【专题：海绵城市 / Sponge City】

特邀专题策划：刘建，任心欣

深圳绿色屋顶雨水滞留效应变化及其影响因素

胡尹超，秦华鹏，林子璇

北京大学深圳研究生院环境与能源学院，城市人居环境科学与技术重点实验室，广东深圳 518055

摘要：绿色屋顶可滞留雨水削减径流，已被广泛应用于城市雨水管理。绿色屋顶雨水滞留效应会随降雨场次及月份降雨条件的变化而波动。基于中国深圳市洋竹草、太阳花、卧地延命草和佛甲草4种不同植被绿色屋顶18个月共58场降雨的连续水文监测和植物覆盖度监测，分析了绿色屋顶雨水滞留效应的波动规律及其影响因素，结果表明，绿色屋顶对场次降雨的雨水滞留量为0.4~37 mm，雨水滞留率为2%~100%；绿色屋顶月雨水滞留量为13~148 mm，月雨水滞留率为29%~70%；绿色屋顶全年总雨水滞留量为610~660 mm，雨水滞留率为44%~49%。雨水滞留率和雨水滞留量与降雨量分别呈显著负相关和正相关，二者都与雨前日间干旱时间呈显著正相关；此外月均太阳辐射和植被类型及其覆盖度变化也对月份间雨水滞留效应有较大影响。不同植物由于其滞水能力、蒸散发能力和植被生理活性等的不同，在不同月份表现出不同的雨水滞留能力。研究结果可为绿色屋顶的性能评估和推广应用提供科学指导。

关键词：水环境科学；径流；绿色屋顶；雨水滞留效应；效应波动；降雨量；雨前日间干旱时间；植物类型；植物覆盖度

中图分类号：TV121

文献标志码：A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2020.04347

Variation and influencing factors of rainwater retention of green roofs in Shenzhen

HU Yinchao, QIN Huapeng, and Lin Zixuan

School of Environment and Energy, Shenzhen Graduate School of Peking University, Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, Shenzhen 518055, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: Green roof can reduce runoff by its rainwater retention ability and has been widely used in storm water management. The rainwater retention performance of green roof fluctuates with the variation of rainfall frequency and monthly rainfall conditions. In this study, we conduct a continuous monitoring of 58 rainfall events over 18 months on four different vegetation green roofs in Shenzhen, China. We analyze the variation of the rainwater retention effect of green roofs and the influencing factors. The results show that, the rainwater retention depth of green roof for single rainfall event is between 0.4 mm and 37 mm, the rainwater retention rate is in the range of 2% to 100%; the monthly rainwater retention depth is 13-148 mm and its retention rate is 29%-70%; the annual total rainwater retention depth of green roof is 610-660 mm and the total retention rate is 44%-49%. The rainwater retention rate and the retention amount are negatively and positively correlated with rainfall depth respectively, and both are

Received: 2020-04-28; **Accepted:** 2020-05-14

Foundation: Project of Technology & Innovation Commission of Shenzhen Municipality (ZDSYS20140509094114169); Project of Technology Innovation in Water Resources of Guangdong Province (2012-13)

Corresponding author: Professor QIN Huapeng. E-mail: qinhp@pkusz.edu.cn

Citation: HU Yinchao, QIN Huapeng, Lin Zixuan. Variation and influencing factors of rainwater retention of green roofs in Shenzhen [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(4): 347-354. (in Chinese)

significantly positively correlated with the antecedent dry period in daytime. In addition, monthly average solar radiation, vegetation types and change of plant coverage also have a great influence on the retention effect of rain water between months. Different plants show very different rainwater retention performance in different months due to their differences in evapotranspiration ability and physiological activity of vegetation. Our research can provide scientific guidance for the performance evaluation and application of green roofs.

Key words: water environment science; runoff; green roof; rainwater retention effect; performance variation; rainfall depth; antecedent dry period in daytime (ADP daytime); vegetation types; plant coverage

随着城市化进程的加快和混凝土路面、屋面等不透水面积的增加,雨水自然入渗减少,地表径流增加,导致城市洪水更加频繁.海绵城市建设是中国生态保护的国家战略,绿色屋顶作为海绵城市的重要生态单元,可以在有限的城市空间内增加绿化空间,还能通过滞留雨水,削减径流量,降低径流峰值,已成为城市雨水管理的有效方法.

