

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.05.04

绿色屋顶对城市流域径流的影响

高玉琴¹, 王冬冬¹, SCHMIDT Arthur², 唐云²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校土木与环境工程学院, 美国 厄巴纳-香槟 61801)

摘要:为使绿色屋顶技术在城市雨洪管理中有效发挥作用,寻求一种高效可靠的评估绿色屋顶应用对城市流域径流影响的方法。以伊利诺伊州 CDS-51 流域为例,利用 Matlab 程序建立 IUHM-GR (Illinois urban hydrologic model-green roof) 组合模型,考虑不同绿色屋顶覆盖率,以及透水-不透水、不透水-透水、组合情况等不同径流方式的情况,分析了绿色屋顶的应用对流域径流的影响。结果表明:绿色屋顶具有较好的蓄滞效果,可有效削减流域径流总量和峰值,且绿色屋顶覆盖率比绿色屋顶径流方式对流域径流有更大的影响。

关键词:绿色屋顶; IUHM-GR 组合模型; 城市流域径流; 雨洪管理; 伊利诺伊州

中图分类号: TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2018)05-0020-07

Analysis of effect of green roof on urban runoff

GAO Yuqin¹, WANG Dongdong¹, SCHMIDT Arthur², TANG Yun²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana-Champaign 61801, USA)

Abstract: In order to make the green roof technology play an effective role in urban stormwater management, this paper seed an efficient and reliable method to evaluate the effect of green roof application on urban runoff. Taking calumet drop shaft 51 (CDS-51) of Illinois as a case study, IUHM-GR (Illinois urban hydrologic model-green roof) combined model was established via Matlab, which considered different green roof coverage ratios and runoff conditions (pervious-impervious, impervious-pervious, and combined conditions) and analyzed the effect of green roof application on watershed runoff. The results show that the green roof has good water storage capacity and can effectively reduce the total runoff volume and peak value. Moreover, the green roof coverage ratio has a greater impact on runoff than the green roof runoff condition.

Key words: green roof; IUHM-GR combined model; urban runoff; stormwater management; Illinois

随着城市化的高速发展,城市地貌不断改变,城区不透水区域面积现已远远超过自然水域。城区典型不透水区包括屋面、道路、停车场等^[1-2],这些区域的封闭效应引发了暴雨洪水、热岛效应等一系列环境问题。在美国,雨洪管理已经成为一个重要议题,尤其是对那些人口密集且降雨频发的大城市而

言^[3-4]。以芝加哥为例,发生暴雨时,城市排水系统往往难以及时排泄大量雨水,从而导致城市积水、下水道污水溢流进入排水沟,并且在极端暴雨情况下,污水还会流入密歇根湖,直接威胁当地的水源安全^[5]。

城市扩建带来的副作用促使各种雨水管理可

持续发展策略,如雨水花园、集水桶、植物洼地、绿色屋顶、透水路面等相继出现。在这几种颇具发展前景的管理措施中,绿色屋顶由于其具有的空间灵活性而受到普遍欢迎^[6]。绿色屋顶是修建在建筑物屋顶上相对独立的植被系统,常规的绿色屋顶主要由6个部分组成,从上到下依次为植被层、土壤基质层、土工布过滤层、排(蓄)水层、屋面防水层和屋顶甲板^[7],如图1所示。作为一种新型的绿化形式,绿色屋顶能够在一定程度上降低降雨产生的径流总量和峰值,延缓产流时间,改善径流水质,并能使城市水文循环过程趋向自然化,从而降低城市径流产生的风险^[8-11]。绿色屋顶还能降低建筑物室内温度,改善城市热岛效应和微气候条件,提高宜居程度^[12-14]。目前,美国已经实施了多项优惠政策来鼓励绿色屋顶的推广应用,如市民可以通过在自家屋顶上应用绿色屋顶技术以免除雨水管理税^[15]。

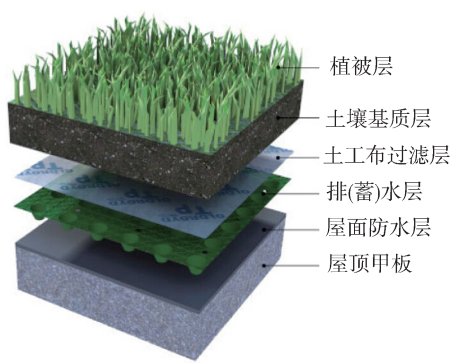


图1 绿色屋顶基本结构分层示意图

目前,还没有可用于模拟绿色屋顶水文过程的标准方法,常用的建模方法主要有4种:①基于试验站收集的径流数据的统计分析方法;②基于地下水开发应用的物理模型方法;③将绿色屋顶视为线性水库的分析模型方法;④将绿色屋顶视为带有限制性出口的简单水库的水平衡模型方法^[3,15]。Hiltner等^[3]基于Hydrus-1D模型对绿色屋顶降低洪水径流的有效性进行了研究,结果表明降雨深度对绿色屋顶性能有较大影响;She等^[15]在Fortran基础上构建了一个用于模拟雨水在绿色屋顶内运动情况的物理模型,并采用3年实测径流数据对模型进行了校准;Kasmin等^[16]为绿色屋顶的水文过程建立了一个简单的概念模型,旨在确定每月的土壤水分蒸散发量;Versini等^[17]开发了一个概念模型将其整合进暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM),并分别从单个建筑物尺度及流域尺度应用模型对绿色屋顶性能进行了研究,结果表明绿色屋顶在城市雨洪管理中具有积极贡献。然而,现有的模型大多没有基于绿色屋顶水文和水力过程的物理

