

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.04.018



## 简单屋顶绿化的滞蓄特性

张 华,李 茂,张 洋,曹金露,袁 密

(三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心,湖北 宜昌 443002)

**摘 要:**设计了模拟降雨与数据采集系统,研究了短时强降雨下简单屋顶绿化基质(配比:陶粒 57.0%、草炭 41.5%、保水剂 1.5%)的降雨产流过程,基于 37 次模拟降雨实验,归纳了降雨产流的一般过程、规律和特性,分析了降雨强度、基质厚度和基质初始含水率对简单屋顶绿化滞流蓄水特性的影响。结果表明:基质厚度和基质初始含水率对简单屋顶绿化的蓄水特性有显著影响,基质初始含水率越低、基质厚度越厚时蓄水特性越佳。建立了产流时间数学模型,简单屋顶绿化降雨产流时间与降雨强度呈负相关,同时也受初始含水量和基质厚度影响。随着干湿循环次数增加,基质的厚度总体呈现下降趋势,储水性能逐渐下降,延迟产流时间逐渐缩短。

**关键词:**简单屋顶绿化;降雨;滞蓄特性;延迟产流

**中图分类号:**TU111.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)04-0135-07

## Rainwater retention features of extensive green roof

Zhang Hua, Li Mao, Zhang Feng, Cao Jinlu, Yuan Mi

(Collaborative Innovation Center for Geo-Hazards and Eco-Environment in Three Gorges Area, Yichang 443002, Hubei, P. R. China)

**Abstract:** An artificial rainfall device and a data acquisition system are designed to study the rainfall-runoff processes of an extensive green roof with matrix of 57.0% ceramsite, 41.5% peat, and 1.5% super absorbent polymer. Based on 37 times artificial rainfall tests, the fundamental processes of rainfall infiltration and runoff are illustrated. The effects of rainfall intensity, matrix depth and initially water content on the rainwater retention features are studied. The results show that the effects of matrix depth and initially water content are significant. The rainwater storage in matrix will increase with lower initially water content and higher depth. A multiple linear regression equation is presented for the delayed time of runoff. It shows that the delayed time of runoff is negative related with rainfall intensity. Meanwhile the delayed time of runoff are affected by initial water content and depth. With the increase of wetting and drying times, the matrix depth tends to decrease, the rainwater storage gradually declines, and the delayed runoff time tends to shorten.

**Key words:** extensive green roof; rainfall; rainwater retention feature; delayed runoff

**收稿日期:**2015-03-16

**基金项目:**国家自然科学基金(51178251)

**作者简介:**张华(1974-),男,副教授,主要从事非饱和土渗流、屋顶绿化材料水分运移研究,(E-mail)cezhua@139.com。

**Received:**2015-03-16

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(No. 51178251)

**Author brief:** Zhang Hua(1974-), PhD, associate professor, main research interests: unsaturated soil seepage and roof greening materials moisture migration, (E-mail)cezhua@139.com.

城市内涝灾害,严重危及人民群众生命财产安全以及城市正常运行<sup>[1-2]</sup>。为了解决这一问题,国务院发布重要通知<sup>[3]</sup>,要求各城市增强排水防涝建设,完善城市排水防涝工程体系。屋顶绿化作为地面绿化在空间上的延伸,不仅能增加绿化面积,改善环境<sup>[4]</sup>,调节小气候<sup>[5]</sup>,它本身的基质特点还决定了它能储存一部分降雨对屋顶降雨产流起延时作用。广泛应用屋顶绿化,对解决城市内涝问题有一定积极作用。

国内外学者对不同屋顶绿化基质滞流蓄水进行了研究,Villarreal 等<sup>[6]</sup>研究了主要成分为碎砖和沙的屋顶绿化基质的蓄水能力, VanWoert 等<sup>[7]</sup>对主要成分为碎石和沙的屋顶绿化基质的蓄水效果进行了研究,唐莉华等<sup>[8]</sup>对砂土、壤土和粉粘土在屋顶绿化中滞流蓄水效果进行了研究,叶建军等<sup>[9]</sup>研究了主要成分为碎砖和河沙的屋顶绿化基质的蓄水能力。已有研究主要围绕着屋顶绿化在降雨产流中对蓄水效果的影响进行研究,笔者以陶粒、草炭和保水剂混合轻质基质材料为研究对象,应用人工模拟降雨,运用数理统计的方法,对简单屋顶绿化在降雨产流中滞流蓄水效果进行研究。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料与装置

