

Study on the Runoff Generation Mechanism of Green Roofs under Stormwater Scenarios

Ting Sun, Wenyu Yang, Guangheng Ni

Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing
Email: sunt05@mails.tsinghua.edu.cn

Received: Sep. 30th, 2013; revised: Nov. 20th, 2013; accepted: Nov. 26th, 2013

Copyright © 2014 Ting Sun et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2014 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Ting Sun et al. All Copyright © 2014 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: Green roofs (GRs) are widely employed in urban areas to mitigate the detrimental impacts by stormwater flooding. However, a simple yet physical method for assessing the hydrological performance of GR is still lacking. In this study, we first perform an analysis on the relationship between rainfall depth P and runoff amount R based on the water balance principle and discuss the different runoff generation mechanisms on GR. A field experiment is then conducted to examine the P - R relationship constructed in the previous analysis, which demonstrates good validity in estimating runoff generated on our GR. Numeric simulations via HYDRUS-1D are then carried out to investigate the runoff generation mechanism on GR as well as to examine the applicability of the proposed assessment method. The simulation results indicate that both the saturation and infiltration excess processes occurred on our GR; nonetheless, the infiltration-excess runoff accounts for only a small portion of the total runoff. This implies that the proposed linear model is applicable for estimating the runoff from GR even under heavy rainfall condition where the infiltration-excess mechanism is supposedly active.

Keywords: Green Roof; Rainwater Retention; Runoff Generation; Field Experiment; Numeric Simulation

暴雨条件下绿化屋顶产流机制研究

孙 挺, 杨文字, 倪广恒

清华大学水利水电工程系, 北京
Email: sunt05@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2013年9月30日; 修回日期: 2013年11月20日; 录用日期: 2013年11月26日

摘 要: 绿化屋顶是减轻城市洪水灾害的一种有效手段, 已被世界各国广泛使用。但是, 对于绿化屋顶目前仍然缺乏一个简单的基于物理过程的模型来评价其雨洪蓄滞效果。本文首先基于水量平衡原理分析降雨量 P 与径流量 R 之间的关系, 讨论绿化屋顶不同的产流机理, 然后通过现场试验验证了此 P - R 关系。本文还使用 HYDRUS-1D 模拟绿化屋顶的产流机理以及评价方法的适用性。模拟结果显示绿化屋顶既会发生超渗产流, 也会发生蓄满产流, 但超渗产流的流量在总流量中所占比例很小。这表明虽然超渗产流存在, 但之前本文提出的线性模型仍然可以用于模拟包括暴雨条件在内的绿化屋顶降雨径流关系。

关键词: 绿化屋顶; 雨水持蓄; 径流形成; 现场试验; 数值模拟

作者简介: 孙挺(1986-), 男, 博士研究生, 主要从事城市下垫面水热通量研究。

1. 研究背景与目的

近年来世界范围内的快速城市化进程导致城市绿地不断减少, 不透水面积迅速上升。由于城市土地利用/土地覆盖(LULC)的变化引发了一系列环境问题, 城市洪水是其中对城市功能影响最大的一项。例如中国的首都北京, 在过去的十年里边经历了数次严重的洪水。最近的一次“721”暴雨导致了79人死亡以及11.64亿元的经济损失^[1]。

为了减轻城市洪水的灾害, 人们采取了池塘、雨水收集池、绿化屋顶等很多暴雨控制措施(SCMs)^[2,3]。在这些措施中, 绿化屋顶因其使用屋顶空间影响较小而在北美^[2,4-6]、欧洲^[7-11]、东亚^[12]等地区十分流行。一个典型的绿化屋顶包括植被土壤层、基质层、过滤排水层和屋顶顶板等。绿化屋顶按照基质层的厚度可以分为简易式和花园式。基质层厚度小于15 cm的绿化屋顶一般被认为是简易式, 相反超过15 cm的被通常认为是花园式^[4]。根据绿化屋顶长期试验结果, 绿化屋顶可以持蓄27%~81%的年降雨量, 相对降水峰值延缓径流峰值约10分钟^[2,13-16]。但是, 因各地气候条件的不同(如季节降雨分布^[10]、降雨强度和历时^[17]、蒸发强度^[18]), 绿化屋顶在各地区的水文表现也各不相同。除了当地气候条件, 绿化屋顶的结构与性质同样影响其水文表现, 例如, 基质层厚度与倾角对绿化屋顶的水分持蓄能力有明显的影响^[16,19]。另外, 绿化屋顶所选植被也会影响其延滞径流的能力^[20]。

现场试验与数值模拟是研究绿化屋顶的两种主要手段。根据现场试验, 许多之前的研究建立了径流特征(径流量、径流初值延滞时间、径流峰值延滞时间)与降雨特征(降雨总量、降雨历时、降雨强度)之间的经验关系^[2,4,7,21]。与这些经验关系相比, 基于物理过程的数值模型能够模拟绿化屋顶内的流体运动, 因而已被许多学者使用。例如基于Richards方程的HYDRUS-1D^[22]和SWMM-2D^[9]模型被广泛用于评价绿化屋顶的水文表现。一些简单模型如Green-Ampt入渗方程^[23]也会被使用。

