

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20200107

# 海绵城市建设的绿化屋顶技术及其水文与环境效应研究进展

王 俊<sup>1,2</sup>, 梅国雄<sup>1,2</sup>, 黄 山<sup>1,2</sup>, 黄递胜<sup>1,2</sup>, 刘佳亲<sup>1,2</sup>

(1. 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西 南宁 530004;

2. 广西大学土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004)

**摘 要:** 绿化屋顶作为海绵城市建设的重要措施之一, 能够有效改善城市内涝、热岛效应、建筑能耗、城市绿化等生态环境问题, 是一种可持续的城市低影响开发实践, 具有较大的开发潜力。通过系统回顾和综述国内外绿化屋顶最新研究成果和发展趋势, 指出了不同气候条件和绿化屋顶类型雨水年滞留率约为 50%~90%, 并能将室内温度降低约 3℃~4℃, 为绿化屋顶推广应用提供可靠依据。基于海绵城市建设理念重点从植被选择、基质土壤和排水层建设探讨了绿化屋顶试验研究进展和实用化建设方法, 归纳了绿化屋顶对降雨径流量和径流峰值的衰减、径流开始时间和径流峰值时间的延迟作用, 指出了绿化屋顶雨水滞留性能主要受气象因素和结构配置影响, 并受荷载、成本、维护管理、径流污染和渗漏风险等条件限制。同时, 探讨了绿化屋顶雨水滞留过程动态模拟的建模方法和发展方向。最后围绕绿化屋顶潜在效益开发、结构性能综合优化、机理模型研究等方面提出了我国绿化屋顶研究建议和趋势。

**关键词:** 海绵城市; 绿化屋顶; 雨水滞留; 蒸散量; 雨水管理

中图分类号: TV11

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2021)01-0042-07

## 1 引言

随着城镇化进程的加快, 导致城市越来越多的自然渗透表面被建筑物、道路、广场等不透水表面所替代。城市自然渗透率下降了约 70%<sup>[1]</sup>, 以至于许多城市在暴雨时出现“城市看海”现象。同时, 随着城市径流增加和绿地的减少, 也会带来径流污染、污水管道溢流和城市“热岛效应”等环境问题。因此, 人们开始关注城市生态环境系统的可持续发展。例如, 美国、英国、澳大利亚、德国等提出的“低影响开发”(Low Impact Development, LID), “可持续城市排水系统”(Sustainable Urban Drainage Systems, SUDS), “水敏性城市”(Water Sensitive Urban Design, WSUD)和“洼地—渗渠系统”(Mulden Rigolen System, MR)等。而我国在 2013 年 12 月召开的中央城镇化工作会议提出了建设自然积存、

自然渗透、自然净化的海绵城市<sup>[2-3]</sup>。

绿化屋顶技术作为海绵城市建设的重要措施之一, 能够有效滞留雨水, 过滤和处理雨水, 被认为是推动城市可持续发展的有效实践, 已在一些发达国家广泛应用。绿化屋顶通过改善传统建筑屋面渗透率而不侵占额外建设用地, 能够有效弥补其他海绵城市建设措施被动接纳的缺陷。此外, 在城市建筑屋顶、路面、广场、停车场等不透水表面中, 城市建筑屋顶占了近 40%~50%的比例<sup>[4]</sup>, 具有较大的开发潜力。

绿化屋顶也被称为屋顶花园、种植屋面、生态屋顶或绿色屋顶等(见图 1)。现代绿化屋顶起源于 20 世纪 60 年代的德国, 早期的绿化屋顶主要用于屋顶隔热, 以减少太阳辐射和建筑物能耗<sup>[5]</sup>。2002 年, 德国大约有 14%的建筑物建设了绿化屋顶<sup>[6]</sup>。而我国仅有少数几个科研院所开展绿化屋顶水文、环境和热性能相

收稿日期: 2020-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878185); 广西自然科学基金创新研究团队项目(2016GXNSFGA380008)

