

王婷, 欧嵘熹, 于立, 等. 基于 PLC 的屋顶绿化雨水滞蓄效能自动监测系统及应用 [J]. 华南农业大学学报, 2023, 44(3): 484-494.  
WANG Ting, OU Rongxi, YU Li, et al. PLC-based automatic monitoring system and its application in the rainwater storage capacity of the roof greening ecosystem[J]. Journal of South China Agricultural University, 2023, 44(3): 484-494.

# 基于 PLC 的屋顶绿化雨水滞蓄效能 自动监测系统及应用

王婷<sup>1,2</sup>, 欧嵘熹<sup>3</sup>, 于立<sup>4</sup>, 漆海霞<sup>5</sup>, 章家恩<sup>2</sup>

(1 华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东 广州 510642; 2 华南农业大学 资源环境学院, 广东 广州 510642;  
3 广州人居城乡规划设计有限公司, 广东 广州 510260; 4 英国卡迪夫大学 地理与规划学院,  
英国 威尔士 CF103WA; 5 华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642)

**摘要:**【目的】屋顶绿化通过植被层涵养和基质层滞蓄等作用可减少和延缓暴雨的径流峰值, 通过实时监测降雨量、土壤含水量和溢流量等参数, 对屋顶绿化雨水滞蓄效能进行科学研究。【方法】以可编程控制器 (Programmable logic controller, PLC) 为硬件控制核心组件, 结合触摸屏技术研制屋顶绿化雨水滞蓄效能的自动监测系统, 对降雨事件、降雨量、空气温度、空气湿度和风速进行自动监测。【结果】实时监测系统的测量结果与气象部门观测数据吻合, 表明该系统能有效实现溢流量和基质土壤相对湿度的自动测量。不同植被的植物槽溢流量和基质土壤相对湿度存在差异, 在试验过程中的一个连续降雨时期, 大花马齿苋 *Portulaca grandiflora* 植物槽的滞蓄率为 54.75%, 南美蟛蜞菊 *Sphagneticola trilobata* 为 26.63%, 佛甲草 *Sedum lineare* 为 38.34%; 基质保水性存在季节差异, 8 月降雨后基质相对湿度普遍达 70% 以上, 而 9 月南美蟛蜞菊基质相对湿度均低于 70%, 10 月则更低。【结论】该监测系统可实现对室外屋顶绿化滞蓄效能及生态环境因子的有效、准确和实时动态监测。屋顶植物槽系统的雨水滞蓄效能、产流特征及基质的保水性能与气象气候条件、降雨强度、降雨量、植物类型、季节变化和基质组成等密切相关。

**关键词:** 雨水滞蓄效能; 屋顶绿化; 数据自动采集系统; PLC

中图分类号: TU985.12;S24

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2023)03-0484-11

## PLC-based automatic monitoring system and its application in the rainwater storage capacity of the roof greening ecosystem

WANG Ting<sup>1,2</sup>, OU Rongxi<sup>3</sup>, YU Li<sup>4</sup>, QI Haixia<sup>5</sup>, ZHANG Jiaen<sup>2</sup>

(1 College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2 College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3 Guangzhou Habitat Urban and Rural Planning and Design Co., Ltd., Guangzhou 510260, China; 4 School of Geography and Planning, Cardiff University, Welsh CF103WA, UK; 5 College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** 【Objective】Green roof can reduce and delay the runoff peak of rainstorm through vegetation mitigation and soil media retention. Real time monitoring of rainfall amount, water content of soil media, and runoff are of great significance for scientific research on rainwater retention capacity of roof greening.

收稿日期: 2022-03-31 网络首发时间: 2023-03-07 16:58:16

首发网址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20230307.1413.002.html>

作者简介: 王婷, 讲师, 博士, 主要从事城乡规划与生态规划研究, E-mail: [whuwt@scau.edu.cn](mailto:whuwt@scau.edu.cn); 通信作者: 章家恩, 教授, 博士, 主要从事农业生态学、土壤生态学与环境生态学研究, E-mail: [jeanzh@scau.edu.cn](mailto:jeanzh@scau.edu.cn)

基金项目: 中央财政林业科技推广示范项目 (2021GDTK-01)

**【Method】** Taking programmable logic controller (PLC) as the core component of hardware control and combining with touch screen, an automatic monitoring system for the rainwater storage effect of roof greening was developed to automatically monitor rainfall events, rainfall amount, air temperature, air humidity and wind speed. **【Result】** The measurement results of the real-time monitoring system were consistent with the data of the meteorological department, which indicates that the system can effectively realize the automatic measurement of the overflow amount and the relative humidity of the substrate soil. There were differences in the overflow amount of plant trough and the relative humidity of substrate soil among different vegetations. For example, in a continuous rainfall period during the test, the retention rate of *Portulaca grandiflora* trough system was 54.75%, the *Sphagneticola trilobata* system was only 26.63%, and the *Sedum lineare* system was 38.34%. There were seasonal differences in the water holding capacity of the substrate. The relative humidity of the substrate generally reached more than 70% after the rainfall in August, while the relative humidity of the substrate of *Sphagneticola trilobata* system was lower than 70% in September, and even lower in October. **【Conclusion】** The monitoring system can realize effective, accurate and real-time dynamic monitoring of storage efficiency of outdoor roof greening and ecological environment factors. The rainwater retention capacity, runoff yield characteristics and water retention performance of the matrix soil of the roof plant trough system may be closely related to the meteorological and climatic conditions, rainfall intensity, rainfall amount, plant types, seasonal changes, matrix composition, etc.