尽管目前文献中已经使用了多种经验关系、数值方法来评价绿化屋顶的水文表现, 但目前仍然没有一种简单的基于物理过程的方法。此前有研究证明, 降雨量 P 与径流量 R 之间的经验关系可以有效评价绿化屋顶的水分持蓄能力^[4,7]。同时, 我们注意到大多数绿化屋顶现场试验都在一点或多点观测了土壤含水量, 但这一变

量却并未被 $P-R$ 关系所考虑。因此, 将土壤含水量等变量加入现有的 $P-R$ 关系中为开发一个新的基于物理过程的评价绿化屋顶水文表现的模型提供了希望。

本文的结构如下: 我们首先基于水量平衡原理对降雨量 P 与径流量 R 之间的关系进行理论分析, 建立了新的 $P-R$ 关系, 并讨论了绿化屋顶的产流机理。然后应用现场试验的数据来验证了这个关系。最后我们使用数值模型HYDRUS-1D检验绿化屋顶的产流机理同时也进一步检验新的 $P-R$ 关系的可用性。

2. 理论分析

2.1. 绿化屋顶单元水量平衡

降雨径流的转变发生在各种尺度的水文过程中, 在水文模型的建立中表现出其固有的复杂性。在本研究中, 我们用水量平衡原理来解释与改进目前被广泛使用的用于评价绿化屋顶水文表现的经验 $P-R$ 关系。现场试验中普遍观测的土壤含水量被加入 $P-R$ 关系。对于绿化屋顶某一深度 Z_r 处的一点, 假设没有横向流动, 那么其水量平衡等式可以写为:

$$\Delta S = P - LE - R \quad (1)$$

或者,

$$\frac{\Delta S}{P} = \frac{P - LE - R}{P} = 1 - \frac{LE}{P} - \frac{R}{P} \quad (2)$$

其中, $\Delta S = \int_0^{z_r} (\theta_e - \theta_i) dz$ 是该绿化屋顶单元体含水量的变化, P 、 R 、 LE 分别代表降雨量、径流量和蒸发量。 θ_e 和 θ_i 分别代表时段初与时段末的土壤含水量。由室内试验, 绿化屋顶屋主要依靠其基质层蓄水(详情请见附录), 所以绿化屋顶的厚度 Z_r 在此简化为基质层的厚度。

对于强降雨, LE/P 很小一般可以近似认为是0, 式(2)因此可以简化为:

$$\frac{\Delta S}{P} \approx 1 - \frac{R}{P} \quad (3)$$

我们用 $\bar{\theta}_e$ 和 $\bar{\theta}_i$ 分别表示降雨前、降雨后土壤的平均含水量。

$$\bar{\theta}_e = \frac{1}{Z_r} \int_0^{z_r} \theta_e dz \quad (4)$$

$$\bar{\theta}_i = \frac{1}{Z_r} \int_0^{z_r} \theta_i dz \quad (5)$$

则,

$$\Delta S = (\bar{\theta}_e - \bar{\theta}_i) Z_r \quad (6)$$

进一步假设 $\theta_e = \theta_s$ 其中 θ_s 是土壤饱和含水量(考虑到强降雨后土壤通常处于饱和状态)。所以等式(6)可写为:

$$\Delta S = (\theta_s - \bar{\theta}_i) Z_r \quad (7)$$

我们进一步将 $\bar{\theta}_i$ 表示为:

$$\bar{\theta}_i = \frac{1}{Z_r} \int_0^{z_r} \theta_i dz = \theta_m C \quad (8)$$

其中 θ_m 是在某点测量的土壤初始含水量。C 是一个常数用于解释绿化屋顶单元体土壤含水量在垂直方向上的不均匀性(以下 C 被成为形状因子)。通常情况下, C 的量级为 $\alpha(1)$ 。

将式(8)代入式(7)可得:

$$\Delta S = (\theta_s - C\theta_m) Z_r \quad (9)$$

联立式(9)与式(3)可得:

$$\frac{(\theta_s - C\theta_m) Z_r}{P} = 1 - \frac{R}{P} \quad (10)$$

式(10)也可写为

$$C = \frac{\theta_s - \frac{1}{Z_r}(P - R)}{\theta_m} \quad (11)$$

根据式(11), 当 θ_s , P 和 R 已知时, 我们可以计算出每一时段的 C。若 θ_s 未知, 可将上式变形为式(11)形式:

$$\frac{1}{Z_r}(P - R) = \theta_s - \theta_m C \quad (12)$$

通过两个参数 $\frac{1}{Z_r}(P - R)$ 和 θ_m 的线性拟合可以获得 θ_s 和 C。当 $\theta_m = \theta_s$, C=1 时(例如绿化屋顶在时段开始时已经饱和), P=R(绿化屋顶不持蓄水分), 这与预期相符。

拟合得到 θ_s 和 C 后, 我们就建立了如下线性的、基于物理过程的、评价绿化屋顶水文表现的模型。

$$R = P - Z_r (\theta_s - \theta_m C) \quad (13)$$

如图 1 所示, 土壤初始含水量(用 θ_m 表示, 在土壤单元的某些点测得)和基质层深度(Z_r)在确定 P-R 关系中其关键作用。较高的 θ_m 会减弱绿化屋顶持蓄水分的能力(如图 1(a)所示), 同样基质层深度越薄, 绿化屋顶蓄水能力越低(如图 1(b)所示)。