试验主要研究无植被覆盖的简单屋顶绿化基质的降雨产流过程,试验所用基质由 57.0% 陶粒、41.5% 草炭以及 1.5% 保水剂构成。试验装置如图 1。

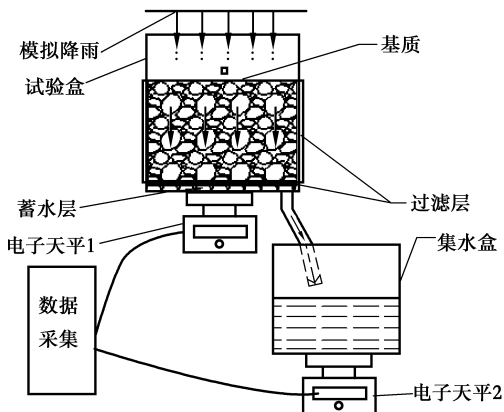


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

基质配备与数据采集:在长宽高为 30 cm × 20 cm × 18 cm 的试验盒内从下至上依次铺设蓄排

水板(厚 25 mm)、无纺布以及经充分干燥混合均匀基质,试验盒底一边开孔接排水管用于产流采集。将试验盒置于精度为 0.1 g 电子天平上,调整试验盒呈 3% 坡度(以模拟屋顶),电子天平连接计算机通过特定程序每隔一秒采集并保存试验盒质量  $m_1$ 。

产流采集:试验盒排水管连接集水容器,容器置于 0.1 g 电子天平,电子天平连接计算机通过特定程序每隔一秒采集并保存产流质量  $m_2$ 。

模拟降雨:模拟降雨采用胶管小孔滴灌的模式,即将有均匀分布小孔的胶管均匀架设在试验盒上,胶管链接水源,使用单向球阀调节水流大小。

### 1.2 试验方案

短时强降雨时间短,强度大,容易发生城市内涝,根据湖北地区多年来降雨情况<sup>[10-13]</sup>,试验将通过调节球阀控制降雨强度大小,模拟小时降雨量为 18~80 mm,持时 1~2 h 的短时强降雨。

景天属植物在屋顶绿化中被广泛应用,试验选择适应景天属植物生长的基质厚度 7 cm<sup>[14]</sup>作为初始厚度。对同一个试验盒按不同降雨强度进行试验,在试验前将通过降雨、静置、通风等手段调节初始含水量,并使用游标卡尺测量基质厚度,记录基质厚度随试验进行的变化情况以及基质的降雨产流过程。

试验在 76 d 内共模拟了 37 次短时强降雨,降雨分布情况如图 2。试验中先后 5 次对基质的含水率通过静置和通风的手段经行调节,降低基质的含水率(图 2)。