机制,同时还需大量输入数据,影响了模型在实际问题中的应用。因此,本文基于水文学原理建立绿色屋顶径流的模拟模型,并与城市水文模型相结合,探索绿色屋顶的应用对城区流域径流的影响。

1 模型的建立

本文将伊利诺伊州城市水文模型(Illinois urban hydrologic model, IUHM)作为实现目标的基本模型。由于IUHM只能模拟透水和不透水地面,因此,为了考虑第三种地表类型——应用绿色屋顶后的地表,对模型进行相应的调整。为了便于与IUHM结合,运用Matlab构建一个独立的数学模型模拟绿色屋顶(green roof, GR),并将其与IUHM整合为IUHM-GR组合模型。组合模型可生成绿色屋顶降雨-径流关系,用于分析绿色屋顶对于城市流域径流的影响。

1.1 IUHM

IUHM是由Canton等^[18]创建的一种用于模拟复杂城市下水道系统的数学模型。模型基于Rodriguez-Iturbe等^[19]提出的地貌瞬时单位线(geomorphology instantaneous unit hydrography, GIUH)的概念,通过Strahle分级系统,将 Ω 级的城区流域分为不同的状态(地表状态或管道状态),并用这两种状态分别模拟地面过剩径流和渠道水流。上述两种状态下,水流行进时间均根据运动波假设计算。雨滴落到流域后,将相继由低阶管道向高阶管道流动,直至到达流域出口^[18]。

IUHM由用户定义的降雨强度序列驱动水文响应,通过将地表划分为透水区和不透水区,得到水流可能流动路径总数为 2^n ,这比确定性方法所需要建立的路径总数少得多。对于每一条路径,在每种状态下均有相应的水流行进时间的指数分布。通过水流行进时间的概率密度函数和水滴通过特定路径的概率,推导出流域的网络脉冲响应函数。再结合网络脉冲响应函数与过剩径流可能通过的所有路径,得出流域的径流水文图。该模型需要输入地面坡降、管道坡降、子流域面积和不透水性4项参数的均值和方差。与传统模型不同的是,IUHM无需通常难以获取的数据,如所有管道的详细参数及地面特征参数等,但仍能得出较为精确的输出结果。IUHM在Matlab程序中构建,允许合并其他水文或水力过程,如最佳管理措施(best management practices, BMPs),这使得随后的整合容易实现。

1.2 绿色屋顶水文模型

模型采用Green-Ampt方法^[20]计算绿色屋顶的渗透能力,并将整个降雨-径流过程分成4个阶段。

1.2.1 初始阶段

初始阶段发生在降雨初期。随着降雨的持续发生,土壤含水量不断增加,但并未达到田间持水量。所有的降雨都将下渗并储存在土壤中,因此该阶段绿色屋顶不会产流,径流强度为零。

1.2.2 预饱和阶段

在这个阶段土壤含水量超过了田间持水量但还未达到饱和。在这种状态下,湿润锋面到达了土壤底部,随着降雨的持续下渗,一些水从土层底部流出,径流由此产生。在这个阶段下,假定绿色屋顶为一个线性水库,因此排水率和土柱中的实时储水量成正比。径流强度可由式(1)计算。

q(t) = aS(t)/Δt (1)

S(t + Δt) = S(t) + f(t)Δt - q(t)Δt (2)

式中: q(t) 为 t 时的径流强度,mm/h;a 为预饱和阶段校正系数;t 为时间,h; Δt 为间隔时间,h;S(t) 和 S(t + Δt) 分别为土壤 t 和 t + Δt 时的储水量,mm; f 为下渗率,mm/h。

1.2.3 饱和阶段

尽管在预饱和阶段就发生了径流,但径流量相对于下渗量仍小得多。土壤含水量继续增加,达到饱和含水量时,土体进入饱和状态。在这个阶段,系统达到了一种相对平衡的状态,可用达西定律来计算径流强度:

q(t) = K[D + h(t)]/D (3)

式中:K 为土壤饱和导水率,mm/h;D 为土壤深度,mm;h(t) 为 t 时的积水深度,mm。

1.2.4 衰退阶段

降雨停止后,积水逐渐下渗或蒸发。由于土柱中储存了水分,所以径流仍在继续。但随着时间的推移,排水率逐渐减小。假定径流遵循指数衰减,直至土壤含水量下降到初始值,径流强度由下式确定:

q(t + Δt) = q(t)e^{-λ} (4)