2.2. 绿化屋顶产流机理

上述分析是基于绿化屋顶只发生蓄满产流的假设得到的, 但是绿化屋顶有时也会发生超渗产流, 即土壤虽然还未饱和但降雨强度(I)大于饱和导水率(K_s),

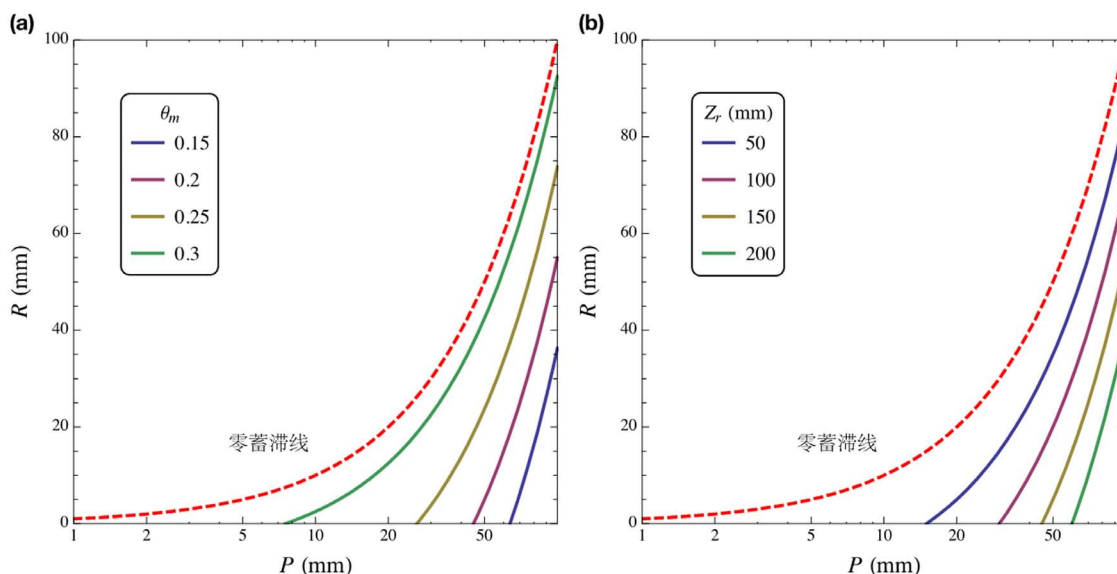


Figure 1. Variations of runoff R from GR as a linear function of rainfall depth P with (a) Different initial moisture content θ_m ; (b) Different medium layer depth Z_r . The red dashed line denotes the relationship between R and P under the zero attenuation scenario (i.e., P = R). Note that the shape factor C adopts a value 2.5

图 1. 给定不同参数条件下, 绿化屋顶产流 R 与降水量 P 的线性关系。(a) 不同初始含水量 θ_m ; (b) 不同基质层厚度 Z_r 。图中红色虚线表示在零蓄滞条件下(即 $P = R$) P 和 R 的关系。注意图中形状系数 C 取值为 2.5

此时仍会有产流。下面, 我们分情况分析两种产流模式均存在时的情况, 下标“ k ”表示事件序数。

绿化屋顶产流可能会有以下四种情况:

情况 1: $P_k \leq (\theta_s - \bar{\theta}_{i_k})Z_r$, $I_k(t) \leq K_s$
所有雨水进入土壤, 并没有产生径流。

情况 2: $P_k > (\theta_s - \bar{\theta}_{i_k})Z_r$, $I_k(t) < K_s$
土壤变得饱和后才产生径流。故

$$R_k = P_k - (\theta_s - \bar{\theta}_{i_k})Z_r \quad (14)$$

情况 3: $P_k > (\theta_s - \bar{\theta}_{i_k})Z_r$, 当 $t_1 < t < t_2$ 时,
 $I_k(t) > K_s$

在 t_1 到 t_2 时段内, 径流的产生是由于降雨强度大于土壤饱和入渗率。待土壤饱和后, 降雨全部转化为径流, 因此, 径流可表示为:

$$\begin{aligned} R_k &= (I_k - K_s)(t_2 - t_1) + \left[I_k(t_1 - t_i) + I_k(t_e - t_2) \right. \\ &\quad \left. - \left((\theta_s - \bar{\theta}_{i_k})Z_r - K_s(t_2 - t_1) \right) \right] \\ &= I_k(t_e - t_i) - (\theta_s - \bar{\theta}_{i_k})Z_r \\ &= P_k - (\theta_s - \bar{\theta}_{i_k})Z_r \end{aligned} \quad (15)$$

上式中 t_i 、 t_e 分别表示该时段起始时刻与结束时刻, 降雨量 $P_k = I_k(t_e - t_i)$ 。

情况 4: $P_k < (\theta_s - \bar{\theta}_{i_k})Z_r$, 当 $t_1 < t < t_2$ 时,
 $I_k(t) > K_s$