**Key words:** Rainwater retention efficiency; Roof greening; Data automatic monitoring system; Programmable logic controller

近年来,受全球气候变化的影响,极端天气日渐增多,同时城镇化发展使得城市下垫面日趋硬化,导致城市雨水难以下渗,现有城市排水管网难以适应瞬时暴雨峰值,城市内涝灾害频发,经常会出现“城市看海”现象。

屋顶绿化作为城市绿化基础设施的一种,通过植被层涵养、基质层滞蓄等作用可截留一定比例的雨水,对减少城市总的径流量、延缓降雨产生的径流峰值起到一定的缓冲作用。在以往研究中,一些研究者通过试验分析了屋顶绿化雨水滞蓄的能力,并对相关影响因素进行了分析<sup>[1-2]</sup>。Abualfaraj等<sup>[3]</sup>在纽约对拓展式屋顶绿化进行了长期监测,发现即使是浅基质绿色屋顶也能显著滞留雨水,等效性分析结果表明,研究案例的绿色屋顶滞蓄量几乎是用于管理曼哈顿市中心暴雨的地下蓄水池的18倍以上。Burszta-adamiak等<sup>[4]</sup>的研究也表明,绿色屋顶能有效地滞蓄降雨,延缓降雨径流的形成,并提出了解不同气象条件下屋顶的水文特性是成功实施和发展城市可持续径流控制措施的关键。

屋顶绿化的雨水滞蓄效能会受到植被种类、基质厚度、土壤湿度、气象条件、降雨类型等因素的影响。植被种类和土壤厚度的参数可以人为确定,其他因素则存在偶然性与时效性,需要通过一定的实时监测手段才能及时获取变化情况,进而科学有效

地测算城市屋顶绿化的雨水滞蓄效能。以往屋顶绿化滞蓄效能的研究多在实验室内完成,降雨量、滞蓄量和溢流量等相关参数主要依靠试验模拟或人工获取<sup>[5-9]</sup>。Buccola等<sup>[5]</sup>曾在试验中人工营造了日照和风等气象条件,但模拟的阳光能量约只有自然光的十分之一,模拟参数与实景下的偏差会极大影响滞蓄测算的结果。实验室方法操作简单,周期短,获取试验参数速度快,但无法结合气象条件和环境因素分析影响屋顶绿化的雨水滞蓄及峰值延迟等参数。为了获取真实的第一手数据,不少研究者开始在户外开展屋顶绿化的滞蓄效能试验。户外试验过程中可以采用雨量计实时监测真实降雨事件<sup>[4,10-11]</sup>,屋顶绿化基质含水量的数据可采用土壤湿度传感器获取<sup>[12-13]</sup>,或采用压力传感器称重进行监测<sup>[10,14]</sup>。较为关键的难点在于滞蓄量的获取,较多的户外试验依然采用量筒进行人工监测计量<sup>[15-17]</sup>,但由于人工无法确保及时有效地开展全天候跟踪监测,大到暴雨事件时由于人工操作的局限也会带来较大的误差。也有采用翻斗雨量计监测溢流量的做法,但其传感器的精度有限<sup>[18]</sup>。

目前,关于屋顶绿化的雨水滞蓄效能研究一直是城市园林研究的热点,但相关监测手段尚缺少一套完整的、能够将降雨量、滞蓄量、溢流量和气象数据的自动同步获取装置。本研究采用雨量计、空气

温度传感器、空气湿度传感器、风速传感器、土壤湿度传感器、压力传感器和电磁阀等多种传感器,使用可编程控制器 (Programmable logic controller, PLC) 为硬件控制核心,通过编程实现对相关参数的同步实时监测,旨在为研究屋顶绿化系统各组分对雨水滞留过程的动态分布及效能和估算大尺度滞蓄效能的相关研究提供技术支持。