作者简介: 王俊(1993-), 男, 贵州瓮安人, 博士, 主要研究方向为岩土工程与城市生态环境。E-mail:wangjun\_279@163.com

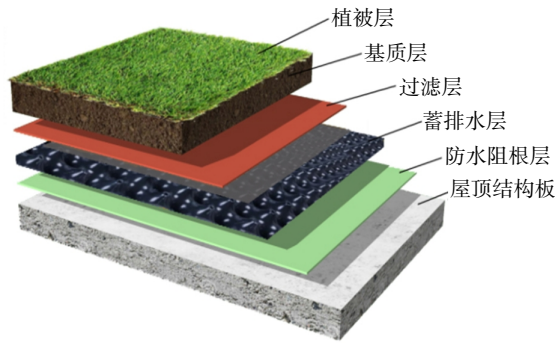


图1 绿化屋顶结构  
Fig.1 The structure of green roofs

关研究<sup>[7-10]</sup>,因此,深入研究绿化屋顶对于加快我国绿化屋顶推广应用和产业发展具有重要意义。

## 2 绿化屋顶效益定量分析

### 2.1 雨水滞留性能

绿化屋顶系统最重要的效益是其对降雨的保留,并通过逐步排水和蒸散释放到大气中,从而在更长的时间内分配暴雨径流,有助于城市雨水管理。绿化屋顶雨水滞留性能主要体现在径流开始时间和径流峰值时间延迟、径流量和径流峰值的衰减(见图2)。通过文献梳理发现,与普通屋顶相比,不同区域气候条件和不同绿化屋顶类型的雨水年滞留率大多集中在 50%~90% (见表1),而单个降雨事件的绿化屋顶雨水滞留率在 0~100%不等<sup>[11]</sup>,这主要取决于降雨强度、降雨量、前期干旱时间、基质水力特性、蓄排水层类型、植被类型和覆盖率等。基于海绵城市建设理念,绿化屋顶技术可视为将城市开发前的自然渗透面“迁移”至建筑屋面,有效降低城市不透水表面比例。

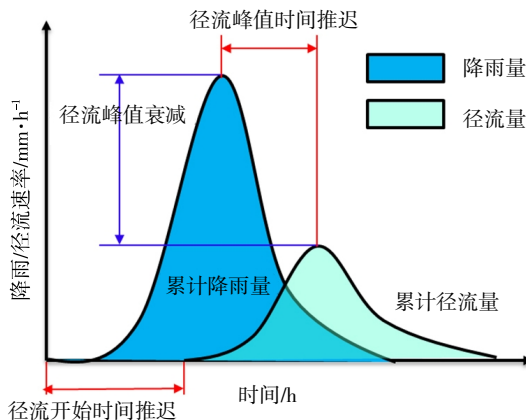


图2 绿化屋顶雨水滞留过程  
Fig.2 The process of stormwater retention for green roofs

表1 绿化屋顶生态环境效益

Table1 The ecological environment benefits of green roofs

类别	生态环境效益	定量改善效果	参考文献
水文性能	减少雨水径流量	雨水年保留率约 50%~90%	[11]
	推迟径流峰值时间	推迟径流峰值约 10min~2h	[16]
热性能	缓解城市热岛效应	将城市温度降低 0.3℃~3℃	[13][17]
	降低建筑物能耗	将室内温度降低 3℃~4℃; 制冷能耗减少 16%	[14][18]
	延长建筑物寿命	绿化屋顶日温差波动约 3℃延长屋顶寿命大于 20a	[19]
城市环境	改善径流质量	pH 值从 5~6 提高到 7~8; 径流污染物浓度普遍减少	[20][21]
	减少噪音	降低低频和中频噪声; 10dB 和 20dB	[22]
	减少空气污染	PM10 去除量约 0.42~9.1g/m <sup>2</sup> 减少 CO <sub>2</sub> 排放	[23]
	增加生物多样性、美化环境	植物、动物和微生物等	[24]

### 2.2 热性能

绿化屋顶的反照率远高于普通屋顶,这意味着绿化屋顶对太阳辐射的吸收减少,从而有助于缓解城市热岛效应。研究表明,绿化屋顶反射了 27% 的太阳辐射,植物和基质吸收了 60%,仅有 13% 传输到基质<sup>[12]</sup>。在炎热的夏季,绿化屋顶能够保持室内温度凉爽,减小屋面昼夜温差波动,从而降低建筑物能耗,缓解屋顶由冷热交替引起的开裂破坏。与普通屋顶相比,绿化屋顶能够将城市环境温度降低约 0.3℃~3℃<sup>[13]</sup>,将室内温度降低约 3℃~4℃<sup>[14]</sup>,而绿化屋顶屋面日温度变幅仅为普通屋顶的 45% 左右<sup>[15]</sup>。在绿化屋顶热性能研究中,目前还没有足够的证据表明其对区域环境温度的缓解作用,大部分研究仍然是基于模型试验、单个绿化屋顶数据或数值模拟分析。事实上,绿化屋顶对建筑物室内温度的改善效果是显然的,但能否替代传统建筑屋面的保温隔热层有待进一步研究。而对于绿化屋顶在屋面混凝土结构板或防水层耐久性方面的研究也缺乏有效监测手段和试验方法,大多仅是通过屋面温差变化幅度间接反应其潜在效益。