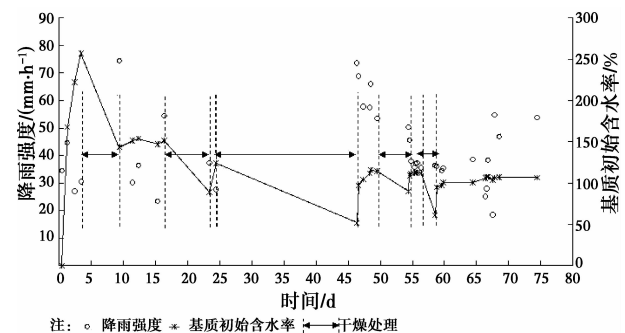


图 2 降雨强度和基质初始含水量变化情况

Fig. 2 Variation of rainfall intensity and initial water content

### 1.3 试验操作与数据处理

在基质填装前称量试验盒、排水板和无纺布总质量  $m_3$ ,并与填装基材后试验盒的总质量相减得基质干质量  $m_0$ 。

程序自动记录时间  $t$ 、试验盒质量  $m_1$  以及集水

盒质量  $m_2$ 。在试验开始前将降雨支架立于集水盒上,通过观测程序所记录数据并通过调节球阀来调节降雨强度。测量试验盒内基质厚度  $h$ ,将降雨支架移至试验盒上,试验开始。从降雨开始到集水盒开始接收渗流的时间间隔为产流时间,从程序记录的数据中得到产流时间  $T$  以及每次试验降雨开始前零时刻试验盒初始质量  $m_1^0$ 。每次试验降雨开始前的基质含水率即为基质初始含水率  $\theta$ ,通过计算程序记录的实时数据得到基质初始含水率  $\theta$  以及实时降雨强度  $i$ 。基质初始含水率  $\theta$  为

$$\theta = \frac{m_1^0 - m_0 - m_3}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\theta$  为基质初始含水率; $m_1^0$  为降雨开始前零时刻试验盒总质量; $m_3$  为试验盒、排水板以及无纺布总质量; $m_0$  为基质干质量。

实时降雨强度  $i$  为

$$i = \frac{\Delta m_1 + \Delta m_2}{\rho_w A \Delta t} \quad (2)$$

式中: $i$  为降雨强度; $\Delta t$  为时间间隔; $\Delta m_1$ 、 $\Delta m_2$  为在  $\Delta t$  时间内两个电子天平所测质量变化; $\rho_w$  为水的密度; $A$  为降雨面积即试验盒长宽之积。

## 2 试验数据与分析

### 2.1 降雨产流过程

影响屋顶绿化产流过程的因素有基质的种类、降雨强度、基质初始含水率、基质厚度、坡度、植被种类以及植被覆盖情况等<sup>[4-9]</sup>。试验针对定配比、定坡度(3%)、无植被覆盖的简单屋顶绿化基质进行模拟降雨试验,降雨强度、基质初始含水率、基质厚度则是影响产流过程的主要因素。

图 3~6 分别展示了计算机程序自动记录数据得到第 1、5、12、34 次试验的产流全过程,4 次试验所具有的初始含水率、降雨强度、基质厚度各不相同,但展现了简单屋顶绿化降雨产流的一般过程(图 7):降雨滞蓄阶段、产流上升阶段、平稳产流阶段、残余产流阶段。展现了简单屋顶绿化降雨产流一般规律:延时产流、降低波峰、延滞波峰;展现了简单屋顶绿化对降雨产流的滞流蓄水特性。

### 2.2 蓄水效果分析

人工模拟降雨试验通过计算机记录产流时基质蓄水量  $q$ 、降雨结束时基质的蓄水量  $Q$  以及产流时基质蓄水量与降雨结束时基质的蓄水量比值  $q/Q$ ,试验数据如图 8。