在 t_1 到 t_2 时段内, 径流的产生是由于降雨强度大于土壤饱和入渗率。由于土壤没有饱和, 因此超渗产流产生的径流为:

$$R_k = (I_k - K_s)(t_2 - t_1) \quad (16)$$

基于上述分析, 绿化屋顶的产流机理表明以上提出线性模型的适用性有局限。在第 3、4 种情况下, 绿化屋顶有超渗产流发生, 原有的绿化屋顶只发生蓄满产流的假设不再适用。下面第 4 章将通过数值模型 HYDRUS-1D 的模拟进一步验证本文提出的线性模型的适用性。

3. 现场试验验证

为验证本文提出的线性模型, 我们在清华校园的绿化屋顶处进行了现场试验。清华试验站坐落于清华

校园的一座高 11 m 的学生综合服务楼上, 其绿化屋顶面积为 120 m², 向南倾角为 3°。植被层、基质层和过滤排水层分别为 5 cm、15 cm 和 3 cm。屋顶植物为佛甲草。为评估绿化屋顶的水文特性, 使用雨量筒、土壤水分计和流量计分别测量降水 P , 中间层含水量 θ_m 和径流 R 。所有设备都连接在一个数据采集器上, 采样间隔为 10 s, 记录间隔为 5 min。清华试验站全貌与设备布置如图 2 所示。设备规格如表 1 所示。实验时段为 2012 年 4 月 1 日至 2012 年 7 月 31 日, 共观测到 15 场降雨(结果如表 2 所示), 包括第 1 章中提到的 2012 年 7 月 21 日的特大暴雨。

根据式(13), 只有产流的降水场次, 其观测结果才满足 $(P - R)/Z_r$ 和 θ_m 的关系。然而, 目前还没有对不同径流产生机制加以区别(见 2.2 部分)。如图 3 所示, 式 13 中的 $(P - R)/Z_r$ 和 θ_m 两个参数遵循线性关系; 通过线性回归求得饱和含水量 θ_s 和形状因子 C 分别为 0.8 和 2.67。值得注意的是, 形状因子 C 为 2.67 的量级为 1, 这也与我们之前的模型预期相符。观测值与拟合曲线的差别可能来源于 1) 不均一的土壤水分状况下形状因子 C 的值不同; 2) 测量的不确定性。

实际上, 对于任意绿化屋顶, 给定经过试验率定得到的参数 θ_s 和 C , 根据观测结果降雨量 P 和初始土壤含水量 θ_m 其雨洪蓄滞能力可以由本文提出的线性模型(即式(14))进行评价。值得注意的是, 线性模型虽然基于水量平衡原理与蓄满产流假定; 然而, 正如与前人模型及观测数据的对比显示, 线性模型实际上适用于许多情形。因此, 我们进一步研究了线性模型的适用性。

4. 基于 HYDRUS-1D 模拟的线性模型适用性检验

为了检验这个线性模型的适用性, 首要要求是清楚蓄满产流和超渗产流各自在径流总量中所占的比例。为了区分总径流中两者的比重, 我们使用 HYDRUS-1D 进行了模拟, 从而可以对前文提出的线性模型的适用性进行进一步检验。

HYDRUS-1D 是国际地下水模型中心研发的(IGWMC)地下水运动模拟模型, 在各种边界条件下模拟多孔介质中水分和能量传输过程中被证明有很好的适用性^[24]。在 HYDRUS-1D 中, 多孔介质中水分垂向运动的一维控制方程是:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(\theta)}{\partial t} - S_r(z, t) \quad (17)$$

其中 θ 是土壤体积含水率, $D(\theta)$ 是水力扩散系数, $K(\theta)$ 是渗透系数, z 是土壤深度, t 是时间, $S_r(z, t)$ 是源汇项。

1980年, Van Genuchten 描述土壤水力特性如下^[25]:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + a|h - h_a|^n} \quad (18)$$

$$K(S_e) = K_s S_e^{1/2} \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (19)$$

其中 $S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ 是有效含水饱和度, θ_s 是饱和含水率, θ_r 是剩余含水率, h 是水的压力水头, K_s 是前文提到过的饱和渗透系数, n 和 m 是两个参数。