### 2.3 其他生态环境效益

绿化屋顶的其他生态环境效益主要来自于基质层或植被层所带来的直接效益,包括降低空气和噪音

污染、改善雨水径流质量、增加城市绿化和生物多样性等。Connelly 等<sup>[22]</sup>通过对不同基质深度、含水率、植物类型的绿化屋顶和普通屋顶进行试验,结果表明,在低频和中频范围内绿化屋顶分别比普通屋顶降低噪声 10dB 和 20dB。与普通屋顶相比,绿化屋顶每年对 PM10 的去除量约为 0.42~9.1g/m<sup>2</sup><sup>[23]</sup>。此外,也有研究表明绿化屋顶基质层和植被层能够在降雨时吸收或过滤雨水中的污染物,有效改善雨水径流水质,并能够将雨水径流 pH 值从 5~6 提高到 7~8<sup>[20-21]</sup>。绿化屋顶也有助于减少城市生物栖息地损失,增加城市生物多样性,并提供更美观的城市绿化环境。因此,有国家和地区将绿化屋顶建设作为城市绿化面积指标量化的替代措施进行推广。

### 3 绿化屋顶主要结构特征

#### 3.1 基质土壤

绿化屋顶因受气象因素、建筑物荷载安全、植被生长等条件约束,基质土壤通常采用渗透性和保水性较强的轻质改良土壤,以保持足够的水和养分供植被生长。目前,绿化屋顶基质常用的无机材料主要包括陶粒、浮石、珍珠岩、蛭石、煤渣、碎砖等;而有机质主要是泥炭或堆肥。基质中的有机质含量一般不超过 20%,以最大程度地减少因分解而引起的基质收缩,并避免径流中浸出过多的养分<sup>[25]</sup>。Chen Haoming 等<sup>[26]</sup>通过在基质中添加一定比例的生物炭,以有效调节绿化屋顶基质的水分、温度和养分,进而促进植物生长、微生物群落和生态效益。在绿化屋顶结构中,基质层的功能性最强,因为绿化屋顶的大部分效益与基质土壤性质直接相关。因此,许多学者在基质深度、材料选择、配比和粒径分布上做了很多有益尝试,以满足基质轻量化、保水性高、渗透性和吸附性强、养分适宜、促进生物多样性等诸多特点。然而,因地制宜选择当地土壤作为绿化屋顶基质层并没有得到很好的应用,这造成了高昂的建设和维护管理成本。

#### 3.2 植被类型

绿化屋顶成功的关键取决于植被是否健康生长,因为不同区域气候条件下,绿化屋顶上的植物需要适应温度、降雨、光照和风的极端变化,这就要求植被具有很强的生存能力。理想的植被选择具有耐旱、耐热、耐涝、维护少、覆盖好、成本低、抗病虫害等特点。Dvorak 等<sup>[27]</sup>通过对绿化屋顶植被应用的大量文献梳理发现,景天属植物在深度为 7~10cm 的基质中表现最

佳,甚至在无水条件下能承受长达 4 个月的干旱时间,因此,景天属植物由于其很强的耐旱性而在绿化屋顶中广泛应用。但也有研究表明景天属植物较低的蒸腾量在降雨事件之间可能无法满足补充降雨滞留空间的作用<sup>[28]</sup>。因此,也有学者探讨了不同单一植物和植物多样性对绿化屋顶生态环境效益的影响,特别是植被类型对雨水径流量的影响存在显著差异<sup>[29]</sup>;与单一植物相比,绿化屋顶混合种植植物冠层密度和长期生存表现潜力更佳<sup>[30]</sup>。

#### 3.3 蓄排水材料

绿化屋顶蓄排水层主要是为绿化屋顶系统提供氧和水的平衡,防止过多的水造成植被根系腐烂,以确保植物具有良好的生长基质。近年来,应用于绿化屋顶的排水材料主要有两种类型:一是高强度土工合成材料排水板(聚乙烯或聚苯乙烯);另一种是排水骨料(如陶粒、卵石、砂砾、橡胶屑等)。为提高绿化屋顶的保水能力,土工合成材料排水模块通常具有一定蓄水能力,保持排水性能的同时蓄一部分水供植物生长,这有益于缓解径流峰值和减少植被滴灌维护。Wong<sup>[31]</sup>使用一种 2.5cm 厚的塑料专用排水板,其凹槽保水能力约为 4.3L/m<sup>2</sup>。另外,为缓解城市内涝和水资源充分利用,有必要按照海绵城市建设理念,将绿化屋顶排水径流收集起来,用于绿化屋顶灌溉或生活用水,进一步促进绿化屋顶可持续发展。

