

DOI: 10.5846/stxb201808281837

徐田婧, 彭立华, 杨小山, 何云菲, 姜之点. 亚热带季风区城市典型绿化屋顶的径流削减效应研究. 生态学报, 2019, 39(20): - .

Xu T J, Peng L H, Yang X S, He Y F, Jiang Z D. Assessing the rainwater runoff reduction effects of typical green roofs in a humid subtropical city. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): - .

亚热带季风区城市典型绿化屋顶的径流削减效应研究

徐田婧^{1,2}, 彭立华^{1,2,*}, 杨小山^{1,2}, 何云菲^{1,2}, 姜之点^{1,2}

1 南京工业大学建筑学院, 南京 211816

2 南京工业大学绿色建筑与生态城市实验室, 南京 211816

摘要: 屋顶绿化能够削减暴雨径流, 降低城市内涝发生频率, 促进可持续雨洪管理。目前针对亚热带季风气候区典型绿化屋顶的全年径流削减效应研究并不多见。以南京为研究区, 以简易型、花园型两类绿化屋顶为研究对象, 基于 1 年现场观测数据及水量平衡方程, 分析屋顶雨水的滞蓄、蒸发与径流量随季节变化规律及其关键影响因子, 采用 SCS-CN 模型计算绿化屋面的径流曲线数 (CN), 并估算城市尺度大面积屋顶绿化的暴雨径流削减效果。结果显示, 简易型、花园型绿化屋顶全年径流削减率分别为 42% 和 60.7%; 径流削减效应的四季排序为春季 > 冬季 > 秋季 > 夏季, 平均径流削减率依次为 78.6%、47.5%、33.2%、32.9% (简易型) 及 98%、84.3%、49.5%、48.1% (花园型); 土壤基质层对雨水截留起主导作用, 分别占径流削减总量的 52% 和 62%; 雨量和雨强是影响径流削减效应的关键因子, 与径流削减率均呈显著负相关关系 ($P < 0.01$), 初始土壤湿度与简易型绿化屋顶的径流削减率呈显著负相关 ($0.01 < P < 0.05$), 但与花园型的径流削减率无显著相关性; 基于全年 77 次降雨事件的降雨量-径流量数据测算得到简易型和花园型绿化屋顶的 CN 值分别为 92 和 88; 若南京主城区所有建筑屋顶面积的 60% 实施两类绿化, 则其全年径流量可分别削减 $2.8 \times 10^7 \text{ m}^3$ 和 $4.2 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。以上研究结果可为城市雨洪管理和海绵城市建设提供科学依据。
关键词: 绿化屋顶; 径流削减效应; SCS-CN 模型; CN 值

Assessing the rainwater runoff reduction effects of typical green roofs in a humid subtropical city

XU Tianjing^{1,2}, PENG Lihua^{1,2,*}, YANG Xiaoshan^{1,2}, HE Yunfei^{1,2}, JIANG Zhidian^{1,2}

1 School of Architecture, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China

2 Laboratory of Green Building and Eco-city, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China

Abstract: Roof greening provides a promising solution to urban flooding because of the commonly assumed effect on rainwater runoff reduction; however, few studies have investigated this effect in humid subtropical areas using long-term monitoring data. In this study, we evaluated two typical types of green roofs, extensive and intensive, in Nanjing City for their capacity to reduce runoff based on empirical hydrological equations calibrated with field measurement data collected over a whole year circle. We analyzed the variations in rainwater retention, evaporation, and runoff with respect to season and rainfall types. Based on paired rainfall-runoff data of 77 events over the year, the curve numbers (CN) of the two green roofs were calculated, and the annual runoff reduction of the city-scale roof greening was assessed. The results showed that annual runoff reduction rates of the extensive and intensive green roofs were 42% and 60.7%, respectively. The runoff reduction magnitude was highest in spring, followed by winter, autumn, and summer, with respective average reduction rates of 78.6%, 47.5%, 33.2%, and 32.9% for the extensive green roof and 98%, 84.3%, 49.5%, and 48.1% for the intensive roof. Soil played a dominant role in rainwater retention, accounting for 52% and 62% of the total runoff

基金项目: 国家自然科学基金 (41871189, 51408303); 江苏省自然科学基金 (BK20140941, BK20161547)

收稿日期: 2018-08-28; 网络出版日期: 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: plhblue@njtech.edu.cn

reduction for the extensive and intensive green roofs, respectively. Precipitation and rainfall intensity were key factors affecting runoff effects, both being negatively correlated with the runoff reduction rate ($P < 0.01$). Antecedent soil moisture was negatively correlated with the runoff reduction rate for the extensive green roof ($0.01 < P < 0.05$) but showed no significant correlation for the intensive green roof. The CNs of the extensive and intensive green roofs were assessed to be 92 and 88, respectively, compared with the value of 98 for conventional impervious roofs. A hypothetical 60% coverage of extensive and intensive greening on all building roofs in the main city of Nanjing might lead to an annual runoff reduction of $2.8 \times 10^7 \text{ m}^3$ and $4.2 \times 10^7 \text{ m}^3$, respectively. These results can provide a scientific basis for urban stormwater management and sponge city construction.