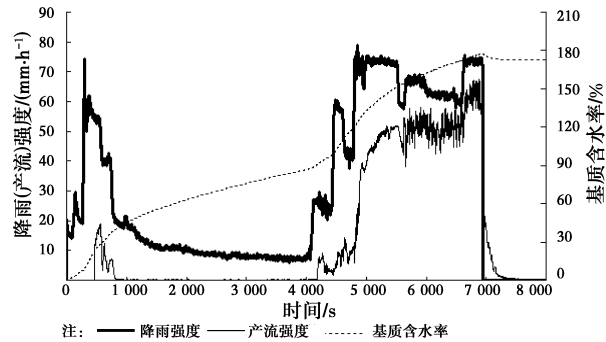


图 3 第 1 次降雨产流过程

Fig. 3 The process curve of rainfall infiltration and runoff in 1st rainfall

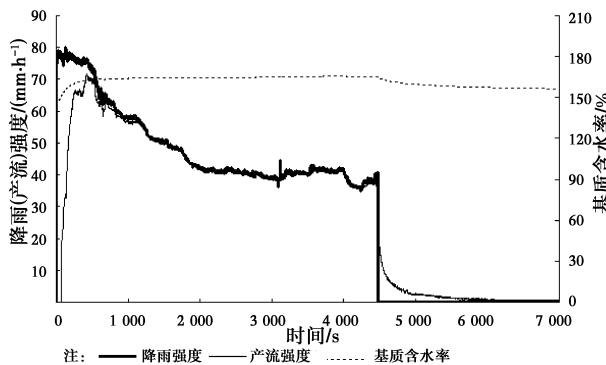


图 4 第 5 次降雨产流过程

Fig. 4 The process curve of rainfall infiltration and runoff in 5th rainfall

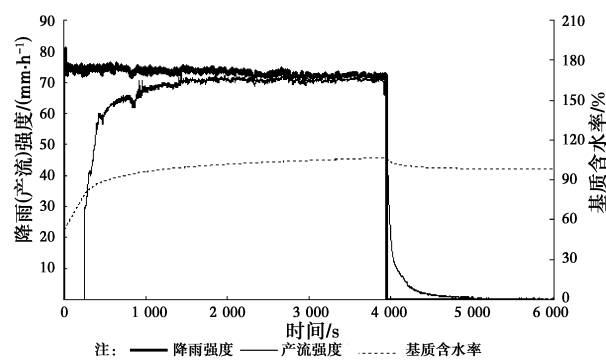


图 5 第 12 次降雨产流过程

Fig. 5 The process curve of rainfall infiltration and runoff in 12th rainfall

由图 7 可以看出在 37 次试验中产流时的蓄水量  $q$  较为平稳,而降雨结束时的总蓄水量  $Q$  变化较大。图 7 中总蓄水量  $Q$  出现了 5 次峰值,分别为第 1、10、12、18、25 次,同时,产流时的蓄水量  $q$  与降雨结束时的总蓄水量  $Q$  的比值  $q/Q$  相对应出现波谷值。通过与图 2 中基质初始含水率变化曲线作对比可知,第 1 次试验初始含水率为 0,其余 4 次都是在

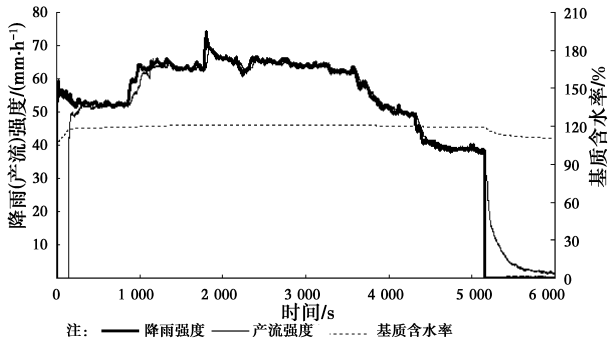


图6 第34次降雨产流过程

Fig. 6 The process curve of rainfall infiltration and runoff in 34th rainfall

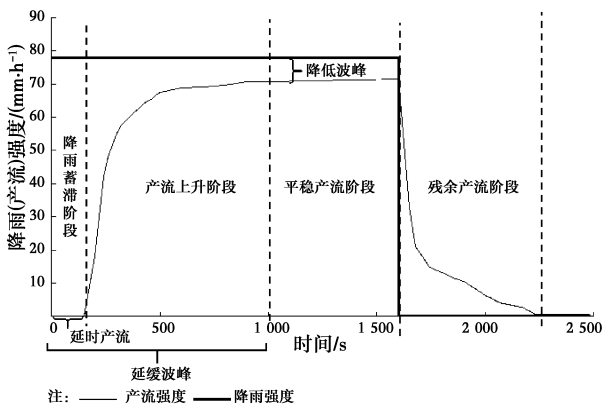


图7 产流的一般过程

Fig. 7 The fundamental process curve of rainfall infiltration and runoff

基质经过静置风干处理后的第1次试验,这5次试验中基质都有较低的含水率,使得这5次试验在降雨的全过程中蓄存更多的水即降雨结束时的总蓄水量 $Q$ 值更大。结果表明:基质的初始含水率对简单屋顶绿化蓄水效果有较大影响,当基质初始含水率低时,简单屋顶绿化基质在降雨过程中能储蓄更多的降雨。