目前,国内外对绿色屋顶展开了大量的研究,发现绿色屋顶雨水滞留效应波动较大.希腊雅典农业大学的观测实验中发现,绿色屋顶总径流量减少幅度在 2% ~ 100%^[1].基于北京市观测数据,发现在降雨量分别为 <10、30 ~ 80 和 >80 mm 时,绿色屋顶的径流削减率分别等于或接近 100%、低于 70% 及低于 55%^[2].已有研究表明,绿色屋顶雨水滞留效应会随着场次降雨条件改变而发生变化.随着降水量的增加,绿色屋顶的雨水滞留率降低^[3-4];绿色屋顶对降雨量小、历时长、雨峰靠前的降雨雨水滞留率高^[5-6].绿色屋顶的雨水滞留能力还随雨前干旱期 (antecedent dry period, ADP) 延长而增强^[7-9],且 ADP 的影响在小降雨事件中表现的更为明显^[10].还有研究关注绿色屋顶雨水滞留效应的季节性变化,发现在降雨事件密集的时期,雨水滞留效应会下降^[10-11].在北半球温带气候区的夏季,由于太阳辐射较强,蒸散发量大,使场次降雨间绿色屋顶滞留能力得到较好的恢复,从而有更好的滞留效果^[8,12-13].由于不同植物类型的绿色屋顶蒸散发能力不同,雨水滞留效应也有显著差异^[14].文献^[15]研究发现,草坪植物比耐旱的肉质植物有更强的冠层截留能力和蒸散发能力,可显著削减径流量.同种类型的植物也会因不同灌溉方式和季节条件,使其覆盖度、生物量及蒸散发能力发生变化,导致相应的径流削减能力差异^[14,16-17].

综上所述,绿色屋顶的雨水滞留效应会随着不同场次降雨和月份气候特征变化出现复杂波动.目前针对中国华南地区亚热带季风气候区绿色屋顶的

长期连续监测研究较少,且缺少不同植物类型及其长势对绿色屋顶雨水滞留效应波动的影响研究.本研究对中国深圳市洋竹草、太阳花、卧地延命草和佛甲草 4 种不同植被绿色屋顶进行了 18 个月的共 58 场降雨的连续监测,分析了绿色屋顶雨水滞留效应随场次降雨、干湿交替及月份气候变化的波动规律,以及 4 种华南地区常用绿色屋顶植物及其长势对绿色屋顶雨水滞留效应的影响.以期对绿色屋顶的性能评估和推广应用提供科学指导.

1 材料与方法

1.1 实验设计

深圳市属于典型的亚热带季风气候.全年平均气温为 22 ℃,平均降雨量为 1 944 mm.受季风影响,全年 80% ~ 90% 的降雨集中在 4—9 月,因此可根据降雨量将 4—9 月划分为湿雨季,10—次年 3 月划分为干旱季.绿色屋顶实验平台位于北京大学深圳研究生院 E 栋楼顶 (22°35′48.26″N, 113°58′22.70″E).本研究设置 8 个尺寸为 1 m × 1 m 的绿色屋顶实验装置 (图 1),绿色屋顶纵切结构图如图 2,分别是植被层、基质层和蓄水层.

图 1 绿色屋顶实验平台

Fig. 1 (Color online) The platform for green roof experiment

图2 绿色屋顶装置纵切结构示意图

Fig. 2 Structure of the green roof module

由于本研究主要关注不同植物类型和长势对雨水滞留效应波动的影响, 所以从是否耐旱、耐高温和耐淹水等方面, 从华南地区常用绿色屋顶植物中, 通过比较全年植物长势, 筛选季节性变化显著的4种低耗水策略植物作为本研究的设计变量。本研究设置的变量为植被层的4种不同的植物类型(图3), 分别是洋竹草、太阳花、卧地延命草和佛甲草。在绿色屋顶监测平台建成后, 只接受自然降雨, 没有进行额外的灌溉或施肥措施。本研究绿色