### 4 雨水滞留性能影响因素

#### 4.1 气象因素

绿化屋顶的雨水滞留性能主要取决于降雨强度对入渗率和表面径流量的影响、降雨量对雨水滞留率的影响,以及前期干旱时间温度、湿度、风速、太阳辐射等气象因素对绿化屋顶蒸散量和基质初始含水量的影响。Villarreal<sup>[32]</sup>认为绿化屋顶的雨水滞留率在很大程度上取决于降雨强度,因为降雨强度大于基质入渗率时,基质土壤快速饱和而产生地表径流,反而降雨强度较小时,雨水保留率较大。由于绿化屋顶的雨水滞留率等于雨水滞留量与降雨量的百分比,因此当降雨量超过绿化屋顶雨水滞留能力产生径流,雨水滞留率也随着降雨量增加而减小。另外,前期干旱时间通过蒸散和重力排水来释放水分,从而为二次降雨提供可用滞留空间,以提高绿化屋顶的雨水滞留能力。事实上,大多数降雨和蒸发都随着季节性变化而不同,但绿化屋顶建设却很难适应这种季节性变化,比

如季节性雨水变化和冬季冻融条件等。

#### 4.2 结构配置

绿化屋顶上的雨水可以通过植被截流、基质滞留、排水层蓄水等减少径流量,最终经由基质表面蒸发和植物蒸腾过程释放回大气中。Liu Wen 等<sup>[33]</sup>认为绿化屋顶基质材料及其深度是影响绿化屋顶雨水滞留能力的主要因素,并给出绿化屋顶4个结构配置的贡献大小顺序为基质材料>基质深度>坡度>植被。基质水力特性主要包括含水量、导水率、入渗率等,较低的初始含水率和较高的田间持水量对应较高的径流减少和径流延迟,意味着更强的雨水保留能力。蒸发、蒸腾是影响绿化屋顶雨水滞留性能的关键参数,而植物对绿化屋顶雨水保持性能的影响主要体现在蒸腾作用,因为蒸腾是恢复降雨事件之间基质保水能力的主要过程。另外,植物对绿化屋顶水文性能的影响还表现为冠层截留、根系吸水、根系引入优先入渗路径、根系挤占滞留空间等。

#### 4.3 建筑物荷载安全限制

建筑物结构荷载安全、建设成本和后期维护管理成本是影响绿化屋顶水文性能必须要考虑的限制条件。根据我国《建筑结构荷载规范》规定,不上人的屋面活荷载标准值为 $0.5\text{kN/m}^2$ ,其他屋面活荷载标准值在 $2\sim 3\text{kN/m}^2$ ,而生长基质深度在 $5\sim 20\text{cm}$ 的简单式绿化屋顶总重量约 $70\sim 170\text{kg/m}^2$ ,由此,大多数屋面都能够满足绿化屋顶的建设荷载需求。但为获得满足基质特性的轻质土壤,一些学者选用珍珠岩、蛭石、陶粒、椰糠、绿色废弃物堆肥等轻质材料改良土壤,另外还对保水能力超过80%的矿物岩棉板、绝缘软木板(ICB)等轻质培养基进行研究<sup>[31,34]</sup>。绿化屋顶荷载安全需要考虑绿化屋顶结构建设初期的荷载以及基质饱和、蓄水、植被生长所增加的荷载。

#### 4.4 建设和维护管理成本制约

绿化屋顶的建设成本取决于地理位置、人工成本、绿化屋顶类型和材料等,简单式绿化屋顶基质和排水层约占总成本的48%,植被成本占31%,阻根防水成本占16%,滴灌成本占5%<sup>[11]</sup>。根据Niu 等<sup>[35]</sup>的研究,华盛顿绿化屋顶的建设成本比传统屋顶成本高27%。而绿化屋顶的定期管理维护主要包括灌溉、施肥、除杂草、排水和基底检查等。为确保长期可持续灌溉,潜在的解决方案主要是雨水收集再利用、提高保水性、增加滞留层、生活用水灌溉和智能控制灌溉等。尽管绿化屋顶的诸多潜在效益远比建设成本重要,但这些潜在效