式中 λ 为衰退阶段校正系数。

1.3 IUHM-GR 组合模型

绿色屋顶数学模型作为一个子函数嵌入 IUHM,不会大幅改变 IUHM 的编码,保证了程序的可读性。相较于原始的 IUHM,编码的主要变化如下:

a. 在不透水区域中,定义绿色屋顶覆盖率 r 为被替换为绿色屋顶的不透水面积的百分比。即若 r = 20%,则 20% 的不透水面积被替换为绿色屋顶面积。用户可以通过改变 r 的大小研究不同绿色屋顶覆盖率对流域径流的影响。

b. 引入了绿色屋顶径流流向不透水区域的比例这一变量,记为 g,取值范围为 0~1。g = 0,表示

绿色屋顶产生的径流全部流向透水区域;g = 1,则表示绿色屋顶产生的径流全部流向不透水区域。用户可以通过改变 g 来研究各种路径方式对流域径流的影响。

c. 由于绿色屋顶的引入,原不透水区域面积以相同的比例减小。不透水区域面积的减小,导致不透水区域地表径流的平均长度减小。

d. 绿色屋顶模型被嵌入到 IUHM 中用以生成降雨-径流关系。绿色屋顶径流的流入,影响不透水地表和透水地表上的过剩径流。流域径流是通过过剩径流的复杂集成和网络脉冲函数计算的,而网络脉冲函数对于特定的流域来说是不变的,因此流域径流对过剩径流的变化十分敏感。

2 实例分析

2.1 流域概况

卡柳梅特县(calumet)51号跌水竖井(calumet drop shaft 51, CDS-51)流域位于伊利诺伊州的多尔顿市,面积 316.5 hm²,是一个 5 级、复杂的城市流域系统。图 2 是 CDS-51 流域排水管道系统示意图。该流域可接纳暴雨和污水的组合水流,并输送到芝加哥隧洞与水库规划(tunnel and reservoir plan, TARP)^[18]的卡柳梅特系统中。水流将从低阶管道流向高阶管道,最终停止于直径为 2 150 mm 的 5 级管道中。研究中以流域出口径流作为对比变量,探究应用绿色屋顶带来的影响。

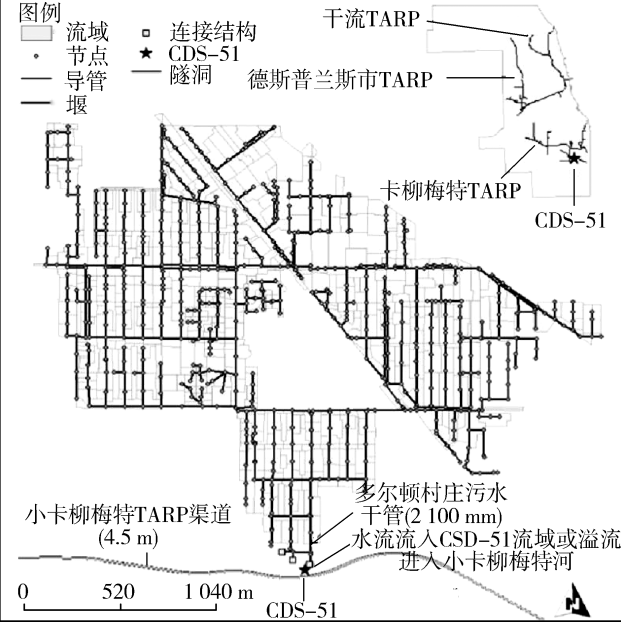


图 2 CDS-51 流域排水管道系统示意图

2.2 降雨事件

选取两场典型暴雨检验 IUHM-GR 组合模型的模拟效果:2008 年 1 月低强度长历时暴雨、2007 年

7月高强度短历时暴雨。两场暴雨降雨强度如图3所示。

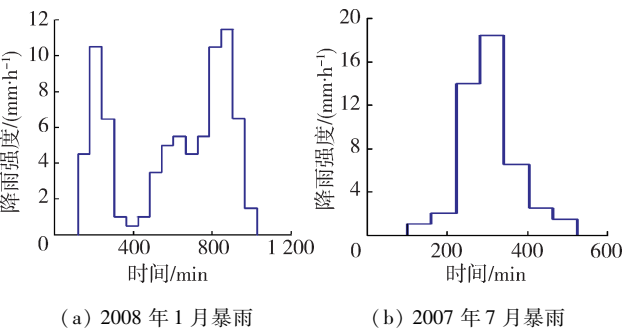


图3 两场暴雨降雨强度

2008年1月暴雨起始于1月7日18:00,持续时间长达15 h,峰值强度为11.5 mm/h,降水总量79.2 mm。2007年7月暴雨起始于7月26日2:00,持续时间7 h,峰值强度18.8 mm/h,降水总量为46.7 mm。选取这两场暴雨的原因是 Cantone 等^[18]已运用 IUHM 成功模拟了 CDS-51 流域在这两场暴雨下的出口径流,模拟结果与实际数据匹配良好。确保了引入绿色屋顶后产生的径流和初始径流的可比性。