Key Words: green roof; runoff retention; SCS-CN model; curve number

全球气候变化加剧了暴雨发生的频率与强度,快速城市化引起地表水文循环过程改变,两者共同作用使得城市内涝问题日益突出。城市硬质地面阻碍了雨水截留与下渗,将其转化为可渗透性生态铺装是减少暴雨径流、缓解内涝的有效途径。建筑屋面约占城市不透水地面的 40—50%^[1],实施屋顶绿化能够充分利用闲置空间对治暴雨内涝,促进城市可持续发展。

国内外针对绿化屋顶水文效应的定量研究主要基于野外实验观测方法获取降雨事件中的雨量和径流量动态数据,重现降雨—滞蓄—径流过程,揭示产流及洪峰延缓效应,探索关键影响因子。由于研究区降雨特征及植被土壤性质不同,文献报导的绿化屋顶径流效应之间存在较大差异,径流削减率从 10% 到 100% 不等^[2-9],洪峰流量可降低 18—100%^[1,8-10],产流出现时间延迟 5—130 min^[11-12],洪峰延迟 3—55 min^[8-9,13],雨量、雨强、土壤深度及前期土壤湿度是影响径流削减效益的关键因子^[3,13-15]。因此,单个研究结果不具有普适性,针对特定气候区及绿化类型开展专门研究对指导当地屋顶绿化实践及雨洪管理具有重要意义。

由于建筑屋面排水系统复杂,实时观测径流量难度较大,大多数研究采用定时收集排水管下落雨水并根据重量或水位推算径流深度^[13-14],或采用自制绿化屋面微模型替代现实绿化屋顶的方法以简化观测^[16-20],前者费时费力,难以获得长时间序列观测数据,后者存在尺度上推等不确定性问题。水文经验方程的引入可弥补上述观测实验缺陷,且能分拆植被、土壤截留及蒸发等各个部分对径流削减的贡献,有助于了解水文效应形成机制,因此,基于现场观测的经验方程法在大规模绿化屋顶径流削减效应研究中得到广泛应用^[21-23]。

SCS-CN 模型是由美国农业部水土保持局(USDA-SCS)开发的用于流域径流量估算的水文经验模型,具有结构简单、物理概念明确、所需参数少等特点。该模型假定流域降雨—径流关系与径流曲线数(CN)有关,CN 值又由植被覆盖、土壤质地及入渗能力、前期土壤湿度等下垫面特征综合决定,取值介于 0—100 之间,CN 值越高,径流系数越大。SCS 基于对美国植被土壤特征的大量研究建立了 CN 值检索表,为 SCS-CN 模型的广泛应用提供了参数依据,但由于 CN 值具有时空变化特征,在实际应用过程中进行参数区域化是保证模拟结果可靠性的重要环节。国内学者对特定流域及地表覆盖的 CN 取值做过大量研究^[24-27],然而,目前针对绿化屋顶这种特殊下垫面类型的研究较少。

亚热带季风区夏热冬冷,降雨丰富且存在明显的季节分布规律,以南京为例,基于全年观测数据及屋顶水量平衡经验方程,分析简易型和花园型两种典型绿化屋顶的径流削减效应及其随季节、雨型的变化规律,探讨关键影响因子,基于全年降雨—径流数据反推 CN 值,比较绿化屋顶与其他地表覆盖类型的径流削减效果,并为大尺度(流域或集水区)屋顶绿化水文效应分析提供关键输入参数。

1 材料与方法

1.1 实验场地

南京气候四季分明,夏热冬冷,年最高气温 39.7 °C,最低气温 -13.1 °C,由于地处亚热带季风气候区,降水丰富但不均匀,年平均降雨量约 1200 mm,但 70.6% 的降雨量集中在 5—9 月汛期^[28],期间台风暴雨频发,城区

积水内涝严重,给城市生产生活造成诸多不利影响,亟需有效的雨洪管理措施。本研究实验场地位于南京市栖霞区紫东国际创意园,园区以商业办公建筑为主,大部分建筑屋顶已实施绿化,总面积达 3.6 hm²。选择简易型(B3)和花园型(F4)两个绿化屋顶开展观测实验(图 1),两个绿化屋顶与建筑同步规划建设,确保屋顶荷载满足绿化要求。B3 土壤基质浅,种植南方地区屋顶绿化最常见的佛甲草;F4 土壤基质厚,能支撑小乔木、灌木和草本多层植被结构,生物量丰富(表 1)。两个绿化屋顶自下而上包括原有建筑屋面、防水层、防根层、蓄排水层、过滤层、基质层及植被层(图 2)。



图 1 两个绿化屋顶实验场地基本情况

Fig.1 Site characteristics of the two experimental green roofs

实验观测时间为 2016 年 12 月 8 日至 2017 年 12 月 7 日,期间两个屋顶植物生长状态良好,覆盖度接近 100%。首先在 B3 屋顶上设置自动气象站观测太阳辐射、雨量、风速风向、温湿度,提供两个实验场地的背景气象信息;其次,测量 B3 和 F4 的土壤湿度,作为土壤蒸发与蓄水量的计算依据。

表 1 两个绿化屋顶实验场地的植被土壤特征

Table 1 Plants and soil characteristics of the two experimental green roofs

屋顶类型 Roof type	屋面面积 Area/m ²	土壤厚度 Soil depth/mm	土壤成分 Soil composition	植物品种 Plant species
简易型(B3) Extensive	1420	50	园土、泥炭土、珍珠岩、陶粒、蛭石按 3:3:2:1:1	大面积佛甲草(<i>Sedum lineare</i> Thunb)
花园型(F4) Intensive	1936	350	配制	高干女贞(<i>Ligustrum lucidum</i> Aiton)、桂花(<i>Osmanthus fragrans</i>)、红枫(<i>Acer palmatum</i> 'Atropurpureum')、茶花(<i>Camellia japonica</i>)、紫叶李(<i>Prunus cerasifera</i>)、果石榴(<i>Punica granatum</i>)、樱花(<i>Prunus serrulata</i>)、琵琶(<i>Hygrophila corymbosa</i>)、红花继木球(<i>Loropetalum chinense</i>)、红叶石楠球(<i>Photinia serrulata</i>)、金森女贞球(<i>Ligustrum japonicum</i> Thunb)、毛鹃(<i>Rhododendron pulchrum</i>)、天人菊(<i>Gaillardia pulchella</i>)、丛生福禄考(<i>Phlox subulata</i>)、云南黄馨(<i>Jasminum mesnyi</i> Hance)、细叶麦冬(<i>Ophiopogon japonicus</i>)与红花石蒜(<i>Lycoris radiata</i>)混植