同时,由图8也可以看出降雨结束时的总蓄水量有下降的趋势,而降雨结束时基质含水率(图9)也呈下降趋势,这表明基质的蓄水能力随着试验次数的增多而降低。考察试验过程中基质厚度的变化(图10),基质厚度起先快速增大而后风干静置过程中快速降低,随试验次数增多逐渐降低最后趋于平稳,基质厚度变化规律与基质初始含水率变化规律基本相同。这是由于基质成分中含有保水剂,会在降雨过程中吸水膨胀<sup>[15]</sup>,容器四周被限制,因而膨胀主要发生在垂直方向上即基质厚度会发生变化,

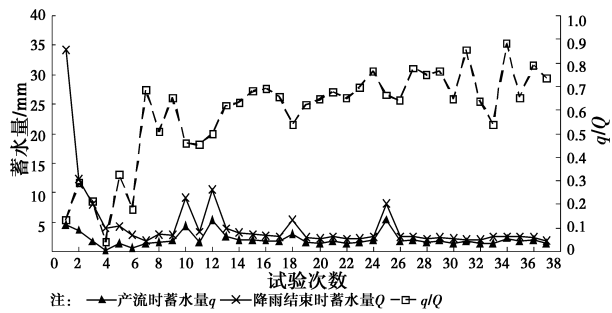


图8 基质蓄水量随试验次数变化

Fig. 8 The relationship between rainwater storage in matrix and test times

基质含水率越高基质因膨胀厚度越大;同时,基质主要成分为陶粒和草炭,陶粒轻质、多孔而草炭轻质、疏松,降雨过后基质含水率上升在重力作用下会发生沉降,保水剂具较高的粘性使得基质会逐渐聚集变得密实,在众多作用下基质厚度会逐渐达到稳定。因为,试验过程中基质厚度会随着降雨量的大小、降雨次数发生变化,基质厚度决定了基质的孔隙率从而影响基质对水分的吸收,所以,基质厚度对简单屋顶绿化在降雨过程中的蓄水能力有较大的影响,当基质厚度因膨胀变大时其孔隙率增大蓄水能力增强,当基质厚度因沉降变小时起孔隙率减小蓄水能力减弱。

由于简单屋顶绿化基质结构松散、孔隙大,降雨不会在基质表面积留,雨水在下渗的过程中被基质吸收储存,影响基质蓄水量的主要因素是基质的孔隙率和保水剂的含量,而降雨强度对蓄水效果影响较小(图9),因而影响简单屋顶绿化降雨过程中蓄水效果的因素主要是基质初始含水率和基质厚度。基质初始含水率越低,基质厚度越厚,基质的蓄水效果越强;反之,基质的蓄水效果越弱。

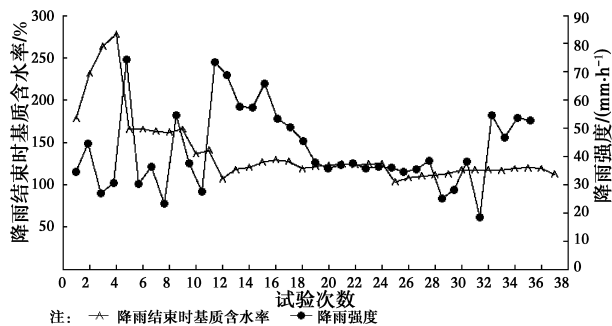


图9 降雨强度与降雨结束时基质含水率随试验次数变化

Fig. 9 Rainfall intensity and final water content variation of test times

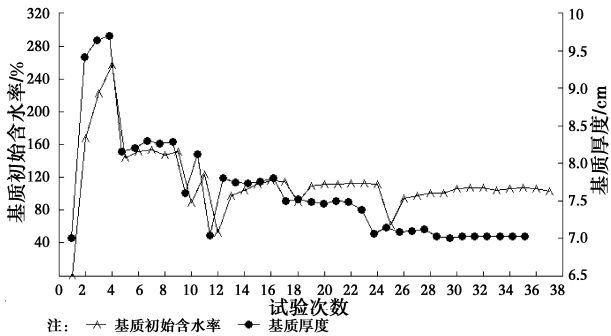


图 10 基质厚度与基质初始含水率随试验次数变化  
Fig. 10 Matrix depth and initial water content variation of test times