屋顶基质层厚度为10 cm, 由50%的泥炭土、30%的珍珠岩和20%的蛭石3种常用绿色屋顶基质材料混合配制而成, 测定得出其有机质含量(质量分数)为280 g/kg, 孔隙度为70%, 田间含水量(水的质量分数)为57%。蓄水层厚度为3 cm, 由厚2 cm的蓄排水板和厚1 cm的陶粒土组成, 可在干旱期为基质和植物生长提供水分。此外蓄水层上方设置排水口用于排放绿色屋顶蓄水能力饱和后产生的径流。

图3 绿色屋顶植被层的4种不同植物

Fig. 3 (Color online) Four different plants on the green roof vegetation layer

1.2 数据采集与分析

气象数据由搭建在绿色屋顶平台旁的小型气象站(USA Davis wireless vantage Pro2 Plus)测得, 包括降雨、太阳辐射、风速和温度等数据, 每10 min测1次。监测实验于2018年8月至2019年12月在绿色屋顶平台上进行。监测期间共录得58次降雨事件(降雨深度超过0.2 mm, 降雨前干旱时间长达6 h)。

径流通过排水口排出, 通过PVC(polyvinyl chloride)管导流至径流收集桶。每场降雨后, 记录雨水桶中的水量体积, 并计算雨水的径流。径流深

度(单位: mm)为单位面积的径流量。雨水滞留量由降雨量减去每个降雨事件的径流量(单位: mm)计得。在现有的58场降雨中, 有25场降雨收集到了径流出流数据。雨水滞留率是由场次降雨的雨水滞留量与降雨量的比值计算得出。反映了绿色屋顶对每场降雨的滞留程度。

ADP反映了场次降雨前的初始条件, 是绿色屋顶连续干湿交替过程中的重要指标。本研究细化考虑了有太阳辐射的雨前日间干旱时间(antecedent dry period in daytime, ADP daytime), 更能反映出干旱期通过蒸散发作用恢复的滞留空间的时间, 因此对

两场降雨间的日间干旱时间进行了统计。

在实验过程中,每周用数字图像分析(digital image analysis, DIA)方法测量 1 次植物覆盖度。植物覆盖度是指植物叶片面积占绿色屋顶装置面积的比例,反映植物的周期性消长,从而反映植物的生理活性。使用拍照设备每周记录 1 次各植被绿色屋顶的长势情况,将图片信息导入分析软件 ENVI(the environment for visualizing images)中进行处理,计算叶片覆盖面积占比作为植被覆盖度。为了最小化阴影的影响,测量在中午(11:00—13:00)进行,且由垂直角度进行。

2 结果与分析

2.1 绿色屋顶雨水滞留效应随场次降雨的变化

对于场次降雨来说,主要变化的因素为场次降雨的降雨量及雨前日间的干旱时间。图 4 是监测期内所有场次降雨的绿色屋顶雨水滞留量,以及雨水滞留率随降雨量和雨前日间干旱时间的分布,以反

映绿色屋顶滞留效应随场次降雨和干湿交替的波动情况。圆点颜色由浅至深代表了雨水滞留率 0 ~ 100% 的数值;圆点大小代表绿色屋顶雨水滞留量大小。

由图 4 可以看出,在监测期间绿色屋顶所有场次降雨的雨水滞留率在 2% ~ 100% 内波动,且随降雨量的增加而减小,随雨前日间干旱时间的缩短而减小。表 1 为雨水滞留效应与降雨量及雨前日间干旱时间的相关分析。由表 1 可知,雨水滞留率与降雨量呈显著负相关,和雨前干旱时间呈显著正相关。在该研究区监测到的 58 场降雨中,其中有 33 场降雨被全部滞留。如图 4 (a) 中红色及蓝色区域的部分,当降雨量小于 14 mm 时,绿色屋顶可将雨水全部滞留。当雨前日间干旱时间大于 68 h,显示出对 25 mm 以下的降雨有 100% 滞留效果。而所有全部滞留的场次降雨中的最大滞留量为 25.2 mm,出现在雨季雨前日间干旱时间为 138 h 的时候。因此随着雨前日间干旱期的延长,可能进一步实现对大于 25.2 mm 降雨的全部滞留。