2.3 绿色屋顶参数

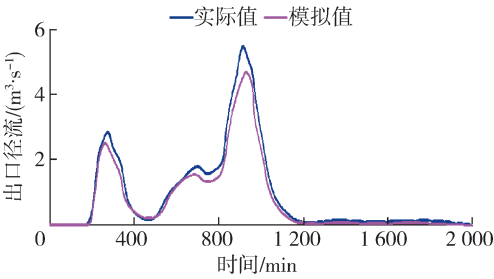
考虑到粗放型屋顶由于其自身的低重量和低维护性而适用于大多数建筑物屋顶,选取具有200 mm厚度生长介质的粗放型绿色屋顶用于模拟。生长介质选取沙壤土,其排水性能佳,且能存储植物生长所需的大量水分,土壤主要水力参数为:饱和导水率11 mm/h,土壤水吸力水柱高度110 mm,土壤初始含水率0.041,田间持水率0.18,土壤饱和含水率0.453。绿色屋顶其余输入参数为:排水口高度120 mm,预饱和阶段校正系数 a 为0.0025,衰退阶段校正系数 λ 为0.002。根据 Bengtsson 等^[21]的研究结果,对于广义的粗放型绿色屋顶,蒸发率在0.05 mm/h左右,该值被用于绿色屋顶的衰退阶段,其他3个阶段蒸发率假定为零。为了便于比较,填洼量与 IUHM 中设置的相同,为3.8 mm。

2.4 模型率定与验证

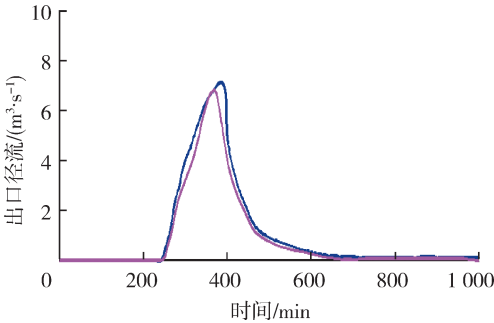
流域绿色屋顶覆盖率为20%,两场暴雨下模型率定期和验证期流域出口径流量、径流峰值的相对误差均在15%以内,Nash系数及相关系数均大于0.8,表明模型可用于绿色屋顶对城市流域径流影响的模拟。流域出口径流实际值和模拟值对比见图4。

2.5 模拟工况

在 IUHM 中,地表径流有两种流动方式,一种是从透水区流向不透水区(以下简称“透水-不透水情况”),另一种则相反(以下简称“不透水-透水情况”)。



(a) 1月暴雨



(b) 7月暴雨

图4 流域出口径流实际值和模拟值对比

a. 透水-不透水情况。①为了研究不同绿色屋顶覆盖率的径流影响,假定模型中绿色屋顶产生的径流全部流向透水区域,绿色屋顶覆盖率 r 分别设定为20%、30%、40%、50%等5种情况。②为了研究绿色屋顶径流路径改变产生的径流影响,设定模型的绿色屋顶覆盖率20%,绿色屋顶产生的径流路径分别设定为全部流向不透水区域、全部流向透水区域以及一半流向不透水区域、一半流向透水区域路径。

b. 不透水-透水情况。只研究不同绿色屋顶覆盖率为20%、30%、40%、50%时对流域出口径流的影响。

c. 组合情况。上述两种地表径流方式均为极端情况,基于实际情况,通过简单给定百分比的方式实现上述两种条件的组合运用。

3 结果与讨论

3.1 绿色屋顶降雨-径流关系

绿色屋顶的入渗机理形成了独特的降雨-径流关系。图5表明了两场暴雨事件下的绿色屋顶径流过程。绿色屋顶延缓产流时间,这对于低雨强、长历时且降雨峰值低、退水历时长的暴雨事件效果更为明显。1月暴雨峰值强度11.5 mm/h;绿色屋顶洪峰径流量6.25 mm/h,峰值削减率为45.7%。在7月暴雨下,绿色屋顶雨水滞留效应更为显著。7月暴雨峰值强度18.8 mm/h,绿色屋顶洪峰径流量仅为5.10 mm/h,峰值削减率高达72.9%。上述结果表明,绿色屋顶在滞留雨水