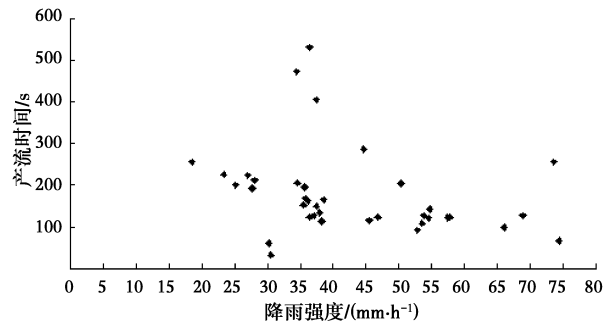


图 12 产流时间与降雨强度关系  
Fig. 12 The relationship between the delayed time of runoff and rainfall intensity

### 2.3 滞流效果分析

从降雨开始到集水盒开始接收渗流的时间间隔为产流时间,通过记录数据得到每一次试验产流时间  $T$ ,产流时间  $T$  随试验次数变化情况、产流时间  $T$  与降雨强度  $i$  的关系、产流时间  $T$  与初始含水量  $\theta$  的关系以及产流时间  $T$  与基质厚度  $h$  的关系,如图 11~14 所示。

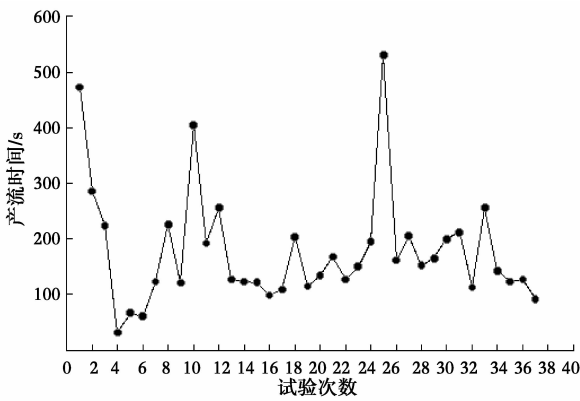


图 11 产流时间随试验次数变化  
Fig. 11 The relationship between the delayed time of runoff and test times

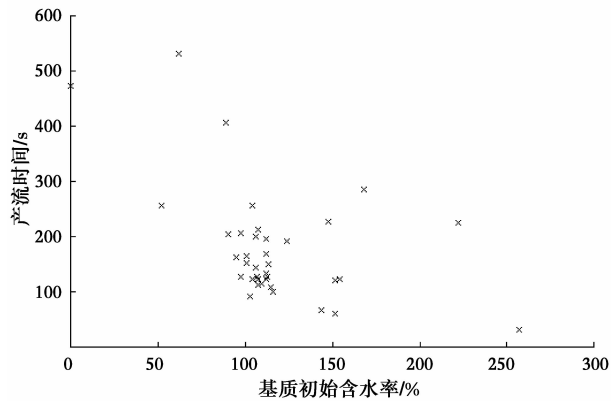


图 13 产流时间与初始含水率关系  
Fig. 13 The relationship between the delayed time of runoff and initial water content

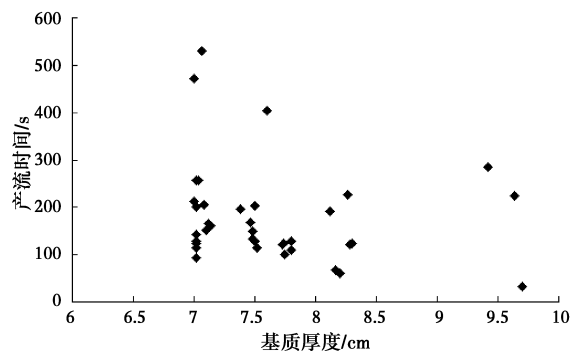


图 14 产流时间与基质厚度关系  
Fig. 14 The relationship between the delayed time of runoff and matrix depth