益往往不能产生直接利润,而是一种间接或长期回报。同时,增加初期建设成本、维护管理和浪费水资源等方式通常被认为是不可持续的做法,这也是阻碍绿化屋顶发展的重要因素。

#### 4.5 径流污染和屋面渗漏风险

有研究表明,绿化屋顶也是氮和磷等污染物的来源<sup>[21]</sup>,这可能与绿化屋顶基质本身的富营养化和养分浸出有关。虽然部分学者通过在基质中添加陶粒、海藻、生物炭等材料对于改善径流污染取得了一定成效<sup>[36]</sup>,但能否消除径流水质带来的负面影响仍是影响绿化屋顶是否可持续发展的一个重要因素。尽管绿化屋顶对屋面防水卷材具有一定保护作用,但任何屋面都有可能出现渗漏风险,针对绿化屋顶开发的防水卷材并不多见,解决屋顶渗漏问题也是绿化屋顶发展的关键因素。

### 5 绿化屋顶水文模型研究进展

影响绿化屋顶水文性能的因数主要包括蒸发和蒸腾作用、初始含水率、降雨强度和土壤水力特性等。为了动态模拟和预测绿化屋顶含水率和径流量变化,对绿化屋顶水文性能进行建模,并对这些水文性能参数进行估算和优化,为绿化屋顶定量设计、灌溉方式和维护管理提供指导。用于绿化屋顶水文性能模拟和预测的模型主要有:经验模型、水量平衡概念模型和基于Richards方程的非饱和渗流机理模型。Vesuviano 等<sup>[37-38]</sup>结合经验方法和水量平衡模型提出了基质和蓄排水层两阶段的绿化屋顶滞留模型:

$$Q_{t+1}=kh_t^n \quad (1)$$

$$h_{t+1}=h_t+(Q_{t+1}-I_{t+1})\Delta t \quad (2)$$

式中: $Q$ 为流出速率( $\text{mm}/\text{min}$ ); $I$ 为流入速率( $\text{mm}/\text{min}$ ); $h$ 为储水深度( $\text{mm}$ ); $\Delta t$ 为时间步长; $n$ 为无量纲指数参数; $k$ 为比例参数。

基于水量平衡的概念模型将绿化屋顶的基质层和蓄排水层视为两个相互作用的水箱。在基质层,水分输入包括降雨或灌溉量,输出包括蒸散量、表面径流和底部水分通量;蓄排水层的水分平衡可以表示为基质底部水分通量作为输入,蓄排水层排水量和潜水蒸发量作为输出。可以通过以下水分平衡方程来描述:

$$\Delta\theta=P+I+ET_b-ET-R_s-R_b \quad (3)$$

$$\Delta H=R_b-Q-ET_b \quad (4)$$

式中: $\theta$ 为含水量; $P$ 为降雨量; $I$ 为灌溉量; $ET$ 为蒸散

量;  $ET_b$  为蓄排水层潜水蒸发量;  $R_s$  为表面径流;  $R_b$  为基质底部水分通量;  $H$  为蓄排水层含水量;  $Q$  为排水量。在水量平衡模型中, 比较难确定的参数是蒸散量和基质下边界水分通量。通常, 蒸散量  $ET$  在水文模型中作为上边界条件, 并根据 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式进行计算:

$$ET = ET_0 K_c F \quad (5)$$

式中:  $ET_0$  为参考蒸散量;  $K_c$  为作物系数;  $F$  为基质供水系数。根据 Peng Zhangjie 等<sup>[39]</sup>的研究, 下边界条件对排水径流和含水率分布的模拟具有重要影响, 相比自由排水边界和渗流边界, 采用恒定水头边界条件具有较好的模拟效果。

经验模型和概念模型简单易行, 所需计算参数较少, 不足之处在于模型参数率定均建立在前期监测数据之上。在土壤水动力学中, 基于 Richards 方程的物理模型计算参数取决于可测量的物理属性, 相比经验模型和水量平衡模型具有更广的应用范围。但 Richards 模型以及土水特征曲线、非饱和导水率等模型通常要求绿化屋顶基质为均质土壤, 并且所需参数较多, 计算复杂, 实际应用比较困难。一维垂直 Richards 方程如下:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (6)$$

式中:  $\theta$  为含水率;  $K(h)$  为水头  $h$  处的非饱和导水率;  $z$  为垂直坐标。为了求解 Richards 方程, 一般采用 Van Genuchten 模型<sup>[40]</sup>描述土壤水分特征曲线和非饱和导水率。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha \varphi)^n} \right]^m \quad (7)$$

$$K(\varphi) = K_s \theta_s^{1/2} \left[ 1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (8)$$