## 1 研究方法

### 1.1 实时监测系统搭建

为实现对屋顶绿化雨水滞蓄效能的相关影响因素的同步实时监测,搭建了监测系统,其总体功能示意图如图 1。

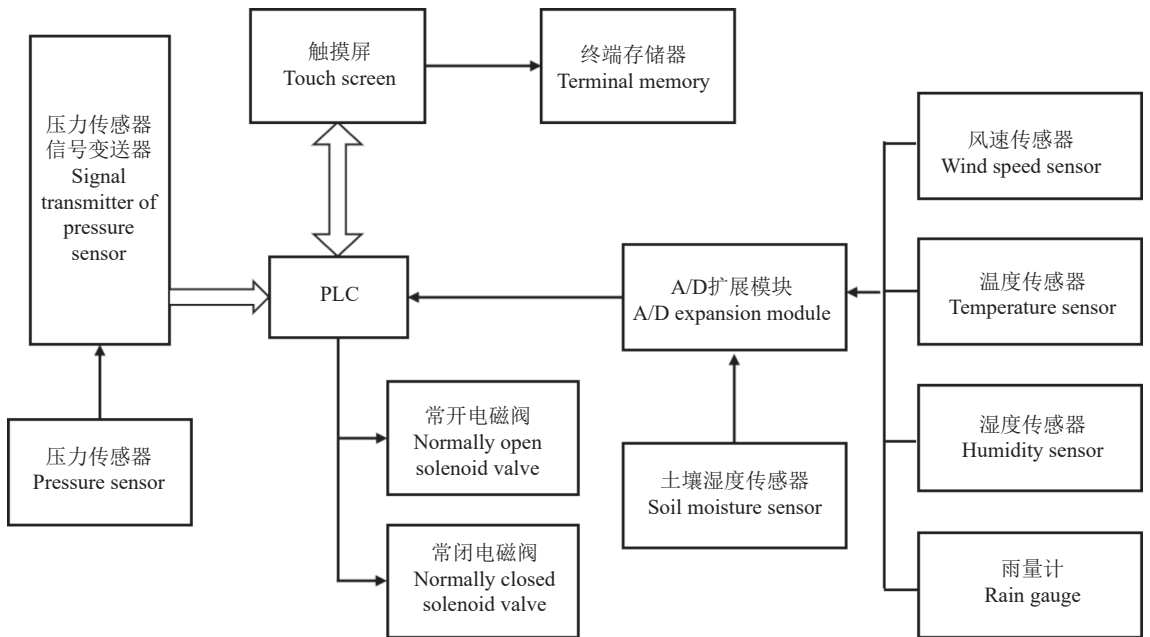


图 1 实时监测系统总体功能示意图

Fig. 1 Overall function diagram of the real-time monitoring system

实时监测系统主要由主控制模块、植物箱排水质量监测及控制模块、基质含水量监测模块和气象参数监测模块等 4 个模块组成。涉及的硬件控制系统主要包括 PLC(HY2N-48-10AD2DA, 领空科技)、压力传感器(DAYSENSOR 圆 S 型, 测量范围 0~5 kg, 大洋)、压力传感器信号变送器(BSQ-001, 输出信号 0~10 V, 大洋)、土壤水分传感器(RS485, 水分测量范围 0~100%, 精讯畅通)、雨量计(LT-CG-S/T-005-D3300-12-V1.1, 测量范围 0~100 mm, 123IOT)、空气温度传感器(wzp-pt100, 测量范围 -20~100 °C, 源诚)、空气湿度传感器(HM1500, 测量范围 0~100%RH, 源诚)、风速传感器(HS-FS01, 测量范围 0~30 m/s, 华控)、常开电磁阀和常闭电磁阀。硬件的选择首要考虑的因素是测量范围符合试验要求,其次考虑硬件的市场使用情况,第 3 考虑的因素是经济成本。

实时监测系统监测参量共计 23 个,包括压力(10 个)、土壤湿度(9 个)以及空气湿度、风速、大气温度和雨量各 1 个,而采用的 PLC 自带 10 个 A/D 模拟量输入,因此增加一个具有 14 个扩展模

拟量输入的 A/D 转换模块。系统以 PLC 为主控器件,收集来自各传感器的模拟信号,通过编程运算将结果参数输出至触摸屏。此外,系统自动控制排水,当需要临时紧急排水时,触摸屏可以通过控制 PLC 连接的电磁阀实现手动排水功能。主控制模块主要由 A/D 扩展器、PLC 和触摸屏组成,通过 PLC 和 A/D 扩展器实现对植物箱排水质量监测模块等 3 个模块的控制、各组成传感器数据和指令的读写,通过触摸屏实现整个系统数据的读写、存储和界面控制。

PLC 主控程序编程采用三菱电机 GX Works2 软件实现控制流程、调试和维护功能的编写。触摸屏控制器编程采用威纶通 EasyBuilder Pro 编程软件,实现界面设计、指令读写、数据传输、数据转换和维护管理。系统软件功能模块分别为各参数数据监测及处理和植物箱排水控制,具体完成如下功能:PLC 与 A/D 扩展器的通讯及数据读写;PLC 对压力、土壤湿度、空气温湿度、风速、降雨量等 23 个参数的读取及模数转换;PLC 对电磁阀指令控制;PLC 与触摸屏的通讯及数据读写;触摸屏事件

响应及数据处理。

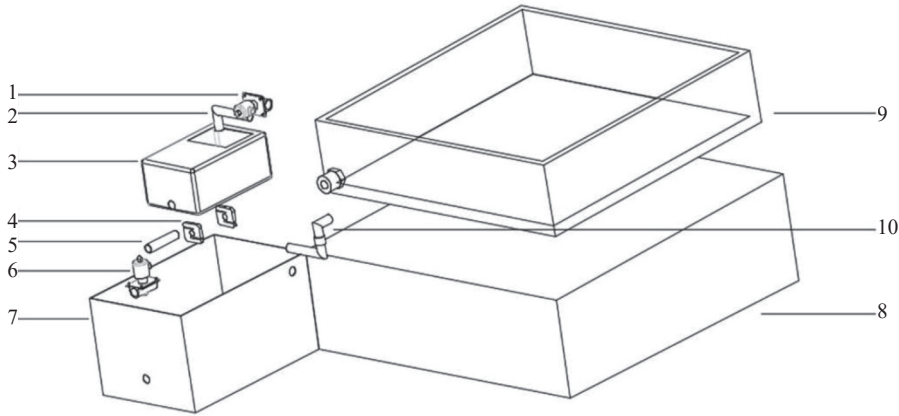
### 1.2 植物槽排水质量监测及控制模块搭建

植物槽排水质量监测及控制模块设计见图 2。植物槽排水质量监测及控制模块由压力传感器及其信号变送器、常开电磁阀、常闭电磁阀、集水箱及植物槽组件组成,通过 PLC 实现数据读取和指令传送。植物槽与集水外箱通过连接水管连接,压力传感器固定在集水外箱的底部。通过 PLC 输出指令到触点开关,控制连接水管的电磁阀通电状态,实现集水箱的蓄排水。当降雨事件发生时,植物槽滞蓄饱水后的溢流水量由进水导水管排入集水箱;当集水箱质量未达到 PLC 程序设定的压力传感器上限值时,用于控制进水的常开电磁阀处于打开状态,植物槽的溢流水量可正常导入集水箱;当集

水箱质量达到程序设定的上限值时,PLC 控制器立即发出排水指令触发触点动作,常闭电磁阀通电打开,快速排掉集水箱雨水,同时将进水用常开电磁阀通电关闭,确保排水期间植物槽的水不能继续流进集水箱,直至集水箱质量达到 PLC 程序设定的下限值为止。排水质量数据采集范围为 3.0~9.0 kg,精度为±0.06%;压力传感器测量范围为 0~10.0 kg,与输出信号电压的线性定量关系为 1 kg/V。

### 1.3 实时监测系统试验平台搭建

根据屋顶绿化蓄水效能研究的需求,搭建的实时监测系统实景模型见图 3,图中也明确标出了除压力传感器(具体位置已在图 2 中标出)之外的土壤湿度传感器、风速仪、空气湿度传感器和温度传感器具体位置。每个植物槽设置一个土壤湿度传感



- 1: 常开电磁阀 Normally open solenoid valve
- 2: 进水导水管 Water inlet conduit
- 3: 集水箱 Water collecting box
- 4: 压力传感器 Pressure sensor
- 5: 排水导水管 Drainage conduit
- 6: 常闭电磁阀 Normally closed solenoid valve
- 7: 集水外箱 Water collecting outer box
- 8: 基座 Base
- 9: 植物槽 Plant box
- 10: 连接水管 Connecting water pipe