含保水剂的屋顶绿化基材降雨产流过程类似于非饱和土渗流过程,但也有区别。如图 11~13 所示,产流时间与 3 个因素之间数据分布零散,影响产流时间的因素比较复杂。简单屋顶绿化基质结构松散、孔隙大,降雨强度越大越易产生渗流。

在侧向受限的试验条件下,基质厚度的变化反映着基质体积的变化。在试验过程中经过多次干湿循环,基质在吸水膨胀的同时也会因沉降和保水剂的粘聚逐渐变得密实,而基质厚度也会随之发生变化。在试验开始初期,基质厚度主要受保水剂吸水膨胀的影响,厚度随基质含水率升高而增大;在试验

中后期,随着降雨次数增多和试验周期的增长,基质逐渐沉降而且陶粒、草炭在保水剂的粘性作用下胶结成团,基质变得密实起来。基质厚度增涨不单纯是体积的膨胀,其膨胀的空间也会被吸水后膨胀的保水剂填充;而基质厚度降低也不仅是结构的变化,同时也有结构变化对保水剂吸水能力的影响,因此,

含保水剂的屋顶绿化基质材料的体积变化对渗流的影响比对土壤渗流的影响<sup>[16]</sup>更为复杂。

就入渗率而言,试验所采用的基质材料以陶粒为骨架,以草炭和保水剂为填充,这种配比决定了其孔隙大、孔隙率高,因而,基质含水率的变化对入渗率的影响非常小,这种性质在试验中表现为只要出流路径保持通畅,屋顶绿化在长时间强降雨下不会发生表面径流。含水率对基质材料的主要影响表现在对基材导水率的影响,与非饱和土渗流不同的是,含水率不仅代表着渗流路径的浸润情况也代表着基质内部孔隙被保水剂填充情况。

考察降雨强度、基质厚度以及基质初始含水率对产流时间的综合影响,对37次模拟降雨试验数据进行多元回归,得到回归模型

$$T = e^{f(i, \theta, h)} \quad (3)$$

$$f(i, \theta, h) = -1.146i - 2.325\theta^2 -$$

$$12.048\theta - 1.923\theta h + 1.551h + 17.673$$

$$(R^2 = 0.924, n = 37, P < 0.001)$$

回归模型的模拟计算值与实测值的相关系数为0.924,置信度 $P < 0.001$ ,说明该回归模型较为合理,模拟效果较好。回归模型式(3)表明产流时间 $T$ 受降雨强度 $i$ 、基质厚度 $h$ 以及基质初始含水率 $\theta$ 综合影响,当初始含水量 $\theta$ 和基质厚度 $h$ 不变时,产流时间 $T$ 与降雨强度 $i$ 呈负相关,即降雨强度越大,产流时间越短。

### 3 结论

1)展示了由陶粒、草炭和保水剂组成的简单屋顶绿化降雨产流的一般过程,归纳了简单屋顶绿化基质材料降雨产流的一般过程和规律,展现了简单屋顶绿化在降雨过程中的滞流蓄水特性。

2)分析了降雨强度、基质厚度、基质初始含水率对简单屋顶绿化降雨过程中蓄水效果影响。影响简单屋顶绿化降雨过程中蓄水效果的因素主要是基质初始含水率和基质厚度。基质初始含水率越低,基质厚度越厚,基质的蓄水效果越强;反之,基质的蓄水效果越弱。