方面效果显著,尤其是对于高雨强、短历时的降雨事件。

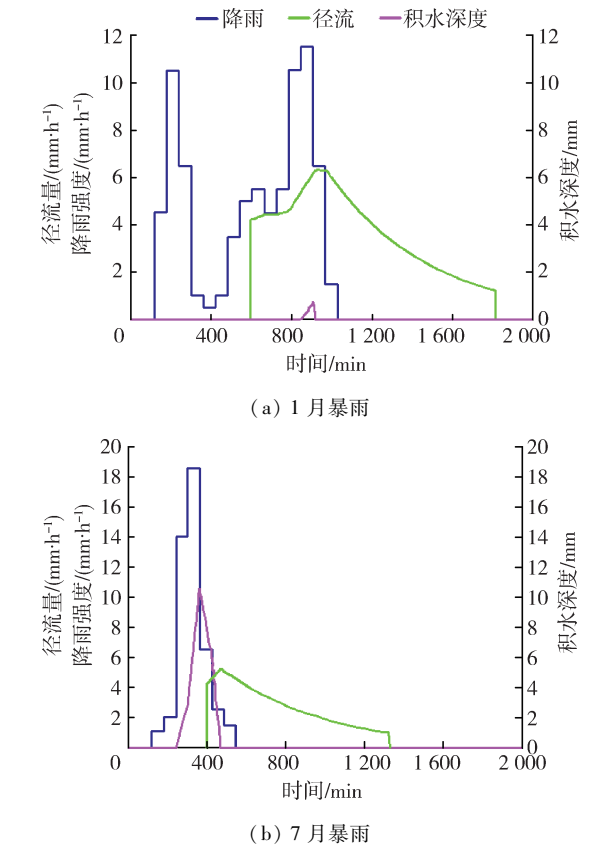


图5 绿色屋顶降雨-径流关系

3.2 透水-不透水情况下绿色屋顶对径流的影响

在城市区域,由透水区向不透水区的地表径流演进方式更为常见,其模型运行结果如图6所示(图中初始情况为不在流域中设置绿色屋顶的情况)。

对于1月暴雨,不同绿色屋顶覆盖率情形下的流域径流峰值变化情况见表1。经分析可知,两次洪峰流量减小速率不同是由于绿色屋顶的滞留效应。降雨事件开始时,绿色屋顶存储所有下渗的水;入渗的雨水超过土壤饱和容量时,再缓慢释放出去。当第一次出现降雨高峰时,绿色屋顶仍能吸收落在上面的所有雨水;但当第二次高峰来临时,绿色屋顶已经开始释放其中的水分。故第二次洪峰流量没有

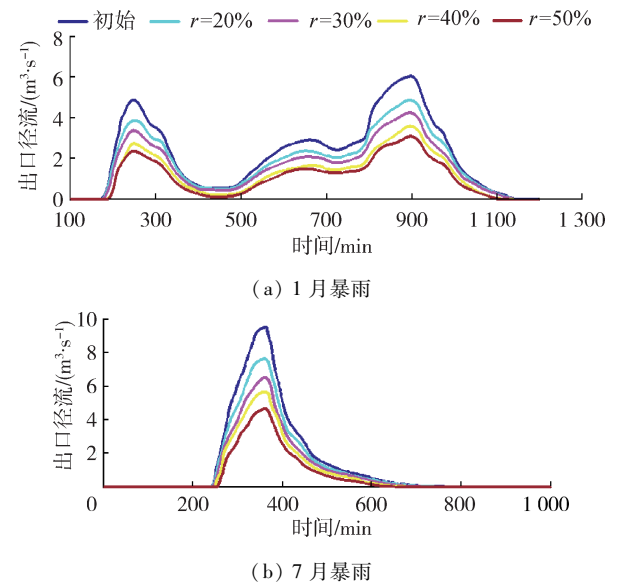


图6 透水-不透水情况下不同绿色屋顶覆盖率的流域径流过程

第一次洪峰流量减小的多。

对于7月暴雨,洪峰流量减小率与1月暴雨下的情况相近。上述结果表明在透水-不透水的地表径流演进情况下,绿色屋顶对于低雨强、长历时和高雨强、短历时的暴雨具有相似的滞留效应。

除了绿色屋顶覆盖率,径流演进状况也会影响流域出口径流。模型运行结果如图7所示。由图7可知,在1月暴雨下,当更多的径流流向透水面积时,洪峰流量往往更小。因为当径流流向透水区时,透水区可以吸收并允许更多的水下渗。应当注意的是,第一次洪峰流量几乎不随绿色屋顶径流方式的改变而改变,但当更多的绿色屋顶径流流向透水区时,第二次洪峰流量则明显减小。这种差异体现了绿色屋顶的滞留效应。

7月暴雨下的洪峰流量几乎不随绿色屋顶径流演进方式的改变而改变。在不同的绿色屋顶径流演进方式下,整个流域径流曲线几乎相互重叠。洪峰流量出现稳定的原因可能是相比于下渗能力,暴雨强度过大,即使绿色屋顶径流流向透水区域,径流仍可能因得不到下渗而成为过剩径流离开透水区。

表1 透水-不透水情况下不同绿色屋顶覆盖率下的流域径流峰值变化

绿色屋顶覆盖率/%	1月暴雨						7月暴雨		
	第一个峰值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	累积峰值 减少率/%	峰值减 少率/%	第二个峰值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	累积峰值 减少率/%	峰值减 少率/%	峰值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	累积峰值 减少率/%	峰值减 少率/%
0	4.88			6.07			9.61		
20	3.84	21.22	21.22	4.85	20.07	20.07	7.66	20.30	20.30
30	3.32	31.91	10.69	4.24	30.11	10.04	6.68	30.47	10.17
40	2.80	42.52	10.61	3.63	40.15	10.05	5.70	40.65	10.18
50	2.29	53.04	10.52	3.02	50.21	10.05	4.72	50.84	10.19

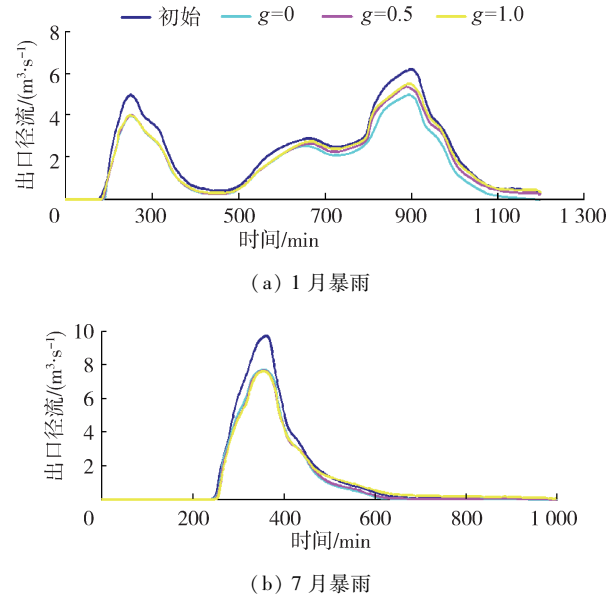


图 7 透水-不透水情况下不同绿色屋顶径流演进方式的流域径流过程 ($r=20\%$)