图 2 植物槽排水质量监测及控制模块

Fig. 2 Monitoring and control module of the drainage weight of plant box

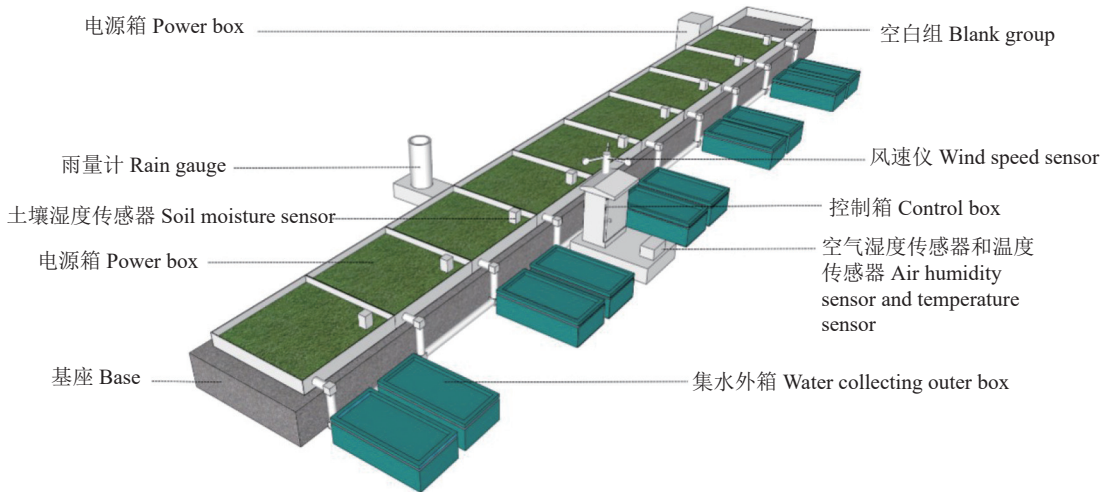


图 3 实时监测系统实景模型图

Fig. 3 On-site model of the real-time monitoring system

器,为了尽量保证监测条件一致,每个土壤湿度传感器安插在各个植物槽的相同位置,即距东南角各 40 cm 处,安插深度均为 4 cm。

植物槽选用已市场化应用的 1.2 m×1.2 m 模块式屋顶绿化容器,该容器侧面底部有专门的排水口。为便于收集和测算溢流量,一组 9 个植物槽均放置于架高的水泥平台上。基于市场调研和预试验结果,植物槽基质厚度设置为 8.0 cm,其中 9 个上层覆盖种植植物佛甲草 *Sedum lineare*、南美蟛蜞菊 *Sphagneticola trilobata* 和大花马齿苋 *Portulaca grandiflora*,用水泥砌筑 1 个空白组为对照组。每个植物槽中插入土壤湿度传感器。雨量计、空气温度传感器、空气湿度传感器和风速仪分别安装在植物槽附近位置,并确保雨量计安置处上方无阻挡和风速仪四周无阻拦,各传感器通过信号线传输数据至主控箱。

监测系统安装于广东省广州市华南农业大学某教学楼顶,安装实景见图 4,系统控制模块内部实景见图 5。

从图 4 可以看出,整个系统由 9 个植物槽模块及其监测传感器组成。系统采用 220 V 外接电源,触摸屏作为控制系统输入输出硬件界面,通过 RS485 协议与 PLC 进行通讯,实现对整个系统的操控、数据传输及指令读写。触摸屏存储器可表格化存放各传感器回传参数,使用者通过 USB 接口可下载数据。同时触摸屏可显示各个传感器传送的实时参数信息,通过界面软按钮可实时切换显示大气环境温度、湿度、风速、降雨量等气象数据,或显示土壤湿度和溢流量等数据。系统于 2018 年 8 月 1 日搭建并调试运行,连续运行了 14 个月。本研究采用 2018 年 8 月 1 日至 10 月 30 日监测数据进行



图 4 实时监测系统安装实景图

Fig. 4 On-site picture of the real-time monitoring system installation



图 5 控制模块安装实景图

Fig. 5 On-site picture of the control module installation

系统数据分析。

#### 1.4 相关参数计算方法

1.4.1 单次降雨事件总溢流量 将集水箱水平固定在压力传感器上,使质量均匀地分布在 2 个压力传感器上。压力传感器 24 h 不间断以分钟为单位测量集水箱质量,当压力传感器收集的溢流水量等于 9 kg(满量程)时,水箱开始排水,同时关闭进水口;排至 3 kg 时停止排水,同时开启进水口。而降雨量较大的单次降雨事件中,每个植物槽的溢流可能会使集水箱多次达到满量程 9 kg,则单次降雨事件总溢流量由公式(1)计算:

$$Y = (\alpha - \beta) + 6 \times \varphi, \quad (1)$$

式中:  $Y$  为单次降雨事件总溢流量, kg;  $\alpha$  为产流结束时水箱质量, kg;  $\beta$  为产流开始前水箱质量, kg; 6 为高水位与低水位差值, kg;  $\varphi$  为单次降雨事件水箱排水次数。

1.4.2 滞蓄率 各植物槽系统滞蓄率由下式计算:

$$K = \frac{R - Y}{R} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:  $K$  为各植物槽系统滞蓄率, %;  $R$  为每次降雨事件降水总质量, kg;  $Y$  为各植物槽总溢流量, kg。

1.4.3 相关环境指标的采集 监测系统以 PLC 为主控器件,实时收集来自各传感器的模拟信号,通过自身的 A/D 转换把收集到的模拟信号转换为数字信号,并通过相应软件编程的运算分别得到每分钟基质土壤湿度、空气温度、空气湿度、风速等结果参数,存放在指定的寄存器内。通过触摸屏记录历史数据的功能按周期进行读取,表格化地存储在触摸屏的内部储存器内,并实时地显示在触摸屏上,以实现结果参数的可视化、表格化和可移动化。本研究直接利用传感器采集转换后的数据进行统计分析。