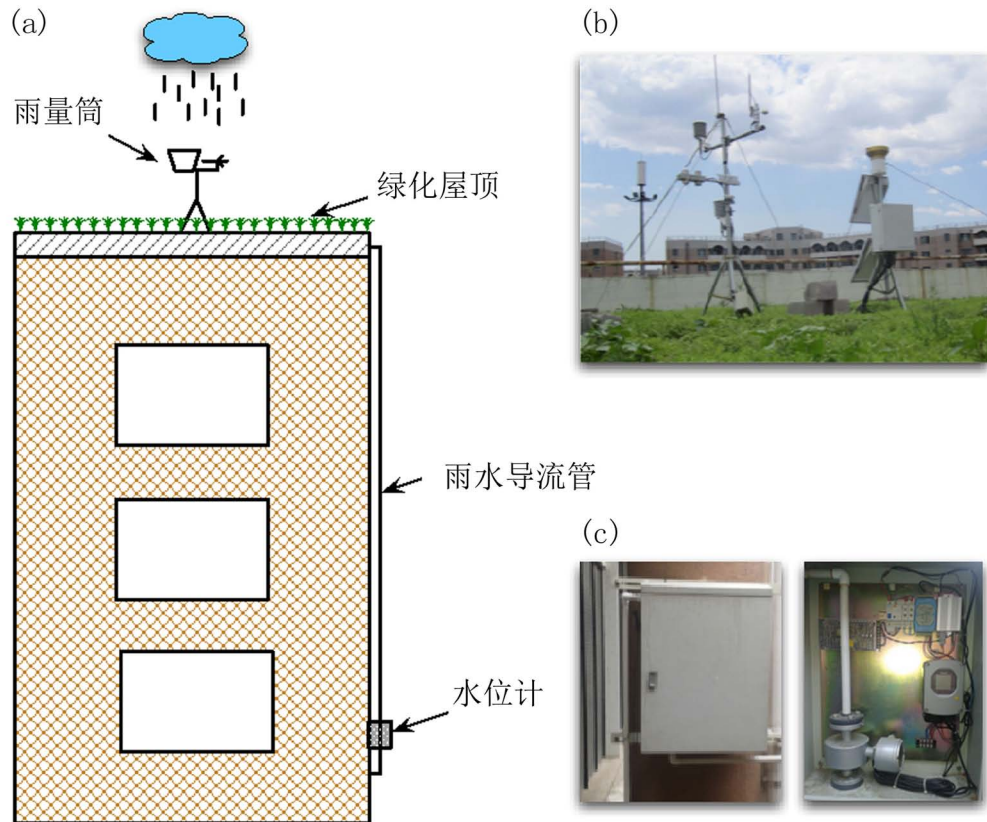


Figure 2. Schematic of the onsite experiment conducted at a GR site on Tsinghua campus. (a) The overall layout of the onsite experiment; (b) The site view of the rain gauge and the vegetation at the rooftop; (c) Left panel: the flowmeter box attached on the wall; right panel: the interior look of the flowmeter box with monitoring instruments installed

图 2. 清华校园绿化屋顶试验站的实验装置布置图。(a) 实验装置的整体布置; (b) 试验站现场图; (c) 左侧: 安装在墙壁上的流量计, 右侧: 包含有检测装置的流量计的内部视图

Table 1. Specifications of the instruments installed at the TU site

表 1. 清华绿化屋顶试验站所用仪器指标参数

仪器	型号	分辨率	准确的	说明
雨量计	Campbell TE525M	0.1 mm 每斗	$P < 10: \pm 1\%$ $10 \leq P < 20: +0, -3\%$ $20 \leq P < 30: +0, -5\%$	P : 以 mm/hr 为单位的降雨强度
土壤水分计	Campbell CS616	better than 0.1% VWC	$\pm 2.5\%$ VWC	VWC: 体积含水率
流量计	TOSHIBA LDTH	0.01 m/s	$0.3 < v < 10: 0.3\%$	V : 以 m/s 为单位的水流速度
数据采集器	Campbell CR1000	-	-	-

Table 2. Summary of the field experiment results (the * symbol denotes heavy rainfall events, whose rainfall depths are larger than 50 mm)
表 2. 现场试验结果(*表示降雨量大于 50 mm 的暴雨)

日期	降雨量(mm)	降雨历时(min)	径流(mm)	蓄滞比例(%)	径流延滞时间(min)	初始含水率(%)
20120721*	190.4	920	157.8	17.1	110	21.3
20120730*	69.4	2715	53.1	23.5	17	26
20120624*	53.4	410	5.3	90.1	181	18.6
20120709*	52.9	320	36.7	30.6	13	27.5
20120727	26.9	965	11.5	57.2	18	24.9
20120705	10.5	85	0.1	99.1	1	26.1
20120421	6.6	60	0	100	-	26.1
20120410	2.9	70	0	100	-	17
20120418	2.9	190	0	100	-	26.1
20120619	2.8	120	0	100	-	18.5
20120725	2.5	25	0	100	-	24.5
20120708	2.2	20	0	100	-	27.4
20120420	1.8	25	0	100	-	26

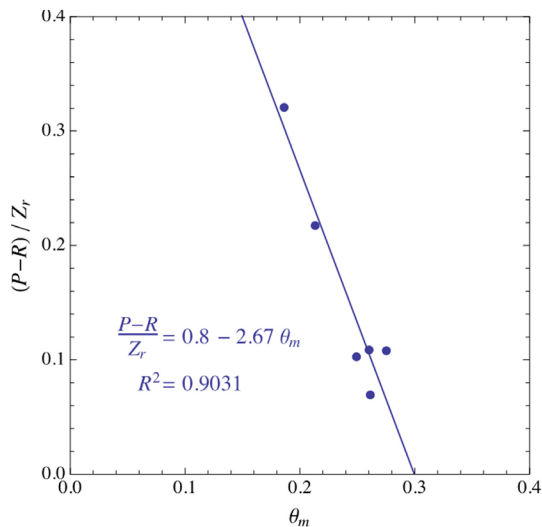


Figure 3. Linear relationship (line) between two parameters θ_m and $(P-R)/Z_r$, obtained from the observations of field experiment (dots)

图 3. 通过现场试验(实点所示)得到的参数 θ_m 与 $(P-R)/Z_r$ 之间的线性关系(实线所示)