在两场暴雨下,绿色屋顶径流演进方式比绿色屋顶覆盖率对流域径流的影响要小。

3.3 不透水-透水情况下绿色屋顶对径流的影响

由于城市建设中绿色技术应用的日益增加,本文同样考虑不透水区向透水区的地表径流演进方式,其模型运行结果如图 8 所示。流域径流量和峰值均随绿色屋顶覆盖率的增加而减少。由表 2 可知,7 月暴雨洪峰流量的下降速率大于 1 月暴雨情况,且几乎是 1 月降雨事件的两倍。上述结果表明,在不透水-透水情况下,比起低雨强、长历时的降雨事件,绿色屋顶对高雨强、短历时的暴雨具有更好的滞留效应。

3.4 组合情况下绿色屋顶对径流的影响

考虑传统的土地开发利用情况和现今的城市化发展,据估计,60%的地表径流由透水区流向不透水区,另 40%则相反。图 9 表明在组合情况下,两场典型暴雨应用 20%的绿色屋顶覆盖率对城市流域径流的影响情况(所有绿色屋顶径流均流向透水区域)。

对于 1 月暴雨,第一次和第二次径流峰值分别下降了 22% 和 18.6%。对于 7 月暴雨,峰值流量大概减小 22%。

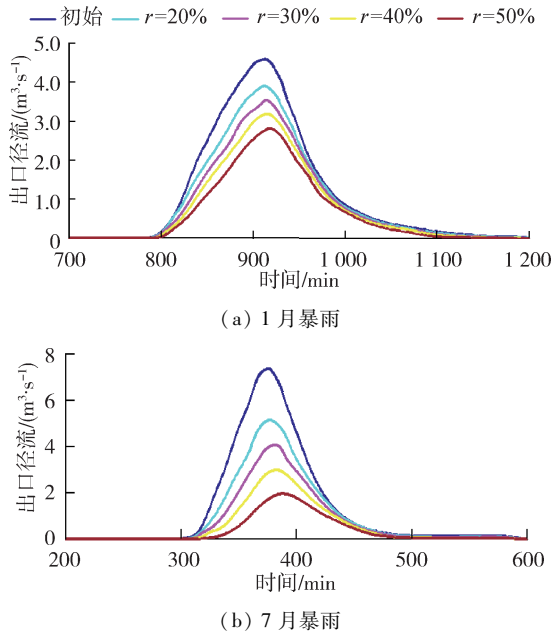


图 8 不透水-透水情况下不同绿色屋顶覆盖率的流域径流过程比较

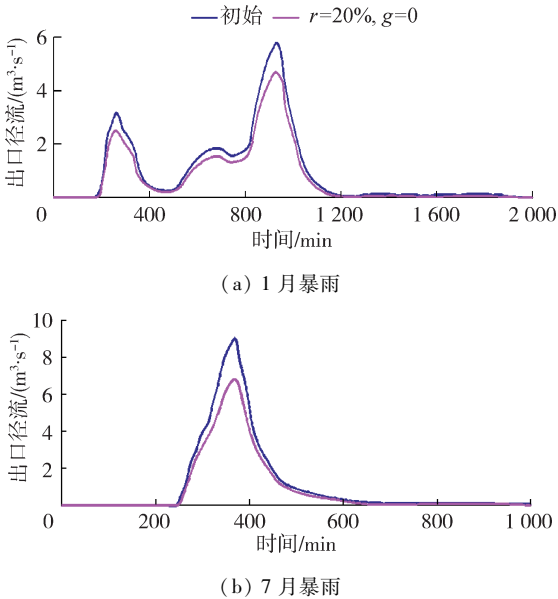


图 9 组合情况下的流域径流过程

4 结 语

a. 在透水-不透水地表径流情况下,绿色屋顶对于两场暴雨具有相似的蓄滞效果。但当更多的绿

表 2 不透水-透水情况下不同绿色屋顶覆盖率下的流域径流峰值变化

绿色屋顶覆盖率/%	1 月暴雨			7 月暴雨		
	峰值/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	累积峰值减少率/%	峰值减少率/%	峰值/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	累积峰值减少率/%	峰值减少率/%
0	4.61			7.55		
20	3.91	15.21	15.21	5.20	31.15	31.15
30	3.55	22.96	7.75	4.10	45.70	14.55
40	3.19	30.82	7.86	3.03	59.88	14.18
50	2.82	38.80	7.98	1.98	73.79	13.91