式中:  $S_e$  为相对饱和度;  $\theta$ 、 $\theta_r$ 、 $\theta_s$  分别为体积含水率、残余含水率和饱和含水率;  $\varphi$  为土壤吸力;  $\alpha$ 、 $m$ 、 $n$  为经验参数;  $\alpha$  为土壤进气值的倒数;  $n$  为孔径指数;  $m = 1 - 1/n$ ;  $K_s$  为饱和导水率。

由于 Richards 方程的非线性, 要求出它的解析解往往比较困难, 实际应用中一般采用有限差分和有限元法等数值方法进行求解<sup>[41]</sup>。目前用于模拟绿化屋顶径流和入渗的数值模拟方法主要有非饱和土壤水、热、溶质运移一维模型 HYDRUS-1D, 模拟饱和-非饱和介质水分和溶质运移二维模型 SWMS-2D, 雨洪管理模型 SWMM, 土壤水盐运移与作物生长模型 SWAP

等<sup>[10,42-43]</sup>。

## 6 结论与展望

绿化屋顶具有滞留雨水、减少雨水径流和径流峰值、推迟径流峰值时间以及过滤和处理雨水等诸多雨水管理优势, 同时还具有降低建筑物能耗、延长建筑物寿命、缓解城市热岛效应、增加生物多样性、减少噪音和空气污染等生态环境效益, 能够有效改善由城镇化快速发展所带来的生态环境问题, 是一种可持续的低影响开发方式, 在我国海绵城市建设中具有较大的应用前景。绿化屋顶水文性能主要受气象因素和结构配置(植被、基质、蓄排水材料等)影响, 同时存在建筑物荷载安全限制、建设成本较高、维护管理难、径流污染浸出、屋面渗漏风险、缺乏区域有效实践数据等困难和挑战。而最新的研究都指向了降低成本、节能环保、资源循环利用等可持续发展方式, 并建立效益有效性与绿化屋顶结构性能参数优化之间的相互影响关系。基于已有文献的研究, 提出开展我国绿化屋顶技术深入研究的一些建议和研究方向。

(1) 深入开发绿化屋顶在当地的潜在效益。坚持绿色发展理念, 加快海绵城市建设, 让城市既有“里子”也有“面子”, 提高新型城镇化发展质量是大势所趋, 具有较好发展前景。然而绿化屋顶技术作为源头管理的主动式海绵城市建设措施的优越性并没有引起广泛关注, 特别是不同区域气候条件下绿化屋顶在当地的适宜性研究也需要进一步加强。另外, 绿化屋顶技术作为水文、环境、土木等交叉学科研究, 需要加强学科间的交流合作, 充分发挥各学科潜在优势。

(2) 结构性能综合优化。开发低成本、高性能、少维护的绿化屋顶或成为其推广应用的重要支撑。而绿化屋顶大多理想的结构特征存在相互制约(如增加基质厚度与荷载安全等), 需要整体考虑绿化屋顶结构优化与最佳效益之间的相互影响关系, 以便优化一项功能不会对另一项功能产生负面影响。

(3) 绿化屋顶机理模型研究。目前绿化屋顶研究广泛应用的机理模型大多源于土壤水动力学或地下水动力学相关入渗模型、热传递模型、根系吸水模型和蒸发(蒸腾)模型等理论模型, 但绿化屋顶基质层厚度有限和排水层作为下边界条件等特点有别于自然土层的特殊性, 且绿化屋顶水分运移与热传递作为其最重要的两个性能存在密切相关, 如何基于已有研究开发绿化屋顶水分运移、热传递及水热耦合机理模型

有待进一步研究。

(4)制定有关政策措施和技术规范。对比国外绿化屋顶发展较好的一些国家,均出台了强有力的激励和支持政策,尽管我国部分城市配套了相关政策,但相比这些强制性措施、补贴政策、奖惩措施以及雨水费制度等有效做法,其实际效果并不理想。另外,绿化屋顶的推广应用除了受政策激励外,加强相关基础研究,因地制宜制定和完善理论与实践相结合的技术标准和规范显得尤为重要。