### 1.5 实时监测系统监测数据的可靠性验证

为验证系统监测的可靠性,在2018年9月30日06:00—21:00,用手持 Kestrel 5000 气象记录仪每间隔 1 h 对温度和湿度等气象数据进行人工监测,采用 SPSS 25.0 软件对系统监测数据和手持气象仪记录的 2 组数据进行配对样本 *T* 检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 实时监测系统可靠性验证结果

利用手持气象仪对试验场地的温度和湿度进行监测,与实时监测系统同时的 2 组数据进行对比。从图 6 可知,手持气象仪输出的数据与系统自

动监测的数据高度吻合,24 h 的监测数据均基本重合,手持气象仪的观测结果佐证了实时监测系统自动监测结果的可靠性。将手持气象仪测试结果与实时监测系统自动监测结果进行统计分析,表明 2 组数据之间在统计分析上也无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。

### 2.2 降雨事件与降雨量

2018年8月1日至10月30日实时监测系统监测到的降雨事件及其对应降雨量如图 7 所示。从图 7 中可以看出,监测期间共有降雨事件 28 次,其中 8 月份发生降雨事件 16 次,9 月份发生降雨事件 8 次,10 月份发生降雨事件 4 次;降雨量超过 100 mm/h 的大雨事件 8 次,降雨量超过 250 mm/h

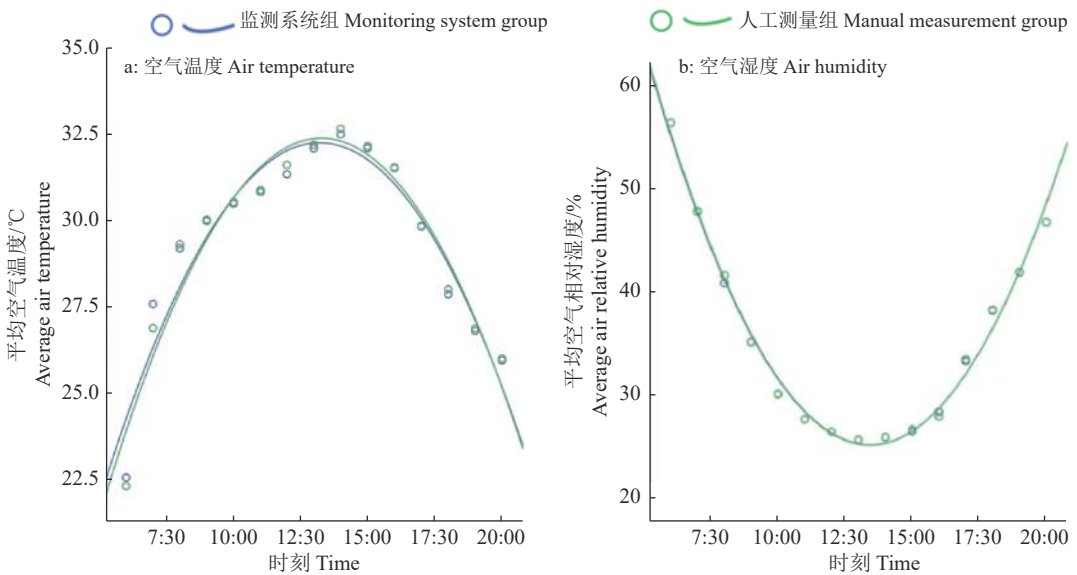


图 6 手持气象仪测定的空气温度和湿度分别与实时监测系统自动监测数据的 *T* 检验

Fig. 6 *T*-test of air temperature and humidity data between measurements from portable weather instrument and the on-site real-time monitoring system

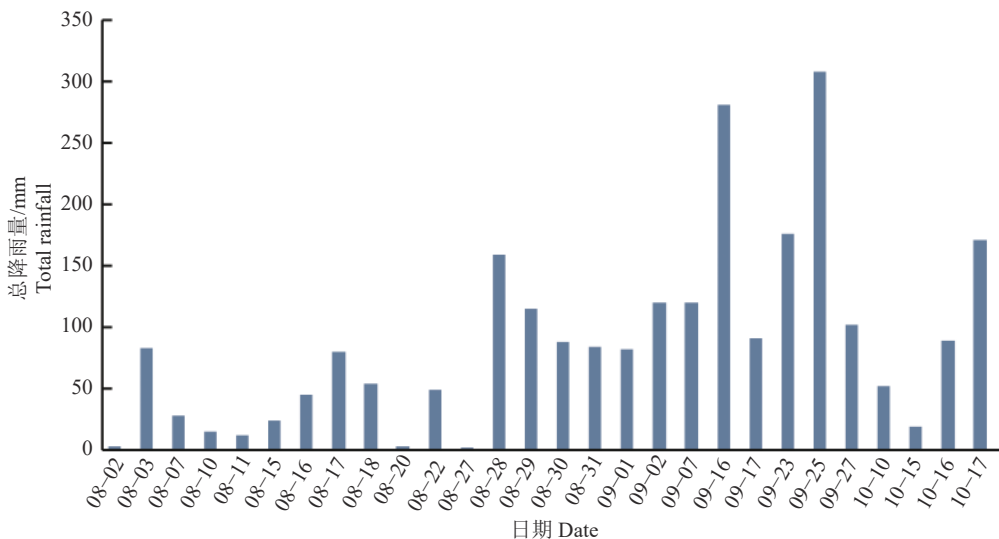


图 7 实时监测系统监测的降雨事件及强度

Fig. 7 Rainfall events and intensity detected by the real-time monitoring system

的特大暴雨事件 2 次, 分别发生在 9 月 16 日和 9 月 25 日。经与当地气象部门数据核对, 实时监测系统记录的降雨事件发生次数、时间和降雨量大小与气象部门数据高度吻合。同时, 本研究于 2018 年 9 月 1 日至 9 月 30 日进行了为期 1 个月的降雨事件人工监测和记录, 结果表明, 实时监测系