图 4 不同植物绿色屋顶监测期内所有场次降雨的雨水滞留效应

Fig. 4 (Color online) The rainwater retention performance of all rainfall events during the monitoring period on different vegetation green roofs

表 1 雨水滞留效应与降雨量及雨前日间干旱时间的相关分析

Table 1 Correlation analysis between rainwater retention performance and rainfall and antecedent dry period in daytime

类 别	降雨量/mm				ADP daytime/h			
	洋竹草	太阳花	卧地延命草	佛甲草	洋竹草	太阳花	卧地延命草	佛甲草
雨水滞留量	0.630 ¹⁾	0.721 ¹⁾	0.615 ¹⁾	0.619 ¹⁾	0.420 ¹⁾	0.330 ²⁾	0.350 ¹⁾	0.309 ²⁾
雨水滞留率	-0.792 ¹⁾	-0.794 ¹⁾	-0.785 ¹⁾	-0.793 ¹⁾	0.433 ¹⁾	0.358 ¹⁾	0.370 ¹⁾	0.350 ¹⁾

¹⁾ $P < 0.01$; ²⁾ $P < 0.05$

由图 4 还可发现，绿色屋顶在监测期间所有场次降雨的雨水滞留量在 0.4 ~ 37 mm 内波动。由表 1 可知，雨水滞留量与降雨量和雨前干旱时间都呈显著正相关。整个监测期间最大的雨水滞留量（33 ~ 37 mm）出现在雨前日间干旱时间达到 68 h 且降雨量超过 80 mm 时。在监测期 10 月末还监测到一场雨前日间干旱时间达到 67 h 且降雨量超过 70 mm 的降雨，在不同植被绿色屋顶中滞留量仅为 20 ~ 30 mm，未达到最大滞留量，这是由于 10 月末出现较长的干旱期，太阳花和佛甲草等部分植物开始出现萎蔫现象，滞留能力减弱。比较这两场降雨的不同植物绿色屋顶，洋竹草几乎都达到最大滞留量，而太阳花、卧地延命草和佛甲草绿色屋顶的最大雨水滞留量还会随 ADP 和降雨量的增加呈现增加趋势，因此，若存在雨前日间干旱时间大于 68 h 且降雨量大于 30 mm 的降雨，这 3 种植物的绿色屋顶则可能出现更大（最大）的雨水滞留量。

除去完全滞留的降雨，不同植物展示出不同的雨水滞留能力(图 4)。表 2 为不同植被绿色屋顶在监测期内所有产流降雨下的雨水滞留效应，由表 2 可见，太阳花具有最高的平均雨水滞留量，且通过统计分析显示其显著大于洋竹草和佛甲草 ($P < 0.05$)。卧地延命草的雨水滞留能力也较高，介于太阳花和洋竹草之间。而洋竹草和佛甲草具有相似的雨水滞留能力，显著低于太阳花 ($P < 0.05$)。不同植物绿色屋顶雨水滞留效应的变化是由于不同植物类型的根系滞水和植物蒸腾作用有差异，以及植被覆盖率随着时间变化导致的。由于太阳花为直根系且根系粗壮，滞水能力优于其他 3 种须根系植物。卧地延命草因有较高的蒸腾能力，可在干旱期快速恢复绿色屋顶中雨水滞留空间。洋竹草则因为可以在全年都保持较高的覆盖度，其雨水滞留效应较稳定。佛甲草由于一直保持较弱的生长态势且没有粗壮发达的根系和较高的蒸腾能力，在本研究中雨水滞留效应较弱。

表 2 不同植被绿色屋顶在监测期内所有产流降雨下的雨水滞留效应

Table 2 The rainwater retention performance on different vegetation green roofs under all rainfall runoff during the monitoring period

植物种类	产流场次降雨的 雨水滞留量均值/mm	均值方差
洋竹草	12.32	8.44
太阳花	13.39	7.71
卧地延命草	12.47	7.79
佛甲草	12.22	7.57