自动气象站和其他传感器设备均放置在屋顶中心区以减少边缘效应,传感器的读数间隔统一设定为 15 min。图 2 为两个绿化屋顶纵向结构、测量环境因子的设备名称及型号。

1.2 径流量估算方法

根据屋顶水量平衡方程,径流量等于降雨总量扣除植被、土壤、排水层截留雨水量及土壤水分蒸发量,计

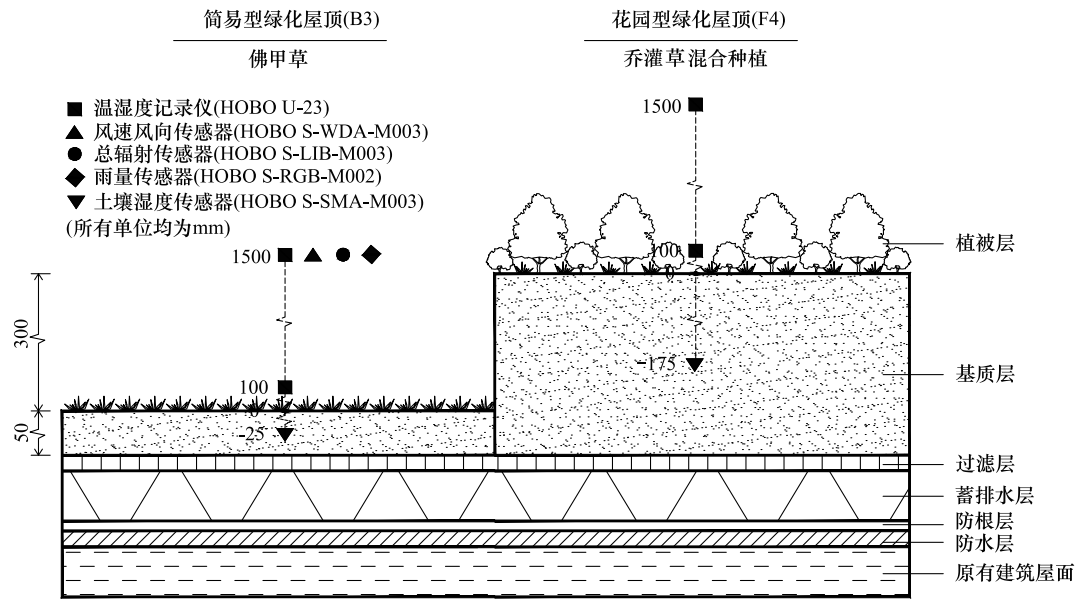


图2 实验场地绿化屋顶纵向结构及观测仪器位置

Fig.2 Vertical structure and sensor position of the two experimental green roofs

算公式如下:

$$Q = R - V - S_1 - E - S_2 \quad (1)$$

式中, Q 为一次降雨事件的径流量(mm), R 为降雨量(mm), V 为植被截留量(mm), S_1 为土壤截留量(mm), E 为土壤蒸发量(mm), S_2 为排水层结构截留量(mm)。

R 通过翻斗式雨量仪测量,其余参数通过经验公式(2)——(6)估算,其中植被截留公式为^[29]:

$$V = \begin{cases} R, (R \leq V^*) \\ a \cdot Veg \cdot LAI, (R > V^*) \end{cases} \quad (2)$$

式中, a 为叶面上平均最大持水深度(mm),取值为 0.2; Veg 为植被盖度,本研究两场地已实施屋顶绿化 4 年以上,植被覆盖度高,故取值为 1; LAI 为叶面积指数,根据两个屋顶植被类型及前人测量的经验值范围,确定简易型绿化屋顶 LAI 值为 2.5^[30],花园型为 4.0^[31-32]。

土壤截留量通过式(3)计算:

$$S_1 = \Delta W_1 \cdot H \quad (3)$$

式中, ΔW_1 为每次降雨结束后土壤湿度增加值(m^3/m^3), H 为土壤厚度(mm)。

蒸发量估算方法为:根据非降雨天土壤湿度日变化值,估算全年土壤日蒸发量,并统计春、夏、秋、冬四个季节平均每小时蒸发量,再根据降雨发生的季节及历时推算土壤蒸发量,计算公式如下:

$$E = \overline{E_1} / 24 \cdot T \quad (4)$$

$$E_1 = \Delta W_2 \cdot H \quad (5)$$

式中, E 为一次降雨事件中绿化屋顶的蒸发量(mm), E_1 为非降雨天的日蒸发量(mm), ΔW_2 为非降雨天每天土壤湿度减少量(m^3/m^3), H 为土壤厚度(mm), T 为降雨历时(h)。

结构截留主要考虑绿化屋顶排水层窝状结构蓄水量,根据单个窝状的体积及分布密度,推算其最大蓄水量为 4.3 L/ m^2 ,换算成深度为 4.3 mm^[7]。当降雨量全部被植被和土壤截留时($R < V + S_1$),结构截留量为 0 mm;当降雨量超过植被截留与土壤截留最大值时,结构截留开始发挥作用;随着降雨量不断增加,结构截留达到最大值 4.3 mm 后将不再变化,计算公式如下:

$$S_2 = \begin{cases} 0, (R \leq V + S_1) \\ R - V - S_1, (V + S_1 < R < V + S_1 + 4.3) \\ 4.3, (R \geq V + S_1 + 4.3) \end{cases} \quad (6)$$

