燕, 王浩正. 降雨径流连续模拟参数全局灵敏性分析. *环境科学学报*, 2011, 31(4): 717-723.
- [19] Ahiablame L M, Engel B A, Chaubey I. Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2012, 223(7): 4253-4273.
- [20] Elliott A H, Trowsdale S A. A review of models for low impact urban stormwater drainage. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 22(3): 394-405.
- [21] Gao C, Liu J, Zhu J, Wang Z W. Review of current research on urban low-impact development practices. *Research Journal of Chemistry and Environment*, 2013, 17(S1): 209-214.
- [22] Liu W, Chen W P, Peng C. Assessing the effectiveness of green infrastructures on urban flooding reduction: a community scale study. *Ecological Modelling*, 2014, 291: 6-14.
- [23] Huber W C, Dickinson R E. Storm Water Management Model, Version 4 User's Manual; Report No EPA/600/3-88/001a. Athens; US Environmental Protection Agency, 1988.
- [24] Wang J, Endreny T A, Nowak D J. Mechanistic simulation of tree effects in an urban water balance model. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2008, 44(1): 75-85.
- [25] Hargreaves G H, Samani Z A. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1985, 1: 96-99.
- [26] Mein R G, Larson C L. Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resources Research*, 1973, 9(2): 384-394.
- [27] Linsley R K, Kohler M A, Paulhus J L H. *Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1949.
- [28] 王新星. 住宅小区不同下垫面滞蓄雨水的效果评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.
- [29] 徐向阳. 平原城市雨洪过程模拟. *水利学报*, 1998, 29(8): 34-37.
- [30] 雷晓辉, 蒋云钟, 王浩. 分布式水文模型 EasyDHM. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [31] 谢永华, 赵立新. 田间土壤特性的空间变异性. *中国农业大学学报*, 1998, 3(2): 41-45.
- [32] 符素华, 刘宝元, 吴敬东, 段淑怀. 北京地区坡面径流计算模型比较研究. *地理科学*, 2002, 22(5): 604-609.
- [33] Su F G, Xie Z H. A model for assessing effects of climate change on runoff in China. *Progress in Natural Science*, 2003, 13(9): 701-707.
- [34] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3):

282-290.

- [35] Santhi C, Arnold J G, Williams J R, Dugas W A, Srinivasan R, Hauck L M. Validation of the swat model on a large rwer basin with point and nonpoint sources. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2001, 37(5): 1169-1188.
- [36] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, Bingner R L, Harmel R D, Veith T L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 885-900.
- [37] 牟金磊. 北京市设计暴雨雨型分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2011.
- [38] 张金龙, 张志政. 下凹式绿地蓄渗能力及其影响因素分析. *节水灌溉*, 2012, (1): 44-47.
- [39] 任树梅, 周纪明, 刘红, 孟光辉. 利用下凹式绿地增加雨水蓄渗效果的分析与计算. *中国农业大学学报*, 2000, 5(2): 50-54.
- [40] 叶水根, 刘红, 孟光辉. 设计暴雨条件下下凹式绿地的雨水蓄渗效果. *中国农业大学学报*, 2001, 6(6): 53-58.
- [41] 丛翔宇, 倪广恒, 惠士博, 田富强, 张彤. 基于 SWMM 的北京市典型城区暴雨洪水模拟分析. *水利水电技术*, 2006, 37(4): 64-67.
- [42] 赵飞, 张书函, 陈建刚, 孔刚, 龚应安. 透水铺装雨水入渗收集与径流削减技术研究. *给水排水*, 2011, 37(增刊): 254-258.
- [43] Fassman E A, Blackbourn S. Urban runoff mitigation by a permeable pavement system over impermeable soils. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2010, 15(6): 475-485.
- [44] Bean E Z, Hunt W F, Bidelspach D A. Field survey of permeable pavement surface infiltration rates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2007, 133(3): 249-255.
- [45] Drake J, Bradford A, Van Seters T. Stormwater quality of spring-summer-fall effluent from three partial-infiltration permeable pavement systems and conventional asphalt pavement. *Journal of Environmental Management*, 2014, 139: 69-79.
- [46] Holman-Dodds J K, Bradley A A, Potter K W. Evaluation of hydrologic benefits of infiltration based urban storm water management. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2003, 39(1): 205-215.
- [47] Schneider L E, McCuen R H. Assessing the hydrologic performance of best management practices. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2006, 11(3): 278-281.
- [48] Mentens J, Raes D, Hermy M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 77(3): 217-226.