2.2 绿色屋顶雨水滞留效应的月变化

研究监测期为 2018 年 8 月至 2019 年 11 月，期间各月绿色屋顶的雨水滞留效应显示出显著的月份差异。图 5 (a)展示了绿色屋顶在监测期间各月份的雨水滞留量曲线（其中 12 月份未监测到降雨，缺失 1 月份的监测数据）。从图 5 (a)可知，绿色屋顶的月雨水滞留量在 13 ~ 148 mm 波动；2—7 月，雨水滞留量逐渐升高，并在 7 月达到峰值，随后下降，至 11 月雨水滞留量最小。图 5 (b)为监测期间绿色屋顶在各月份雨水滞留率的曲线。从图 5 (b)可知，绿色屋顶的月雨水滞留率在 29% ~ 70% 波动；其中，2、7—10 月的月雨水滞留率较高，2 月最高为 60% ~ 70%，8 月略有下降，为 45%；而在 3、4、5、6 和 11 月份的月雨水滞留率较低，11 月份最低为 29%。

为进一步分析绿色屋顶雨水滞留效应随月变化的原因，考虑各月份的天气条件的变化对雨水滞留效应的影响，对月降雨量、平均雨前日间干旱时间 (ADP daytime)、平均太阳辐射、平均温度和平均风速同月雨水滞留量和月雨水滞留率做相关分析。由于 4 种植被屋顶的相关性相似，选取洋竹草屋顶的相关系数绘制表 3。由表 3 可知，月雨水滞留量和月降雨量 ($P < 0.01$) 和平均太阳辐射 ($P < 0.05$) 呈显著正相关。图 5 (a)反映了各月雨

水滞留量与月降雨量、月均太阳辐射及月均雨前日间干旱时间的关系. 降雨量越大, 越有机会达到绿色屋顶的最大雨水滞留能力, 从而增加雨水滞留量; 而更强的太阳辐射加快了绿色屋顶在干旱期间滞留空间的恢复, 为下一场雨提供更大的滞水空间, 从而增加雨水滞留量. 由于雨水滞留率的月变化规律较为复杂, 主要与月平均太阳辐射呈正相关, 但仍受到月降雨量及平均雨前干旱时间的影响. 如图 5 (b), 2 月的雨水滞留率较高, 主要是

由于月降雨量最小; 而 7—10 月的雨水滞留率较高, 主要是由于较高的太阳辐射能使绿色屋顶的雨水滞留效应在干湿交替的外界环境中快速恢复; 8 月雨水滞留率出现下降则是由于降雨频繁, 阴雨天较多, 平均太阳辐射弱于 7 月和 9 月, 较短的恢复期难以应对频繁的降雨; 3—6 月雨水滞留率较低是由于期间太阳辐射较弱和月降雨量较高; 11 月则因为过长的雨前干旱时间导致绿色屋顶植物萎蔫, 滞留雨水能力减弱.

图 5 天气条件及绿色屋顶雨水滞留效应的月变化

Fig. 5 (Color online) Monthly variation of weather conditions and green roof rainwater retention performance

表 3 绿色屋顶 (以洋竹草屋顶为例) 月雨水滞留效应与天气条件的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of green roof monthly rainwater retention performance and weather conditions

	月降雨量	平均 ADP	平均太阳辐射	平均温度	平均风速
月雨水滞留量	0.924 ¹⁾	-0.038	0.877 ²⁾	-0.525	-0.618
月雨水滞留率	-0.284	-0.417	0.744 ³⁾	-0.205	-0.348

¹⁾ $P < 0.01$; ²⁾ $P < 0.05$; ³⁾ $P < 0.1$

不同植物绿色屋顶的月份雨水滞留效应也存在差异, 在雨水滞留率更小的月份中差异更明显, 如图 5 (a) 和 (b), 其中太阳花与佛甲草的月份雨水滞留量存在统计上的显著差异 ($P < 0.05$). 从图 5 (a) 可见, 在 3—6 月, 太阳花的月雨水滞留量始终最高, 随后出现优势植物的更迭, 在 7—9 月卧地延命草的月雨水滞留量明显升高, 在 10—次年 2 月则为洋竹草. 不同植物绿色屋顶的月雨水滞留率也出现一样的更替规律, 如图 5 (b). 这是因为在 3—6 月, 深圳地区气候较温和, 雨水滞留效应主要取决于植物本身的滞水能力, 太阳花相比其他 3