初始条件给定一维土柱的水分分布如下:

$$\theta(z, 0) = \theta_0 \quad (20)$$

为了模拟绿化屋顶在清华试验站的实际产流情形, 我们用 HYDRUS-1D 模拟了一个基质层厚度为 15 cm 的绿化屋顶, 以求与清华试验站条件相同。基质层的水力特性是根据 2012 年 7 月 9 日在清华试验站的降雨

径流数据率定获得的(详见图 4(a))。表 3 为率定获得的特性数值。由 2012 年 7 月 21 日与 2012 年 7 月 30 日的降雨观测所做的进一步验证见图 4(b)、图 4(c), 其结果显示 HYDRUS-1D 模拟的产流结果与实测结果符合良好。

图 5 进一步将总径流量分离成蓄满产流和超渗产流。图 5(a)、图 5(b)展示的分别是 2012 年 7 月 9 日与 2012 年 7 月 21 日两场降雨中, 在超渗产流(黄色部分)和蓄满产流(红色部分)两种机制下模拟的径流。由该结果可知, 实际上绿化屋顶的产流机制由超渗产流和蓄满产流组合而成。超渗产流只发生在降雨强度相对较大期间; 而蓄满产流会持续更长时间。对比图(a)和(b)所示的两场降雨相比, 图 5(c)所示 7 月 30 日的降雨强度较小, 因而只发生蓄满产流。在 7 月 9 日的降雨事件中, 只有 3% 的总径流量是由超渗产流形成的。7 月 21 日的降雨是近六十年来北京地区最严重的暴雨事件, 即使如此超渗产流也只占总径流量的 6%。这些结果表明, 蓄满产流机制在绿化屋顶的产流中占主导地位。因此, 本文基于蓄满产流机制建立的线性模型可以被应用于评价绿化屋顶在不同降雨条件下的雨洪蓄滞能力。

5. 结论

本文根据水量平衡原理理论分析了降雨量 P 与径

流量 R 之间的关系。假设绿化屋顶只发生蓄满产流, 径流 R 由输入变量降雨量 P 与土壤初始含水量 θ_m 以及已知的土壤饱和含水率 θ_s 形状因子 C 优化获得。新的 P - R 关系(即式(13)和式(14))可被用于评价绿化屋顶的雨洪蓄滞能力表现。根据新的线性关系, 基质层越薄、土壤初始含水量越高, 绿化屋顶蓄水能力越低, 径流越多, 反之亦然。

我们用 2012 年 4 月~7 月北京清华大学一处绿化

屋顶的实验数据验证了新的线性模型, 新的模型对模拟绿化屋顶径流具有良好的效果。由于新的模型假设绿化屋顶只发生蓄满产流, 与实际情况不完全符合。因此我们使用数值模型 HYDRUS-1D 检验绿化屋顶的产流机理同时也进一步检验新的线性模型的适用性。我们选择 2012 年现场试验的实际降雨作为输入, 利用 HYDRUS-1D 进行了模拟。模拟结果显示, 绿化屋顶同时会发生蓄满产流与超渗产流, 但超渗产流占总