#### 参考文献:

- [1] Scholz-Barth K. Green roofs: stormwater management from the top down [J]. *Environmental Design & Construction*, 2001,4(1):63-69.
- [2] 王浩,梅超,刘家宏. 海绵城市系统构建模式[J]. *水利学报*, 2017,48(9):1009-1014+1022. (WANG Hao, MEI Chao, LIU Jiahong. Systematic construction pattern of the sponge city [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017,48(9):1009-1014+1022. (in Chinese))
- [3] 张建云,王银堂,胡庆芳,等. 海绵城市建设有关问题讨论[J]. *水科学进展*, 2016,27(6):793-799. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HU Qingfang, et al. Discussion and views on some issues of the sponage city construction in China [J]. *Advances in Water Science*, 2016,27(6):793-799. (in Chinese))
- [4] Stovin V, Vesuviano G, Kasmin H. The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions [J]. *Journal of Hydrology*, 2012,414:148-161.
- [5] Oberndorfer E, Lundholm J, Bass B, et al. Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services [J]. *BioScience*, 2007,57(10):823.
- [6] Saadatian O, Sopian K, Salleh E, et al. A review of energy aspects of green roofs [J]. Elsevier Ltd, 2013,23:155-168.
- [7] 葛德,张守红. 基质类型及厚度对绿色屋顶径流调控效益的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2019,(3):31-38. (GE De, ZHANG Shouhong. Influence of types and depths of substrates on hydrological performances of green roofs [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019,(3):31-38. (in Chinese))
- [8] 唐鸣放,郑开丽,严永红,等. 屋顶容器式轻型绿化热工性能分析[J]. *重庆大学学报*, 2009,(9):992-996. (TANG Mingfang, ZHENG Kaili, YAN Yonghong, et al. Study on thermal performance of vessel type green roof [J]. *Journal of Chongqing University*, 2009,(9):992-996. (in Chinese))
- [9] 秦华鹏,唐女,唐巧玲. 蓄水层对绿色屋顶径流削减能力的影响分析[J]. *中国给水排水*, 2016,32(13):132-135. (QIN Huapeng, TANG Nv, TANG Qiaoling. Impact of water storage layer on runoff reduction of green roofs [J]. *China Water & Wastewater*, 2016,32(13):132-135. (in Chinese))
- [10] 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))
- [11] Shafique M, Kim R, Rafiq M. Green roof benefits, opportunities and challenges—a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018,90:757-773.
- [12] Wong N H, Cheong D K W, Yan H, et al. The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore [J]. *Energy and Buildings*, 2003,35(4):353-364.
- [13] Speak A F, Rothwell J J, Lindley S J, et al. Reduction of the urban cooling effects of an intensive green roof due to vegetation damage [J]. *Urban Climate*, 2013,3:40-55.
- [14] Peck S W, Callaghan C, Kuhn M E, et al. Greenbacks from Green Roofs: Forging a New Industry in Canada [M]. Canada Mortgage & Housing Corporation, 1999.
- [15] 孙挺,倪广恒,唐莉华,等. 绿化屋顶热效应的观测试验[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2012,(2):160-163. (SUN Ting, NI Guangheng, TANG Lihua, et al. Experimental study of the thermal performance of green roof [J]. *Journal of Tsinghua University(Science & Technology)*, 2012,(2):160-163. (in Chinese))
- [16] Berndtsson J C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: a review [J]. *Ecological Engineering*, 2009,36(4):351-360.
- [17] Santamouris M. Cooling the cities - a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments [J]. *Solar Energy*, 2012,103(2014):682-703.
- [18] Karteris M, Theodoridou I, Mallinis G, et al. Towards a green sustainable strategy for Mediterranean cities: assessing the benefits of large -scale green roofs implementation in Thessaloniki, Northern Greece, using environmental modelling, GIS and very high spatial resolution remote sensing data [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016,58(2016):510-525.
- [19] Agency US -Environmental -Protection. Vegetated roof cover [R]. Washington (DC): Office of Water, 2000.
- [20] Tim Van S, Lisa R, Derek S, et al. Evaluation of green roofs for runoff retention, runoff quality, and leachability [J]. *Water Quality Research Journal of Canada*, 2009,44(1):33-47.
- [21] Razzaghamanesh M, Beecham S, Kazemi F. Impact of green roofs on stormwater quality in a South Australian urban environment [J]. *Science of the Total Environment*, 2013,470-471:651-659.
- [22] Connelly M, Hodgson M. Experimental investigation of the sound transmission of vegetated roofs [J]. *Applied Acoustics*, 2013,74(10):1136-1143.
- [23] Francis L F M, Jensen M B. Benefits of green roofs A systematic review of the evidence for three [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017,28:167-176.
- [24] Francis Robert A, Lorimer J. Urban reconciliation ecology: the potential of living roofs and walls [J]. *Journal of Environmental Management*, 2011,92(6):1429-1437.