种植物根系更粗壮, 滞水能力更强. 在 7—9 月初, 由于密集连续降雨较丰富, 绿色屋顶的雨水滞留效应取决于系统在干旱期间的滞留空间的恢复能力. 通过对基质含水量的连续监测已得到卧地延命草相比其他 3 种植物绿色屋顶有较强的恢复能力, 因此在 7—9 月中雨水滞留效应有一定程度的增强. 而 10—次年 2 月, 除了洋竹草外, 其余植物受干旱胁迫的影响出现植物萎蔫和覆盖度减少的现象 (图 6), 降低了对雨水的滞留和干期的恢复, 显现出较低的雨水滞留效应.

图6 不同绿色屋顶植物覆盖度月变化

Fig. 6 (Color online) Monthly change of vegetation coverage on different green roofs

2.3 绿色屋顶雨水滞留全年总效应

在监测期间,监测到的所有降雨的总降雨量为1362 mm,如图7。由图7可见,各植物绿色屋顶的总滞留量分别为洋竹草617.35 mm、太阳花656.54 mm、卧地延命草617.21 mm、佛甲草610.47 mm,研究区不同植物绿色屋顶的全年总滞留率为44%~49%。其中太阳花绿色屋顶的滞留效应最强,达到48%以上;其余3种植物绿色屋顶雨水滞留总效应的差异不大。因此从全年雨水滞留效应来看,选择根系滞水能力强的植物可以提高绿色屋顶雨水滞留效应。

图7 不同植被绿色屋顶全年雨水滞留效应

Fig. 7 (Color online) Annual rainwater retention performance of different vegetation green roofs

3 结 论

基于2018年8月至2019年12月对深圳市4种

不同植物绿色屋顶的连续监测,对在中国华南地区气候条件下的绿色屋顶雨水滞留效应的规律及影响因素进行了分析,结果表明:

1) 绿色屋顶雨水滞留效应随场次和月份降雨条件的变化而波动。绿色屋顶对场次降雨的雨水滞留量为0.4~37 mm,雨水滞留率为2%~100%;绿色屋顶月雨水滞留量为13~148 mm,月雨水滞留率为29%~70%;绿色屋顶全年总雨水滞留量为610~660 mm,雨水滞留率为44%~49%。绿色屋顶对监测期内所有雨量<14 mm或雨量<25 mm但雨前日间干旱时间大于68 h的场次降雨的雨水滞留率达到100%,在监测期间的最大雨水滞留量达到37 mm。

2) 绿色屋顶雨水滞留效应的波动主要受到降雨量和雨前日间干旱时间的影响,雨水滞留率和雨水滞留量与降雨量分别呈显著负相关和正相关,二者都与雨前日间干旱时间呈显著正相关。此外,月太阳辐射与植被类型及其覆盖度变化对月份间的雨水滞留量波动有较大影响。

3) 不同植物绿色屋顶展现出不同的雨水滞留能力。太阳花由于其粗壮发达的根系有较强的滞水能力,在生长季节(3—6月)都保持更高的雨水滞留效应。其他3种植物的全年总滞留效应差异不大,卧地延命草则因其具有较高的蒸散发作用在降雨密集的月份雨水滞留效应较强,而洋竹草因其受干旱胁迫小,在降雨小且降雨频率小的月份保持较高的雨水滞留效应,而佛甲草在本研究中一直保持较低的雨水滞留效应。

以上研究结果可为绿色屋顶的性能评估和推广应用提供科学指导。

基金项目: 深圳市重点实验室提升资助项目(ZDSY201405094114 169); 广东省水利科技创新资助项目(2012-13)

作者简介: 胡尹超(1996—), 北京大学硕士研究生。研究方向: 绿色基础设施与海绵城市, 城市雨水管理, 绿色屋顶。
E-mail: yinchaohu@sz.pku.edu.cn

引文: 胡尹超, 秦华鹏, 林子璇. 深圳绿色屋顶雨水滞留效应变化及其影响因素[J]. 深圳大学学报理工版, 2020, 37(4): 347-354.