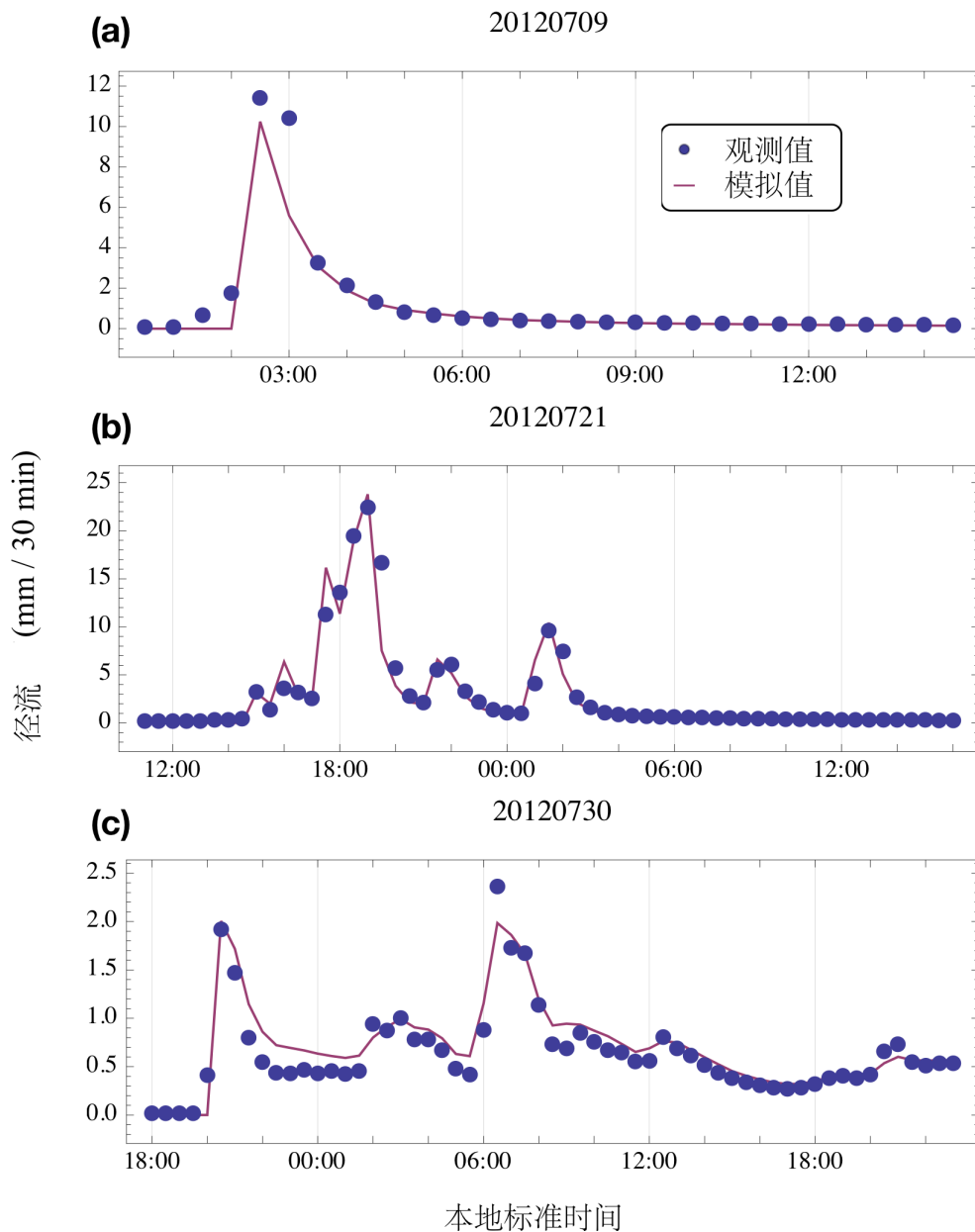
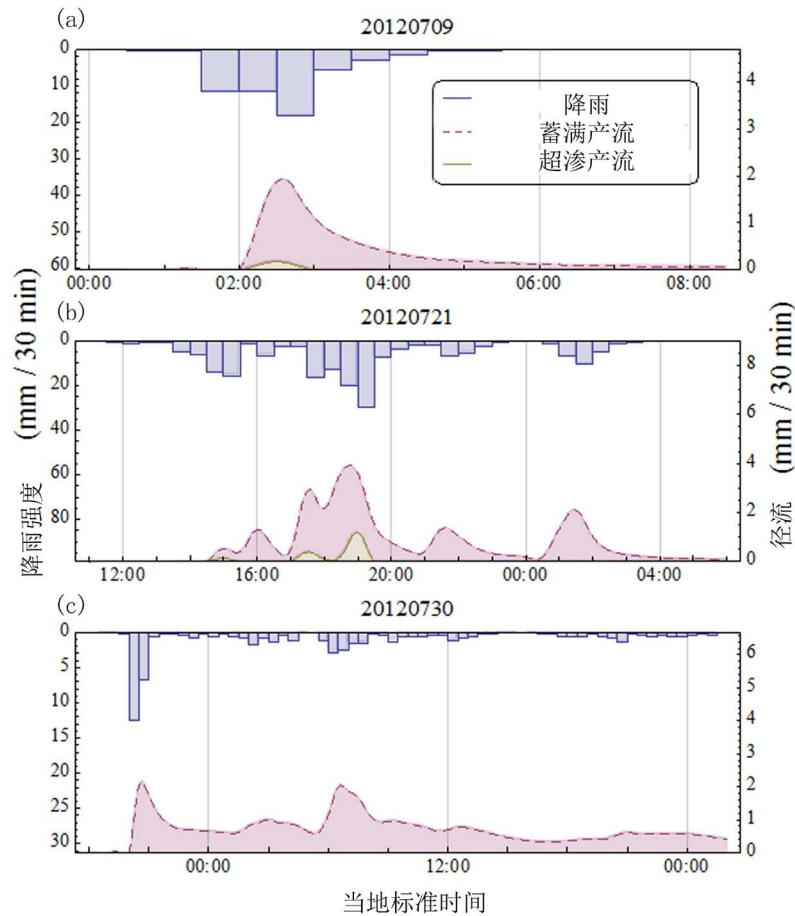


Figure 4. Comparison of the runoff results by simulation (red lines) and observation (blue dots) for HYDRUS-1D validation of three heavy rainfall events: (a) July 9th, 2012; (b) July 21st, 2012; (c) July 30th, 2012

图 4. 3 场次暴雨的径流实测结果(蓝色圆点)与 HYDRUS-1D 模拟(红色实线)的比较。3 场暴雨的日期是: (a) 2012 年 7 月 9 日; (b) 2012 年 7 月 21 日; (c) 2012 年 7 月 30 日

Table 3. Hydraulic properties of the medium layer calibrated for HYDRUS-1D simulations (the symbols have the same meaning as in Equations (18) and (19)).**表 3. 用于 HYDRUS-1D 模拟的基层水力参数(各参数意义与式(18)、式(19)中相同)**

θ_r ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	θ_s ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	α (cm^{-1})	n	K_S (cm hr^{-1})
0.176	0.469	0.03	1.3	3.6

**Figure 5. Simulation results by HYDRUS-1D for three heavy rainfall events, where saturation-excess and infiltration-excess runoffs from GR are denoted by purple dashed and yellow solid lines, respectively. The rainfall is indicated as upper inverted blue bars. Date: (a) July 9th, 2012; (b) July 21st, 2012; (c) July 30th, 2012****图 5. HYDRUS-1D 对 3 场暴雨模拟的结果, 结果中区分了蓄满产流(紫色虚线)和超渗产流(黄色实线), 降雨以蓝色条块表示。3 场暴雨的日期是: (a) 2012 年 7 月 9 日; (b) 2012 年 7 月 21 日; (c) 2012 年 7 月 30 日**

径流量的比例非常小。这表明绿化屋顶的产流机制以蓄满产流为主, 仅在暴雨情况下存在超渗产流。

基金项目

国家自然科学基金项目(NSFC-51190092)。

参考文献 (References)

[1] ZHANG, D.-L., LIN, Y., ZHAO, P., et al. The Beijing extreme rainfall of 21 July 2012: "Right results" but for wrong reasons.