本研究选择暴雨、大雨、中雨和小雨共四种典型降雨分析绿化屋顶的雨水截留效应,一次降雨事件的雨量 >50 mm 为暴雨,25—49.9 mm 为大雨,10—24.9 mm 为中雨,雨量 <10 mm 为小雨^[33]。一次降雨事件定义为连续性的、降雨停止时间间隔不超过 6 h 的降雨。

1.3 CN 值估算方法

SCS-CN 模型中 CN 值与降雨量(R)、径流量(Q)的关系如下:

$$Q = \begin{cases} \frac{(R - 0.2S)^2}{R + 0.8S}, (R > 0.2S) \\ 0, (R \leq 0.2S) \end{cases} \quad (7)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (8)$$

式中, S 为潜在最大蓄水能力(mm),本研究根据全年 77 次降雨事件的降雨量和径流量反推 S 值和 CN 值,再取算术平均值得到绿化屋顶的 CN 值^[34-37]。

2 结果与分析

2.1 全年降雨事件统计

表 2 显示,实验场地全年共降雨 77 次,总降雨量为 1307 mm。其中,小雨 49 次,降雨频次最高且历时最长(326.5 h),降雨总量为 188.6 mm,占全年降雨总量的 14.4%;暴雨次数最少但历时短、雨量大,6 次暴雨事件历时 124 h,降雨量达 674.8 mm,占全年降雨总量的 51.6%;大雨和中雨降雨次数分别为 6 次和 16 次,降雨量占比分别为 13.4%和 20.6%。

降雨季节分布规律显著:春季降雨次数最多,共 23 次,以小雨和中雨为主,无暴雨事件,降雨总量为 207.8 mm;夏、秋两季降雨次数均为 21 次,是暴雨的主要发生季节,其中夏季降雨总量最大,达 557.4 mm,秋季次之,为 389.2 mm;冬季降雨次数及总量均最少,12 次降雨的总雨量为 152.6 mm。

表 2 降雨事件的季节分布特征

Table 2 Seasonal variations of rainfall characteristics over a year circle

雨型 Rainfall type	参数 Parameters	春 3—5 月 Spring	夏 6—8 月 Summer	秋 9—11 月 Autumn	冬 12—2 月 Winter	总计 Total
暴雨 Torrential rainfall	降雨次数/次	0	3	3	0	6
	降雨历时/h	0	71	53	0	124
	降雨总量/mm	0	402.4	272.4	0	674.8
大雨 Heavy rainfall	降雨次数/次	2	2	0	2	6
	降雨历时/h	15	29.75	0	47.5	92.25
	降雨总量/mm	62.6	52.8	0	59.4	174.8
中雨 Medium rainfall	降雨次数/次	5	3	4	4	16
	降雨历时/h	58	16.75	97	86.25	258
	降雨总量/mm	82.2	49.2	66	71.4	268.8
小雨 Light rainfall	降雨次数/次	16	13	14	6	49
	降雨历时/h	97.25	85.5	87.75	56	326.5
	降雨总量/mm	63	53	50.8	21.8	188.6

2.2 径流削减效应

2.2.1 全年总况

简易型绿化屋顶全年通过蒸发及植被、土壤、结构截留的降雨量分别为 42.6、38.4、282.8、184.7 mm,径流

量为 758.5 mm,径流削减率为 42%;花园型绿化屋顶全年通过蒸发及植被、土壤、结构截留的降雨量分别为 82.8、61.2、491.2、157.8 mm,径流量为 514 mm,径流削减率为 60.7%(表 3)。以上数据表明,土壤基质层对雨水的吸收与储存在绿化屋顶径流削减效应中发挥主导作用;此外,花园型绿化屋顶由于植被结构复杂、土壤基质深厚,因而在蒸发、截留雨水方面与简易型相比表现出明显的优势。

表 3 两个绿化屋顶雨水截留量、径流量及蒸发量的季节分布规律

参数 Parameters	简易型 Extensive green roof(B3)					花园型 Intensive green roof(F4)				
	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	总计 Total	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	总计 Total
E/mm	12.1	14.8	11.3	4.4	42.6	21.6	29.9	20.6	10.7	82.8
V/mm	11.5	10.4	10.5	6.0	38.4	18.4	16.4	16.8	9.6	61.2
S ₁ /mm	86.6	106.3	58.2	31.7	282.8	120.8	167.4	117.3	85.7	491.2
S ₂ /mm	53.2	51.9	49.2	30.4	184.7	42.8	54.3	38.0	22.7	157.8
Q/mm	44.4	374.0	260.0	80.1	758.5	4.2	289.4	196.5	23.9	514.0
径流削减率 Reduction rate/%	78.6	32.9	33.2	47.5	42.0	98.0	48.1	49.5	84.3	60.7

E:蒸发量,Evaporation;V:植被截留量,Plant interception;S₁:土壤截留量,Soil retention;S₂:排水层结构截留量,Structural retention;Q:径流量,Runoff

2.2.2 季节变化规律

绿化屋顶在春、冬两季的径流削减效应明显优于夏秋两季:简易型绿化屋顶春、夏、秋、冬四季的径流削减率分别为 78.6%、32.9%、33.2%、47.5%,花园型屋顶分别为 98%、48.1%、49.5%、84.3%。春、冬两季以小雨和中雨为主,降雨总量小、强度弱、历时长,雨水缓慢进入场地,被植被与土壤截留后不断蒸发到空气中,通过径流排出的雨量较小;而夏秋两季暴雨事件频发,绿化屋顶在短时间内蓄积大量雨水,使得植被、土壤、结构层蓄水很快达到饱和,多余的水分从场地排出,因而径流削减率较低。