3)建立了产流时间数学模型,简单屋顶绿化降雨产流时间与降雨强度呈负相关,当降雨强度一定时,产流时间受基质厚度与初始含水率的综合影响。

4)在侧向受限的试验条件下,随着干湿循环次数增加,基质的厚度总体呈现下降趋势,储水性能逐渐下降,延迟产流时间逐渐缩短。

### 参考文献:

- [1] 王军,马洪涛.城市排涝规划有关问题探讨[J].给水排水,2014,40(3):9-12.  
Wang J, Ma H T. Discussion on some issues about urban logging prevention planning [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40 (3): 9-12. (in Chinese)
- [2] 宁亚平.城市排水防涝问题的几点思考[J].山西建筑,2014,40(32):129-130.  
Ning Y P. Some reflections on city drainage water-logging prevention problems [J]. Shanxi Architecture, 2014,40(32):129-130. (in Chinese)
- [3] 国务院办公厅.关于做好城市排水防涝设施建设工作的通知[Z].2013.
- [4] Getter K L, Rowe D B. The role of extensive green roofs in sustainable development[J]. Hort Science, 2006, 41 (5):1276-1285.
- [5] Jim C Y, Peng L L H. Substrate moisture effect on water balance and thermal regime of tropical extensive green roof [J]. Ecological Engineering, 2012(47):9-23.
- [6] Villarreal E L, Bengtsson L. Response of a sedum green-roof to individual rain events [J]. Ecological Engineering 2005, 25(1):1-7.
- [7] van Woert N D, Rowe D B, Andresen J A, et al. Green roofs stormwater retention: effects of roof surface, slope and media depth [J]. Journal of Environmental Quality, 2005, 34(3):1036-1044.
- [8] 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 L H, Ni G H, Liu M F, 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)
- [9] 叶建军,魏裕基,肖衡林,等.初绿化屋顶对雨水截留作用研究[J].给水排水,2014,40(5):139-143.  
Ye J J, Wei Y J, Xiao H P, et al. Rainwater interception performance of green roof [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40 (5): 139-143. (in Chinese)
- [10] 孙杰,许杨,陈正洪,等.华中地区近45年来降水变化特征分析[J].长江流域资源与环境,2010,19(Sup):45-51.  
Sun J, Xu Y, Chen Z H, et al. Characteristics of precipitation in central region of China over 45 years [J]. Resouces and Envoronment in the Yangtze Basin, 2010, 19(Sup):45-51. (in Chinese)
- [11] 郭英莲,王继竹,李才媛,等.锋生作用对2011年梅汛期

- 湖北暴雨的影响[J]. 气象,2014,40(1):86-93.
- Guo Y L , Wang J Z, Li C Y, et al. Effect of frontogenesis on rainstorm in hubei during meiyu period 2011 [J]. Meteorological Monthly, 2014,40(1):86-93. (in Chinese)
- [12] 张家其,龚箭,吴宜进. 基于日降雨数据的湖北省降雨侵蚀力初步分析[J]. 长江流域资源与环境,2014,23(2):274-280.
- Zhang J Q, Gong J , Wu Y J. A preliminary study on rainfall erosion force in Hubei based on the data of daily rainfall [J]. Resource and Environment in the Yangtze Basin,2014,23(2):274-280. (in Chinese)
- [13] 王芹,喻威,王成,等. “08.7”襄樊罕见特大暴雨的中尺度观测特征与物理机制分析[J]. 暴雨灾害,2009,28(1):43-50.
- Wang Q, Yu W, Wang C, et al. Mesoscale features and dynamic mechanisms of an infrequent torrential rain in Xiangfan [J]. Torrential Rain and Disasters, 2009, 28(1):43-50. (in Chinese)
- [14] 宋海鹏. 轻型屋顶栽培基质厚度对 6 种景天属植物坪用性状的影响[D]. 南京:南京农业大学,2009.
- Song H P. The effect of substrate depth for light-green roof on the turf quality of six sedum [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University,2009.
- [15] 汪亚峰,李茂松,宋吉青,等. 保水剂对土壤体积膨胀率及土壤团聚体影响研究[J]. 土壤通报,2009,40(5):1022-1025.
- Wang Y F, Li M S, Song J Q, et al. Study on effect of absorbent on soil aggregates and ratio of soil bulks expanding [J]. Chinese Journal of Soil Science,2009,40(5):1022-1025. (in Chinese)
- [16] 赵彦旭,张虎元,吕擎峰,等. 压实黄土非饱和渗透系数试验研究[J]. 岩土力学,2010,31(6):1809-1812.
- Zhao Y X, Zhang H Y, Lyu Q F, et al. Experimental study of unsaturated permeability coefficient of compacted loess [J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(6):1809-1812. (in Chinese)

(编辑 郭 飞)