色屋顶径流流向不透水区域时,流域径流峰值将会更高。但在高雨强、短历时的降雨事件下,这种效应会减小。

b. 绿色屋顶覆盖率比起绿色屋顶径流演进方式对流域径流有着更大的影响。

c. 在不透水-透水地表径流情况下,流域径流总量和峰值都随绿色屋顶覆盖率的增加而减小。比起低雨强、长历时的降雨事件,绿色屋顶对高雨强、短历时的暴雨具有更好的蓄滞效果。

d. 在组合的地表径流情况下,对于选取的两种暴雨类型,应用 20% 的绿色屋顶覆盖率均可减少约 22% 的流域径流峰值。但流域径流峰值减少率会随地表径流演进方式组合百分比的改变而改变。

本文可为探究不同情形下实施绿色屋顶对城市流域径流的影响提供参考。由于缺乏可靠的绿色屋顶降雨径流的测量数据,模型中的校正参数实际上未进行校准。经过修正,本研究提出的 IUHM - GR 模型可以扩展到更多的最佳管理措施中,如雨水花园、植物洼地、透水路面等。考虑了各种 BMPs 的 IUHM 也可以作为将来的一个研究方向。

参考文献:

[1] LOCATELLI L, MARK O, MIKKELSEN P S, et al. Modelling of green roof hydrological performance for urban drainage applications [J]. Journal of Hydrology, 2014, 519:3237-3248.

[2] 黄津辉,段亭亭. 中国海绵城市开发与加拿大综合雨洪管理对比研究:以多伦多为例 [J]. 水资源保护, 2017, 33 (5): 5-12. (HUANG Jinhui, DUAN Tingting. Comparative study on sponge city development in China and integrated stormwater management in Canada: a case study of Toronto [J]. Water Resource Protection, 2017, 33 (5): 5-12. (in Chinese))

[3] HILTEN R N, LAWRENCE T M, TOLLNER E W. Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D [J]. Journal of Hydrology, 2008, 358 (3): 288-293.

[4] 李俊奇,李小静,王文亮,等. 美国雨水径流控制技术导则讨论及其借鉴 [J]. 水资源保护, 2017, 33 (2): 6-12. (LI Junqi, LI Xiaojing, WANG Wenliang, et al. Technical guidance for stormwater runoff control in United States and its significance [J]. Water Resource Protection, 2017, 33 (2): 6-12. (in Chinese))

[5] ZHU Zhenduo, MORALES V, GARCIA M H. Impact of combined sewer overflow on urban river hydrodynamic modelling: a case study of the Chicago waterway [J]. Urban Water Journal, 2017, 14 (9): 984-989.

[6] BERNDTSSON J C. Green roof performance towards

management of runoff water quantity and quality: a review [J]. Ecological Engineering, 2010, 36 (4): 351-360.

[7] MENTENS J, RAES D, HERMY M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century [J]. Land Landscape and Urban Planning, 2006, 77 (3): 217-226.

[8] BATESA J, SADLER J P, MACKAY R. Vegetation development over four years on two green roofs in the UK [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2013, 12 (1): 98-108.

[9] NAGASEA, DUNNETT N. Establishment of an annual meadow on extensive green roofs in the U K [J]. Land Landscape and Urban Planning, 2013, 112: 50-62.

[10] OBERNDORFER E, LUNDHOLM J, BASS B, et al. Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services [J]. Bio Science, 2007, 57 (10): 823-833.

[11] VANWOERT N D, ROWE D B, ANDRESEN J A, et al. Green roof stormwater retention: effects of roof surface, slope, and media depth [J]. Journal of Environmental Quality, 2005, 34 (3): 1036-1044.

[12] 唐莉华,倪广恒,刘茂峰,等. 绿化屋顶的产流规律及雨水滞蓄效果模拟研究 [J]. 水文, 2011, 31 (4): 18-22. (TANG Lihua, NI Guangheng, LIU Maofeng, et al. Study on runoff and rainwater retention capacity of green roof by experiment and model simulation [J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31 (4): 18-22. (in Chinese))

[13] TAKEBAYASHI H, MORIYAMA M. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island [J]. Building and Environment, 2007, 42 (8): 2971-2979.

[14] DENARDO J C, JARRETT A R, MANBECK H B, et al. Stormwater mitigation and surface temperature reduction by green roofs [J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2005, 48: 1491-1496.

[15] SHEN, ASCE M, PANG J, et al. Physically based green roof model [J]. Journal of Hydrological Engineering, 2010, 15 (6): 458-464.

[16] KASMIN H, STOVIN V R, HATHWAY E A. Towards a generic rainfall-runoff model for green roofs [J]. Water Science & Technology, 2010, 62 (4): 898-905.

[17] VERSINI P A, RAMIER D, BERTHIER E, et al. Assessment of the hydrological impacts of green roof: from building scale to basin scale [J]. Journal of Hydrology, 2015, 524: 562-575.

[18] CANTONE J, SCHMIDT A. Improved understanding and prediction of the hydrologic response of highly urbanized catchments through development of the Illinois Urban Hydrologic Model [J]. Water Resources Research, 2011, 47 (8): 8538.