土壤截留在四季均发挥主导作用(图 3),B3 土壤截留占降雨量的 15—42%,F4 土壤截留占比为 30—58%,最大值发生在春季,最小值在夏季或秋季;结构截留占比仅次于土壤截留,在 B3 和 F4 场地分别占 9—26%和 10—21%,表明简易型绿化屋顶的排水结构层发挥的作用比花园型更大;土壤蒸发量占降雨量比重略高于植被截留量,前者在两个场地的占比分别为 3—6%和 5—10%,后者占比分别为 2—6%和 3—9%。

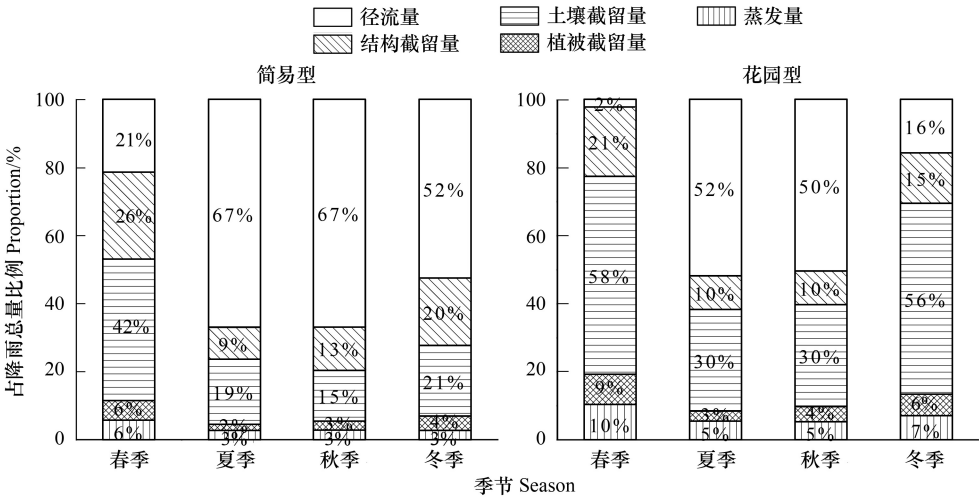


图 3 绿化屋顶水量平衡的季节变化规律

Fig.3 Seasonal differences in composition of rainwater retention, evaporation and runoff

2.2.3 随雨型变化规律

径流削减率随降雨量增加呈递减趋势,简易型绿化屋顶全年对暴、大、中、小雨的径流削减率分别为 14.6%、38%、73.1%、99.1%,花园型屋顶分别为 30.6%、91.4%、90.1%、97.8%。花园型屋顶的径流削减优势在中雨、大雨和暴雨条件下表现突出;小雨时,由于两类绿化屋顶几乎可以截留全部降雨,差距较小。

径流削减各部分占比也随降雨量大小而发生变化(图 4),其中土壤截留在大部分降雨条件下占主导作用,B3 土壤截留在中雨时占比最高(43%),暴雨时最小(9%);F4 土壤截留在大雨时占比最高(72%),小雨时最小(19%)。植被截留与土壤蒸发量随雨量增加而减少,小雨时 B3 场地两者分别占降雨总量的 13%和 10%,F4 场地分别占 21%和 19%,暴雨时两场地植被截留和土壤蒸发量均降到 5%以下。结构截留随雨量增大而减小,在小雨时占比甚至高于土壤截留量,B3 和 F4 达到了 39%,暴雨时降到 4%。

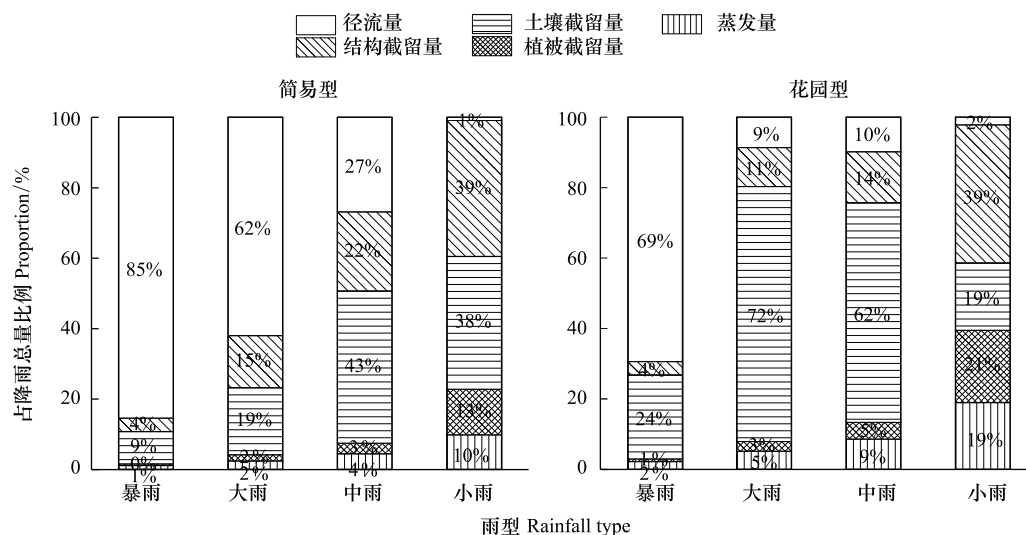


图 4 绿化屋顶水量平衡随雨型变化规律

Fig.4 Composition of rainwater retention, evaporation and runoff for different rainfall types

2.3 径流削减率与环境气象因子的相关性分析

采用 Pearson 相关分析研究径流削减率与初始土壤湿度、降雨量、降雨强度、大气温度、相对湿度、风速及太阳辐射等环境气象因子之间的关系(表 4)。

表 4 径流削减率与环境气象因子之间的相关性分析

Table 4 Correlations between runoff reduction rates and background environmental-climatic factors