- [25] Fassman E, Simcock R. Moisture measurements as performance criteria for extensive living roof substrates [J]. *Journal of Environmental Engineering (United States)*, 2012,138(8):841–851.
- [26] Chen H. Biochar increases plant growth and alters microbial communities via regulating the moisture and temperature of green roof substrates [J]. *Science of the Total Environment*, 2018,635(2018):333–342.
- [27] Bruce D, Astrid V, et al. Green roof vegetation for North American ecoregions: a literature review [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2010,96(4):197–213.
- [28] Nagase A, Dunnett N. Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs\_ Effects of plant species, diversity and plant structure [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2012,104(3):356–363.
- [29] Cook -patton S C, Bauerle T L. Potential benefits of plant diversity on vegetated roofs: a literature review [J]. *Journal of environmental management*, 2012,106:85–92.
- [30] Tran S, Lundholm J T, Staniec M, et al. Plant survival and growth on extensive green roofs: a distributed experiment in three climate regions [J]. *Ecological Engineering*, 2019,127: 494–503.
- [31] Wong G K L, Jim C Y. Quantitative hydrologic performance of extensive green roof under humid -tropical rainfall regime [J]. *Ecological Engineering*, 2014,70:366–378.
- [32] Edgar L V, Lars B. Response of a Sedum green-roof to individual rain events [J]. *Ecological Engineering*, 2005,25(1):1–7.
- [33] Liu W, Feng Q, Chen W, et al. The influence of structural factors on stormwater runoff retention of extensive green roofs: new evidence from scale-based models and real experiments [J]. *Journal of Hydrology*, 2019,569(2019):230–238.
- [34] Tadeu A. Drainage and water storage capacity of insulation cork board applied as a layer on green roofs [J]. *Construction and Building Materials*, 2019,209(2019):52–65.
- [35] Niu H, Clark C, Zhou J, et al. Scaling of economic benefits from green roof implementation in Washington, D C [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010,44(11):4302–4308.
- [36] Kuoppamäki K, Hagner M, Lehvavirta S, et al. Biochar amendment in the green roof substrate affects runoff quality and quantity [J]. *Ecological Engineering*, 2016,88:1–9.
- [37] Vesuviano G, Stovin V. A generic hydrological model for a green roof drainage layer [J]. *Water Science and Technology*, 2013,68(4): 769–775.
- [38] Vesuviano G, Sonnenwald F, Stovin V. A two-stage storage routing model for green roof runoff detention [J]. *Water Science & Technology*, 2014,69(6):1191–1197.
- [39] Peng Z, Smith C, Stovin V. Internal fluctuations in green roof substrate moisture content during storm events\_ Monitored data and model simulations [J]. *Journal of Hydrology*, 2019,573:872–884.
- [40] Van genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980,44(5):892–898.
- [41] 雷志栋,杨诗秀,谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社,1988. (LEI Zhidong, YANG Shixiu, XIE Senchuan. *Soil Water Dynamics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988. (in Chinese))
- [42] Qin H, Peng Y, Tang Q, et al. A HYDRUS model for irrigation management of green roofs with a water storage layer [J]. *Ecological Engineering*, 2016,95:399–408.
- [43] Birgitte G J, Vladimír H, Ashenaġ S G, et al. The transferability of SWMM model parameters between green roofs with similar build-up [J]. *Journal of Hydrology*, 2019,569(569):816–828.

## Review of Hydrology and Environmental Benefits of Green Roof Technology Based on Sponge City Construction

WANG Jun<sup>1,2</sup>, MEI Guoxiong<sup>1,2</sup>, HUANG Shan<sup>1,2</sup>, HUANG Disheng<sup>1,2</sup>, LIU Jiaqin<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Nanning 530004, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** As one of the important measures for sponge city construction, green roofs could effectively improve stormwater management, urban heat-island effects, better regulation of building temperatures and other ecological environmental problems. This paper reviewed the latest research and development trend of green roofs, pointed out that the annual retention rate of stormwater on green roofs is between 50% and 90%, and the indoor temperature could be reduced by about 3°C to 4°C, which would provide a reliable basis for the application of green roofs. Besides, it summarized the attenuation of green roofs to runoff and peak runoff, the delay of runoff and peak runoff, and pointed out that the stormwater retention performance of green roofs is mainly affected by meteorological factors and structure configuration, and restricted by building load, cost, maintenance management, runoff pollution and leakage risk. It also discussed the modeling method of dynamic simulation of stormwater retention process. Finally, it provided the suggestions and trends of green roofs in the aspects of benefits development, structural performance optimization and mechanism model research.

**Key words:** sponge city; green roofs; rainfall retention; evapotranspiration; stormwater management