(下转第 33 页)

Hydrology,2005,25(3):63-64. (in Chinese))

[4] 蔡庆拟,陈志和,陈星,等. 低影响开发措施的城市雨洪控制效果模拟[J]. 水资源保护,2017,33(2):31-36. (CAI Qingni,CHEN Zhihe,CHEN Xing,et al. Simulation of control efficiency of low impact development measures for urban stormwater[J]. Water Resources Protection, 2017,33(2):31-36. (in Chinese))

[5] 张明泉,张曼志,张鑫,等. 济南“2007·7·18”暴雨洪水分析[J]. 中国水利,2009(17):40-41,44. (ZHANG Mingquan,ZHAO Manzhi,ZHANG Xin,et al. Storm flood analysis of Jinan on July 18th,2007[J]. China Water Resources,2009(17):40-41,44. (in Chinese))

[6] 汤鹏,王玮,张展,等. 海绵城市建设中建成区雨洪格局的量化研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2018,42(1):15-20. (TANG Peng,WANG Wei,ZHANG Zhan,et al. Quantitative research on rain-flood patterns of urban area in the construction of “sponge cities”[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition),2018,42(1):15-20. (in Chinese))

[7] WIM N, AMELIA U S, MARK M. Measuring vulnerability: an overview and introduction [J]. Oxford Development Studies,2009,37(3):183-191.

[8] 商彦蕊. 灾害脆弱性概念模型综述[J]. 灾害学,2013,28(1):112-116. (SHANG Yanrui. Overview on disaster vulnerability concep-tual model [J]. Journal of Catastrophology,2013,28(1):112-116. (in Chinese))

[9] 饶育萍,林竞羽,周东方. 网络抗毁度和节点重要性评价方法[J]. 计算机工程,2009,35(6):14-16. (RAO Yuping,LIN Jingyu,ZHOU Dongfang. Method for network invulnerability and node importance evaluation [J]. Computer Engineering, 2009, 35 (6): 14-16. (in Chinese))

[10] 汪小帆,李翔,陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,2006:10-11.

[11] 赵正旭,封筠,张志华. 工程软件数据格式转换网络的复杂性分析[J]. 复杂系统与复杂性科学,2010,7(1):75-81. (ZHAO Zhengxu, FENG Yun, ZHANG Zhihua. Complexity analysison engineering software data format conversion networks[J]. Complex Systems and Complexity Science,2010,7(1):75-81. (in Chinese))

[12] 杨建新,周献中,葛银茂. 复杂网络形态研究及其应用[J]. 上海理工大学学报,2008,30(3):231-236. (YANG Jianxin,ZHOU Xianzhong,GE Yinmao. Complex networks morphology and its application[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology,2008,30(3):231-236. (in Chinese))

[13] 周漩,张凤鸣,李克武,等. 利用重要度评价矩阵确定复杂网络关键节点[J]. 物理学报,2012,61(5):1-7. (ZHOU Xuan,ZHANG Fengming,LI Kewu,et al. Finding vital node by node importance evaluation matrix in complex networks[J]. Acta Physica Sinica,2012,61(5):1-7. (in Chinese))

[14] 朱国威,王先培,贺瑞娟,等. 基于重要度评价矩阵的电网关键节点辨识高电压技术[J]. 2016(10):3347-3353. (ZHU Guowei,WANG Xianpei,HE Ruijuan,et al. Identification of vital node in power grid based on importance evaluation matrix [J]. 2016(10):3347-3353. (in Chinese))

[15] 孙睿,罗万伯. 网络舆论中节点重要性评估方法综述[J]. 计算机应用研究,2012,29(10):3606-3608,3628. (SUN Rui, LUO Wanbo. Review on evaluation of node importance in public opinion[J]. Application Research of Computers, 2012, 29 (10): 3606-3608, 3628. (in Chinese))

[16] 叶春森,汪传雷,刘宏伟. 网络节点重要度评价方法研究[J]. 统计与决策,2010(1):22-24. (YE Chunlei, WANG Chuanlei, LIU Hongwei. Research on evaluation method of node importance in networks[J]. Statistics and Decision,2010(1):22-24. (in Chinese))

[17] 陈静,孙林夫. 复杂网络中节点重要度评估[J]. 西南交通大学学报,2009,44(3):426-429. (CHEN Jing, SUN Linfu. Evaluation of node importance in complex networks [J]. Journal of Southwest Jiantong University, 2009, 44 (3): 426-429. (in Chinese))

(收稿日期:2017-09-25 编辑:王 芳)

+++++

(上接第 26 页)

[19] RODRIGUEZ-ITURBE I, VALDES J B. The geomorphological structure of hydrologic response [J]. Water Resources Research,1979,15(6):1409-1420.

[20] 张振华,潘英华,蔡焕杰,等. Green-Ampt 模型入渗率显式近似解研究[J]. 农业系统科学与综合研究,2006,22(4):308-311. (ZHANG Zhenhua, PAN Yinghua, CAI Huanjie,et al. Approximate explicit solution to infiltration rate of Green-Ampt infiltration formula[J]. System Science and Comprehensive Studies in Agriculture,2006,22(4):308-311. (in Chinese))

[21] BENTGSSON L, GRAHN L, OLSSON J. Hydrological function of a thin extensive green roof in southern Sweden [J]. Nordic Hydrology,2005,36(3):259-268. (收稿日期:2018-01-05 编辑:徐 娟)