输入参数 Input parameters	简易型 Extensive green roof		花园型 Intensive green roof	
	相关性 Correlation	显著水平 Significance	相关性 Correlation	显著水平 Significance
初始土壤湿度 Initial soil moisture/%	-0.226 *	0.048	-0.208	0.069
降雨量 Precipitation/mm	-0.765 **	0.000	-0.840 **	0.000
降雨强度 Rainfall intensity/(mm/h)	-0.427 **	0.000	-0.459 **	0.000
大气温度 Air temperature/℃	-0.019	0.870	-0.138	0.230
相对湿度 Relative humidity/%	-0.454 **	0.000	-0.335 **	0.003
风速 Wind speed/(m/s)	0.142	0.218	0.105	0.364
太阳辐射 Solar radiation/(W/m ²)	0.170	0.139	0.099	0.391

** 表示显著水平 $P \leq 0.01$, * 表示显著水平 $0.01 < P \leq 0.05$

绿化屋顶径流削减率与降雨量、降雨强度及相对湿度呈显著负相关关系($P < 0.01$),植被与土壤对径流的削减是有限的,降雨量超过阈值时,多余雨水全部以径流形式排出,因而雨量越大,径流削减率越低;降雨强

度越大,短期内进入植被土壤的雨水量越多,重力作用导致大量雨水迅速排出,整体径流削减率越小。初始土壤湿度与径流削减率在简易型绿化屋顶存在显著负相关,而与花园型屋顶的相关性不显著,可能的原因为,简易型屋顶土壤深度仅为 50 mm,前期土壤湿度对其蓄水能力有决定作用,而花园型屋顶土壤厚度达 350 mm,前期土壤湿度对截蓄雨水能力影响有限。大气温度、太阳辐射和风速等微气候因子虽影响土壤与植被的蒸发蒸腾速率,但因蒸发量占比较小,因而这些因子与整体径流削减率之间的相关性不显著。

2.4 CN 值估算

图 5 显示,简易型绿化屋顶 CN 值的变化范围是 75—99,平均值为 92,其中最小值 75 出现在夏季的中雨事件($R=16.8\text{ mm}$),最大值 99 出现在夏季的小雨事件($R=0.4\text{ mm}$);花园型屋顶 CN 值的范围是 59—99,平均值为 88,且 CN 值在暴雨和大雨条件下均低于简易型屋顶,径流削减优势突出,而在小雨和中雨事件中可能高于后者,优势不明显。尽管两个绿化屋顶在小雨时径流量很低,但计算得到的 CN 值往往高于平均值,说明 SCS-CN 模型在小雨条件下的径流计算误差相对较大,Fassman-Beck^[38]建议在降雨量高于 2 mm 的条件下使用 SCS-CN 估算绿化屋顶径流削减效应较为适宜,与本研究结论具有一致性。

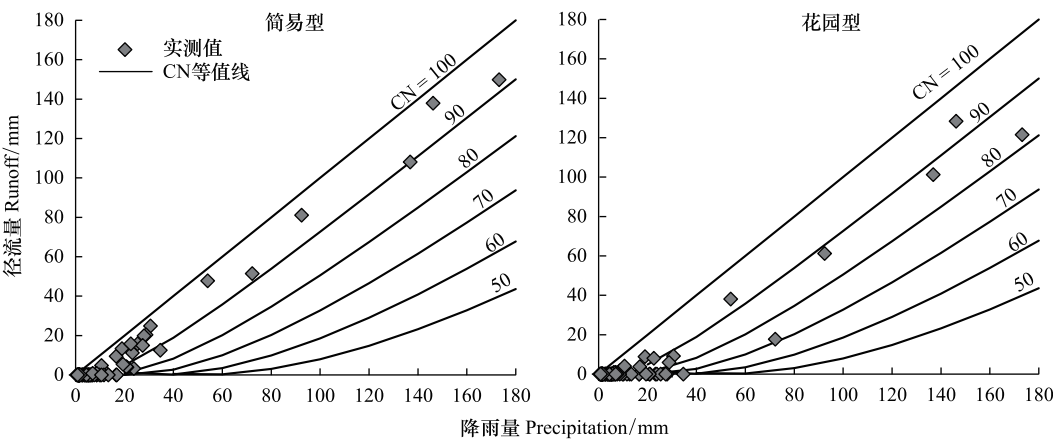


图 5 全年降雨事件的降雨量-径流量数据及 CN 等值线分布

Fig.5 Paired rainfall-runoff data and associated CN values for the 77 rainfall events

国外多名学者对简易型绿化屋顶的 CN 值做过估算,基于不同气候区与植被土壤特征的计算结果显示,绿化屋顶的 CN 值介于 80—96 之间(表 5),本研究计算结果也落在此区间之内。国内学者采用 SCS-CN 模型估算了不同土地覆盖类型的 CN 值,如李常斌等^[35]、史培军等^[21]、鲁华锋^[27]估算草坪的 CN 值或区间分别为

表 5 国外有关绿化屋顶 CN 值的研究文献及结论

Table 5 Previous evaluations of green-roof CN values in foreign countries

研究区(气候) Location (climate)	降雨事件 Rainfall event	绿化植被 Plant	面积 Area/m ²	基质厚度 Soil depth/mm	坡度 Slope/%	CN 值 CN
密西根州立大学 (温带大陆性气候) ^[6]	全年 62 次降雨	景天属	5.5	60	2、7、15、25	84—90
美国佐治亚大学 (亚热带湿润气候) ^[13]	1 年 31 次降雨	6 种景天属	43	76.2	< 2	86
希腊雅典 (地中海气候) ^[17]	全年 45 次降雨	景天属、牛至属、羊茅属	2	80、160	8.7	88—95.5
纽约市 (温带大陆性气候) ^[22]	24 个月的降雨径流观测 数据	景天属 景天属与其他开花植物	310 390	32 100	—	94 92
不同气候区 21 个 城市 ^[38]	1475 次暴雨	—	3—6968	50—200	2—8	80—96