参考文献 / References:

- [1] SOULIS K, NTOULAS N, NEKTARIOS P, et al. Runoff reduction from extensive green roofs having different substrate depth and plant cover [J]. Ecological Engineering, 2017, 102: 80-89.
- [2] 葛 德, 张守红. 不同降雨条件下植被对绿色屋顶径

<http://journal.szu.edu.cn>

- 流调控效益影响[J]. 环境科学, 2018, 39(11): 5015-5023.
- GE De, ZHANG Shouhong. Impacts of vegetation on hydrological performances of green roofs under different rainfall conditions [J]. Environmental Science, 2018, 39(11): 5015-5023. (in Chinese)
- [3] CARPENTER C, TODOROV D, DRISCOLL C, et al. Water quantity and quality response of a green roof to storm events: experimental and monitoring observations [J]. Environmental Pollution, 2016, 218: 664-672.
- [4] DIMITAR T, DRISCOLL C T, SVETOSLAVA T. Long-term and seasonal hydrologic performance of an extensive green roof [J]. Hydrological Processes, 2018, 32(16): 2471-2482.
- [5] 李卓熹, 秦华鹏, 谢 坤. 不同降雨条件下低冲击开发的水文效应分析[J]. 中国给水排水, 2012, 28(21): 37-41.
- LI Zhuoxi, QIN Huapeng, XIE Kun. Hydrological effect analysis of low impact development under different rainfall conditions [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(21): 37-41. (in Chinese)
- [6] QIN Huopeng, LI Zhuoxi, FU Guangtao. The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics [J]. Journal of Environmental Management, 2013, 129: 577-585.
- [7] BRANDÃO C, CAMERIA M R, VALENTE F, et al. Wet season hydrological performance of green roofs using native species under mediterranean climate [J]. Ecological Engineering, 2017, 102: 596-611.
- [8] ELLIOTT R M, GIBSON R A, CARSON T B, et al. Green roof seasonal variation: comparison of the hydrologic behavior of a thick and a thin extensive system in New York city [J]. Environmental Research Letters, 2016, 11(7): 074020.
- [9] LI Shuxiao, QIN Huapeng, PENG Yuenuan, et al. Modeling the combined effects of runoff reduction and increase in evapotranspiration for green roofs with a storage layer [J]. Ecological Engineering, 2019, 127: 302-311.
- [10] SCHULTZ I, SAILOR D, STARRY O. Effects of substrate depth and precipitation characteristics on stormwater retention by two green roofs in Portland OR [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2018, 18: 110-118.
- [11] STOVIN V, VESUVIANO G, DE-VILLE S, et al. Defining green roof detention performance [J]. Urban Water Journal, 2015, 14(6): 574-588.
- [12] DE-VILLE S, MENON M, STOVIN V. Temporal variations in the potential hydrological performance of extensive green roof systems [J]. Journal of Hydrology, 2018, 558: 564-578.
- [13] POË S, STOVIN V, BERRETTA C. Parameters influencing the regeneration of a green roofs retention capacity via evapotranspiration [J]. Journal of Hydrology, 2015, 523: 356-367.
- [14] ZHANG Zheng, SZOTA C, FLETCHER T D, et al. Green roof storage capacity can be more important than evapotranspiration for retention performance [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 232: 404-412.
- [15] LI Xiaoxiao, CAO Junjun, XU Peixian, et al. Green roofs: effects of plant species used on runoff [J]. Land Degradation & Development, 2018, 29: 3628-3638.
- [16] XIE G, LUNDHOLM J, MACIVOR J. Phylogenetic diversity and plant trait composition predict multiple ecosystem functions in green roofs [J]. Science of the Total Environment. 2018, 628: 1017-1026.
- [17] 彭跃暖, 秦华鹏, 王传胜, 等. 蓄水层设置与植物选择对绿色屋顶蒸散发的影响[J]. 北京大学学报自然科学版, 2017, 53(4): 758-764.
- PENG Yuenuan, QIN Huapeng, WANG Chuansheng, et al. Effects of storage layer and plant selection on the evapotranspiration of green roofs [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2017, 53(4): 758-764. (in Chinese)
- 【中文责编: 晨 今; 英文责编: 之 聿】