统自动监测的降雨事件发生的时间和强度与人工监测记录的数据吻合。

### 2.3 大气环境温度、湿度和风速

2018 年 8 月 1 日至 10 月 30 日实时监测系统监测的大气环境温度、湿度及风速日均值如图 8 所示。

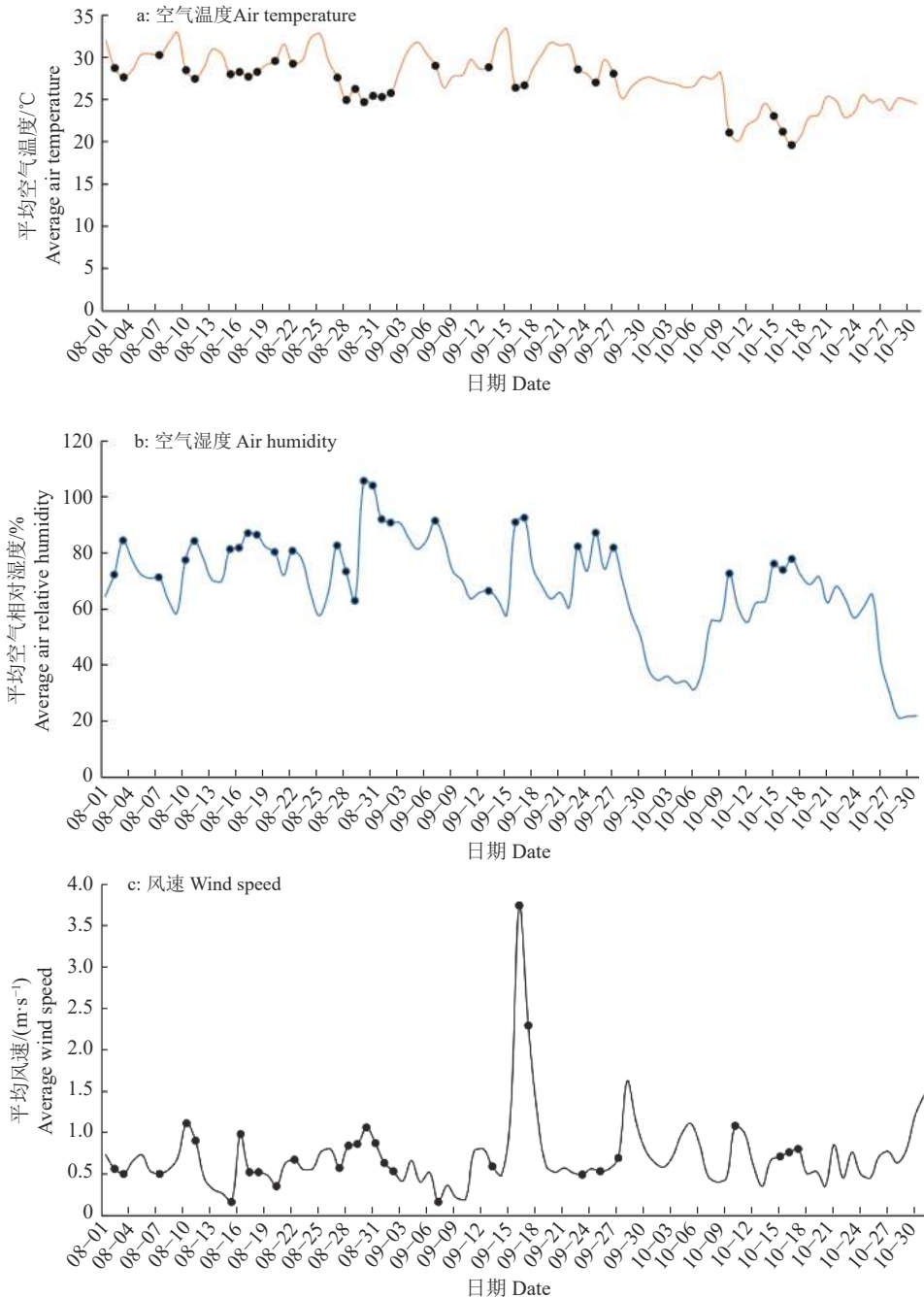


图 8 实时监测系统监测的气象数据日均值

Fig. 8 Daily mean value of the meteorological data monitored by the real-time monitoring system

从图 8 中可以看出, 在试验观测期间, 实时监测系统连续有效地记录了空气温度、湿度和风速等环境气象参数。伴随着降雨事件发生, 环境温度处于区间极小值, 说明降雨事件会导致环境温度的降

低, 与当时实际情况吻合。在降雨事件发生过程中环境湿度处于区间极大值, 说明降雨事件会导致环境湿度的上升, 与当时实际情况吻合。风速的变化受小环境影响较大, 监测系统也记录到多次降雨事

件发生时环境风速处于区间极大值;风速明显波动较大的时间为9月17和18日,此期间超强台风山竹(Super typhoon mangkhut 1822)进入广州,监测系统监测到了小环境的高风速,风速峰值为30.0 m/s,日均风速为4.0 m/s,同时也表明系统搭建具有