73.6、36—80 和 39—89,均小于本研究简易型绿化屋顶的 CN 值;鲁华锋^[27]同时估算出乔灌草混合种植区的 CN 值范围为 32—86,也低于本研究花园型绿化屋顶的 CN 值。与地面绿化形式相比,绿化屋顶土壤基质较浅,且下层与建筑相连,水文过程有较大区别,CN 值计算结果表明,在植被结构相同的条件下,绿化屋顶的径流削减效应显著低于地面绿地。

3 结论与讨论

本研究基于野外观测数据与水量平衡方程估算径流量,分析两个典型绿化屋顶的径流削减效应及其与环境气象因子之间的相关关系,并采用降雨量-径流量数据反推绿化屋面的 CN 值。与以往基于少数降雨事件的研究相比,全年观测数据能够消除季节、雨型、前期土壤湿度等因素造成的径流削减率估算的不确定性,反映绿化屋顶长期滞蓄效果。

研究结果表明,简易型、花园型绿化屋顶的全年径流削减率分别为 42% 和 60.7%,CN 值分别为 92 和 88,与具有相同植被属性的地面绿地相比,绿化屋顶的 CN 值偏高,径流削减效益偏低。然而,对于用地紧凑的城市中心区来说,增加地面绿化较为困难,考虑到传统不透水屋面(CN=98)占城市地表面积之大,屋顶绿化不失为缓解城市暴雨内涝的一项重要策略。以南京为例,其主城区总面积为 636 km²,建筑密度约 15%^[39],若 60% 的屋面实施绿化,按公式(7)和(8)推导,简易型和花园型两种情景可减少全年暴雨径流总量 2.8×10^7 m³ 和 4.2×10^7 m³,分别相当于 5.6 和 8.4 个玄武湖的库容量,效果非常可观。

在径流削减效应中,土壤基质层对雨水截留起主导作用,简易型和花园型绿化屋顶土壤截留量分别占径流削减总量的 52% 和 62%,表明以雨洪管理为导向的屋顶绿化实践过程中,需重点关注土壤因素,如厚度、成分及质地等。本研究实验场地的土壤基质成分包括园土、泥炭土、珍珠岩、陶粒、蛭石,属沙壤土类型,为本地易得的轻质材料,饱和水分含量下密度约 1000 kg/m³,简易型(50 mm)和花园型(350 mm)绿化屋顶所需荷载分别为 50 kg/m² 和 350 kg/m²,因此,大部分现有建筑(荷载量>100 kg/m²)能满足简易型绿化的荷载要求,新建建筑通过加固措施可达到花园型绿化荷载要求。未来研究可重点分析不同土壤配置类型的孔隙度、下渗率、饱和水分含量、田间持水量(Field capacity)等参数,并结合不同水分含量下的荷载要求,选择既能减轻建筑结构负担,又能最大程度发挥径流削减效益的土壤基质形式。

需要注意的是,本研究中“土壤蒸发量”一项只包括降雨过程中蒸发到空气中的水分,雨过天晴后的土壤蒸发量已包含在“土壤截留量”一项中,因此没有单独计算。土壤蒸发量与季节及背景气候条件有关,它决定了一次暴雨后土壤从水分饱和状态降到植被凋萎点(Wilting point)之间的时间长度,对制定合理的灌溉方案、确保植物健康生长具有重要指导意义;此外,土壤蒸发量也与绿化屋顶的节能与微气候调节效应密切相关。因此,未来研究可对土壤蒸发量参数做进一步探讨,为屋顶绿化可持续设计与管理提供参考。

亚热带季风区夏热冬冷,降雨丰富但分布不均,由于径流削减效应与雨量、雨强、初始土壤湿度等因素密切相关,也存在明显的季节分布规律,因此本文研究结论不一定完全适用于其他气候区;研究选取的简易型和花园型绿化屋顶虽具代表性,但结果仍然只能反映特定植被土壤条件下的屋面水文平衡过程。未来研究可借助发展较为成熟的水文模型(如 SWMM 等),开展多尺度、多情景模拟,深入剖析不同气候区降水条件下,植被土壤构成各异的屋顶绿化模式对城市水文过程的影响。

致谢:感谢刘连英、王永旗、曹绪峰与汪文对本研究野外观测部分提供的帮助。

参考文献(References):

- [1] 刘明欣,代色平,周天阳,阮琳,张乔松. 湿热地区简单式屋顶绿化的截流雨水效应. 应用生态学报, 2017, 28(2): 620-626.
- [2] 王书敏,李兴扬,张峻华,于慧,郝有志,杨婉奕. 城市区域绿色屋顶普及对水量水质的影响. 应用生态学报, 2014, 25(7): 2026-2032.
- [3] Schultz I, Sailor D J, Starry O. Effects of substrate depth and precipitation characteristics on stormwater retention by two green roofs in Portland OR. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2018, 18: 110-118.
- [4] Speak A F, Rothwell J J, Lindley S J, Smith C L. Rainwater runoff retention on an aged intensive green roof. Science of the Total Environment,