- Geophysical Research Letters, 2013, 40(7): 1426-1431.
- [2] MENTENS, J., RAES, D. and 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.
- [3] TILLINGHAST, E., HUNT, W., JENNINGS, G., et al. Increasing stream geomorphic stability using storm water control measures in a densely urbanized watershed. Journal of Hydrologic Engineering, American Society of Civil Engineers, 2013, 17(12): 1381-1388.
- [4] CARSON, T. B., MARASCO, D. E., CULLIGAN, P. J., et al. Hydrological performance of extensive green roofs in New York City: Observations and multi-year modeling of three full-scale systems. Environmental Research Letters, 2013, 8(2), Article ID: 024036.
- [5] CARTER, T. and RASMUSSEN, T. C. Hydrologic behavior of

- vegetated roofs. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, Blackwell Publishing Ltd, 2006, 42(5): 1261-1274.
- [6] DENARDO, J., JARRETT, A., MANBECK, H., et al. Stormwater mitigation and surface temperature reduction by green roofs. *Journal of Hydrology*, 2005, 48(4): 1491-1496.
- [7] FASSMAN-BECK, E., VOYDE, E., SIMCOCK, R., et al. 4 living roofs in 3 locations: Does configuration affect runoff mitigation? *Journal of Hydrology*, 2013, 490: 11-20.
- [8] FIORETTI, R., PALLA, A., LANZA, L. G., et al. Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. *Building and Environment*, 2010, 45(8): 1890-1904.
- [9] PALLA, A., GNECCO, I. and LANZA, L. G. Compared performance of a conceptual and a mechanistic hydrologic models of a green roof. *Hydrological Processes*, 2012, 26(1): 73-84.
- [10] STOVIN, V., VESUVIANO, G. and KASMIN, H. The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology*, 2012, 414-415: 148-161.
- [11] TEEMUSK, A. and MANDER, Ü. Rainwater runoff quantity and quality performance from a greenroof: The effects of short-term events. *Ecological Engineering*, 2007, 30(3): 271-277.
- [12] JIM, C. Y. and PENG, L. L. H. Substrate moisture effect on water balance and thermal regime of a tropical extensive green roof. *Ecological Engineering*, 2012, 47: 9-23.
- [13] GETTER, K. L., ROWE, D. B. and ANDRESEN, J. A. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering*, 2007, 31(4): 225-231.
- [14] MORGAN, S., CELIK, S. and RETZLAFF, W. Green roof stormwater runoff quantity and quality. *Journal of Environmental Engineering*, American Society of Civil Engineers, 2013, 139(4): 471-478.
- [15] SIMMONS, M. T., GARDINER, B., WINDHAGER, S., et al. Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate. *Urban Ecosystems*, 2008, 11(4): 339-348.
- [16] VANWOERT, N. D., ROWE, D. B., ANDRESEN, J. A., et al. Green roof stormwater retention: Effects of roof surface, slope, and media depth. *Journal of Environment Quality*, 2005, 34(3): 1036-1044.
- [17] VOLDER, A. and DVORAK, B. Event size, substrate water content and vegetation affect storm water retention efficiency of an un-irrigated extensive green roof system in Central Texas. *Sustainable Cities and Society*, 2013.
- [18] DIGIOVANNI, K., GAFFIN, S. and MONTALTO, F. Green roof hydrology: Results from a small-scale lysimeter setup (Bronx, NY). American Society of Civil Engineers, 2010.
- [19] DUNNETT, N., NAGASE, A. and HALLAM, A. The dynamics of planted and colonising species on a green roof over six growing seasons 2001-2006: Influence of substrate depth. *Urban Ecosystems*, 2008, 11(4): 373-384.
- [20] VILLARREAL, E. L. Runoff detention effect of a sedum green-roof. *Nordic Hydrology*, 2007, 38(1): 99-105.
- [21] CARTER, T. and JACKSON, C. R. Vegetated roofs for stormwater management at multiple spatial scales. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 80(1-2): 84-94.
- [22] HILTEN, R. N., LAWRENCE, T. M. and TOLLNER, E. W. Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D. *Journal of Hydrology*, 2008, 358(3-4): 288-293.
- [23] SHE, N. and JOSEPH PANG, P. A deterministic lumped dynamic green roof model. American Society of Civil Engineers, 2008.
- [24] ŠIMU NEK J., ŠEJNA, M., SAITO, H., et al. HYDRUS 1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. HYDRUS-1D, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, 2009: 1-332.
- [25] VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892-898.