一定稳定性。

## 2.4 溢流量

试验期间实时监测了种植大花马齿苋、南美蟛蜞菊和佛甲草的植物槽的溢流量日均值,结果如图9所示。

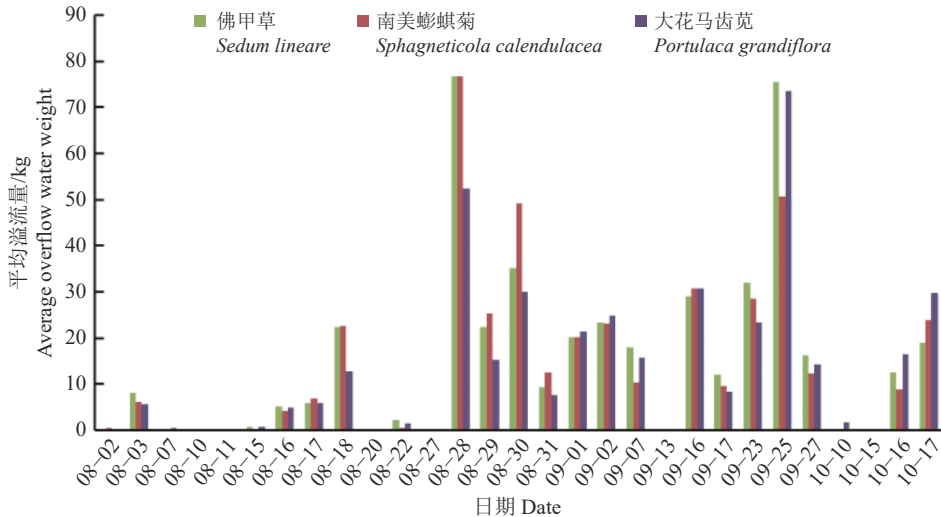


图9 不同植物溢流量日均值

Fig. 9 Daily mean value of overflow water weight of different plants

从图9中可以看出,在某些观测时段,种植不同植被的植物槽的溢流量不一样。8月处于降雨集中期,当发生降雨强度较小的降雨事件时,3种植物槽系统的滞蓄率均较高且差异不大,如8月2日南美蟛蜞菊系统的滞蓄率达90.48%,佛甲草与大花马齿苋系统均完全滞蓄降雨量。而面对大雨事件,佛甲草与大花马齿苋系统的滞蓄效果好于南美蟛蜞菊,在8月28—31日这段连续降雨时期,大花马齿苋系统的滞蓄率为54.75%,南美蟛蜞菊系统的仅为26.63%,佛甲草系统的滞蓄率为38.34%;9月的降雨事件以单次强降雨为主,总体来看南美蟛蜞菊系统的滞蓄能力有所提升,滞蓄率达42.71%,说明单次强降雨条件下南美蟛蜞菊系统的滞蓄能力较强;10月的降雨较少,小、中型雨时3种植物系统的滞蓄率均达90%以上,两次暴雨事件中,大花马齿苋系统的滞蓄率跌至43.8%和34.21%,而佛甲草系统的滞蓄率维持在55%~60%之间,与8月滞蓄情况相比,大花马齿苋系统的滞蓄能力下降较大,结合现场观察发现其长势较8月有所放缓,植物覆盖基质程度不如佛甲草与南美蟛蜞菊,因此植物槽的滞蓄能力与植物生长的季节性不同有关。监测结果也表明,实时监测系统的有效性较好,系统可24 h实时有效监测植物槽的溢流产流时间、持续时间和溢流量的大小,通过控制开闭阀门可有效解决暴雨事件时溢流量的多次监测和统计。

## 2.5 土壤相对湿度

用土壤湿度计监测小到短时中雨未产生溢流时不同植被植物槽基质土壤的相对湿度。试验期各个植物槽基质土壤的相对湿度及降雨量如图10所示。

从图10可知,当降雨事件发生时,土壤湿度呈现增加趋势,且前期干旱期越长,基质土壤的相对湿度增加越大,当降雨量超过日均80 mm时,土壤相对湿度达到80%以上。3种植物基质土壤的相对湿度变化趋势有一定的延迟性和统一性,在降雨事件发生后,基质土壤的相对湿度能在1~2 d内迅速提升;但3种植被基质土壤的相对湿度受降雨事件影响后的变化有差异,如8月27—29日,佛甲草的基质土壤相对湿度平均值由24.32%提升至75.16%,南美蟛蜞菊的基质土壤相对湿度由17.89%提升至62.10%,大花马齿苋的基质土壤相对湿度由22.48%提升至80.33%。实时监测系统的监测数据也表明,基质土壤的相对湿度存在季节性差异,因8月份降雨事件较多,相较于9月和10月基质土壤的相对湿度普遍增高;基质土壤保水性存在季节性差异,8月降雨后基质土壤的相对湿度普遍达到70%以上,而9月南美蟛蜞菊基质土壤的相对湿度均低于70%,整个10月前期开始基质都处于干旱状态,降雨事件发生后,基质土壤相对湿度增加,10月17日暴雨事件后,基质土壤的相对湿度