- 2013, 461-462; 28-38.
- [5] Zhang Q Q, Miao L P, Wang X K, Liu D D, Zhu L, Zhou B, Sun J C, Liu J T. The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 144: 142-150.
- [6] Getter K L, Rowe D B, Andresen J A. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering*, 2007, 31(4): 225-231.
- [7] 彭立华, 杨小山, 钱静, 朱春磊, 姚灵烨, 姜之点. 城市绿化屋顶的微气候调节与径流削减效应研究. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(10): 1658-1667.
- [8] 龚克娜, 王江海, 赵新华. 不同绿化屋面对雨水调蓄能力的影响. *水土保持通报*, 2015, 35(1): 356-360.
- [9] 孙挺, 倪广恒, 唐莉华, 张书函, 孔刚. 绿化屋顶雨水滞蓄能力试验研究. *水力发电学报*, 2012, 31(3): 44-48.
- [10] Alfredo K, Montalto F, Goldstein A. Observed and modeled performances of prototype green roof test plots subjected to simulated low- and high-intensity precipitations in a laboratory experiment. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2010, 15(6): 444-457.
- [11] 唐莉华, 倪广恒, 刘茂峰, 孙挺. 绿化屋顶的产流规律及雨水滞蓄效果模拟研究. *水文*, 2011, 31(4): 18-22.
- [12] 王书敏, 何强, 孙兴福, 王振涛. 两种植被屋面降雨期间调峰控污效能分析. *重庆大学学报*, 2012, 35(5): 137-142.
- [13] Carter T L, Rasmussen T C. Hydrologic behavior of vegetated roofs. *Journal of the American Water Resources Association*, 2006, 42(5): 1261-1274.
- [14] 叶建军, 魏裕基, 肖衡林, 徐维生, 李恒威. 初绿化屋顶对雨水截留作用研究. *给水排水*, 2014, 40(5): 139-143.
- [15] Ercolani G, Chiaradia E A, Gandolfi C, Castelli F, Masseroni D. Evaluating performances of green roofs for stormwater runoff mitigation in a high flood risk urban catchment. *Journal of Hydrology*, 2018, 566: 830-845.
- [16] Loiola C, Mary W, da Silva L P. Hydrological performance of modular-tray green roof systems for increasing the resilience of mega-cities to climate change. *Journal of Hydrology*, 2018, doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.01.004.
- [17] Soulis K X, Ntoulas N, Nektarios P A, Kargas G. Runoff reduction from extensive green roofs having different substrate depth and plant cover. *Ecological Engineering*, 2017, 102: 80-89.
- [18] Wong G K L, Jim C Y. Identifying keystone meteorological factors of green-roof stormwater retention to inform design and planning. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 143: 173-182.
- [19] 魏艳萍, 文仕知, 谭一凡, 史正军. 重型与轻型屋顶绿化对屋面径流的影响. *河北林业科技*, 2011, (3): 1-2, 8-8.
- [20] 王江海, 张新波, 赵新华. 绿化屋面的水文水质特征分析. *水土保持通报*, 2014, 34(3): 223-226.
- [21] 史培军, 袁艺, 陈晋. 深圳市土地利用变化对流域径流的影响. *生态学报*, 2001, 21(7): 1041-1049.
- [22] Carson T, Keeley M, Marasco D E, McGillis W, Culligan P. Assessing methods for predicting green roof rainfall capture: a comparison between full-scale observations and four hydrologic models. *Urban Water Journal*, 2015, 14(6): 589-603.
- [23] Roehr D, Kong Y W. Runoff reduction effects of green roofs in Vancouver, BC, Kelowna, BC, and Shanghai, P.R. China. *Canadian Water Resources Journal*, 2010, 35(1): 53-68.
- [24] 王瑾杰, 丁建丽, 张喆, 邓凯, 陈文倩, 张成. 奎屯河流域春季融雪期 SCS-CN 模型参数取值方法. *生态学报*, 2017, 37(13): 4456-4465.
- [25] 李伯骥, 常顺利, 张毓涛. SCS 模型中 CN 值的优化率定方法——以天山北坡云杉森林为例. *中国农村水利水电*, 2018, (8): 72-76.
- [26] 魏文秋, 谢淑琴. 遥感资料在 SCS 模型产流计算中的应用. *环境遥感*, 1992, 7(4): 243-250.
- [27] 鲁华锋. SWMM 模型中 SCS-CN 选取在安徽省的适用性研究. *中国农村水利水电*, 2014, (9): 87-89.
- [28] 肖同亮, 李加乐, 徐亮, 宗兰. 基于城市内涝的南京海绵城市建设途径研究. *江苏建材*, 2018, (1): 50-54.
- [29] 仪垂祥, 刘开瑜, 周涛. 植被截留降水量公式的建立. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1996, 2(2): 47-49.
- [30] 仇栾知子. 西安地区种植屋面的建筑节能效应研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- [31] 汪成忠. 上海八种园林树木生态功能比较研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009.
- [32] 董延梅. 杭州花港观鱼公园 57 种园林树木固碳效益测算及应用研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2013.
- [33] 郑美芳, 邓云, 刘瑞芬, 米家杉, 罗先满. 绿色屋顶屋面径流水量水质影响实验研究. *浙江大学学报: 工学版*, 2013, 47(10): 1846-1851.
- [34] 符素华, 王向亮, 王红叶, 魏欣, 袁爱萍. SCS-CN 径流模型中 CN 值确定方法研究. *干旱区地理*, 2012, 35(3): 415-421.
- [35] 李常斌, 秦将为, 李金标. 计算 CN 值及其在黄土高原典型流域降雨-径流模拟中的应用. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(8): 67-70.
- [36] Hawkins R H. Asymptotic determination of runoff curve numbers from data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1993, 119(2): 334-345.
- [37] Bonta J V. Determination of watershed curve number using derived distributions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1997, 123(1): 28-36.
- [38] Fassman-Beck E, Hunt W, Berghage R, Carpenter D, Kurtz T, Stovin V, Wadzuk B. Curve number and runoff coefficients for extensive living roofs. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2016, 21(3): 04015073.
- [39] 郑辉, 曾燕, 王勇, 申双和, 邱新法. 基于 VIIRS 夜间灯光数据的城市建筑密度估算——以南京主城区为例. *科学技术与工程*, 2014, 14(18): 68-75.