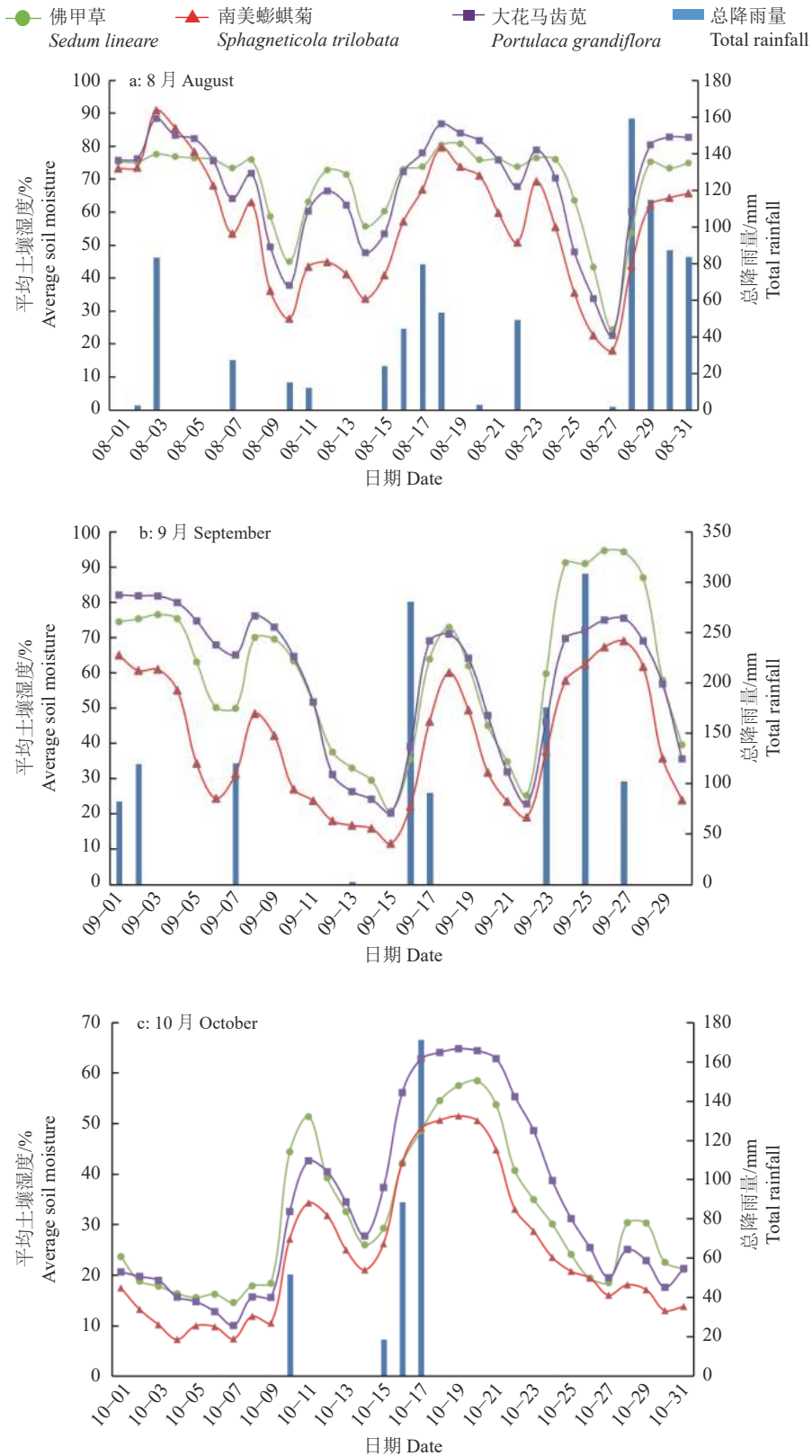


图 10 2018 年 8—10 月植物槽基质土壤湿度均值变化及日降雨量

Fig. 10 Mean changes of substrate soil moisture and daily rainfall from August to October in 2018

最高值为 64.74%(大花马齿苋),也未超过 70%;8 月佛甲草、南美蟛蜞菊和大花马齿苋的基质土壤平均相对湿度分别为 68.55%、56.34% 和 67.66%,而在 10 月则分别降低至 31.20%、24.31% 和

33.48%,说明基质在 10 月的持水性不如 8 月。这种变化的原因,一方面是由于降雨减少,引起直接水分来源缩减所致,另一方面是气候趋于干燥,蒸散蒸发增加,植物根系用水增加。

### 3 讨论与结论

自 20 世纪 60 年代以来, PLC 作为可编程逻辑控制器常用于工业生产中的自动化控制,近年来也有部分研究者将其运用到生态环境监测研究中。杨浩等<sup>[19]</sup>运用 PLC 设计了一套光调控跟踪植物生长系统,实时监测系统使得光环境因素可控,大大降低了植物的“生产成本”;杨帆等<sup>[20]</sup>为防止在材料试验过程中发生危险,利用 PLC 设计了一种实验室环境监测系统。本研究以 PLC 为硬件控制核心组件结合触摸屏电路控制系统,研制了屋顶绿化的雨水滞蓄效应实时自动监测系统,对溢流量、基质土壤相对湿度、降雨量和局部环境气象参数进行实时自动监测,监测获取的气象数据与手持气象仪得到的数据吻合,表明在屋顶绿化雨水滞蓄效能自动监测研究及应用上,所研制的实时监测系统具有实际可行性和观测数据的可靠性。

本研究结果显示,在雨水滞蓄方面,基质持水量达到饱和后无法继续滞蓄从而产生排水,降雨强度越大,降雨历时越长,滞蓄效果越差,小型与中型降雨条件下各植物系统的整体滞蓄率近 90% 或以上,大型降雨条件下各植物系统的整体滞蓄率平均达 74.65%,暴雨及以上的各植物系统的降雨整体滞蓄率平均为 54.30%。同时,基质的雨水滞蓄能力和效果受到前期干旱期的影响,干旱期越长,其后遇降雨事件基质滞蓄能力越强,以往的研究中也显示了屋顶绿化的雨水滞蓄能力受降雨事件大小的影响<sup>[21-22]</sup>;在连续高强度降雨情况下,3 种植物组成的植物槽的滞蓄能力存在差异,表现为:大花马齿苋、佛甲草优于南美蟛蜞菊,而 3 种植物系统的持续滞蓄率在 20%~30% 之间,同时滞蓄能力与植物生长的季节性差异有关,这与其他一些研究得到的植被类型会对屋顶绿化的滞蓄能力产生重要影响的结论相一致<sup>[23-24]</sup>。

在基质产流方面,在 9 月 7 日降雨量为 120.15 mm 的暴雨事件中,佛甲草、南美蟛蜞菊和大花马齿苋 3 种植物的初产流时间分别延迟了 14、9 和 18 min,产流峰值时间较空白对照组产流推迟,速率相对平缓,最终产流分别减少 23.17、21.39 和 26.33 kg,说明植物槽的基质有效延缓了初始产流的发生时间,推迟了产流峰值及持续的时间,减少了雨水的直接产流,实现了屋顶绿化的滞蓄雨水效能。

在基质保水性方面,3 种植物槽的基质土壤相对湿度变化趋势也存在一定的延迟性和统一性,降雨强度越大,前期干旱期越长,基质土壤的相对湿

度提升越大。一般而言,降雨发生后 2 d 内基质土壤相对湿度提升 20~40 个百分点,同时基质保水性存在季节性差异,10 月份佛甲草、南美蟛蜞菊和大花马齿苋的基质土壤平均相对湿度比 8 月下降了 37.35、32.03 和 34.18 个百分点,说明干旱季节基质保水性较差,因此,应关注和加强屋顶绿化的浇灌养护。

综上所述,本项目所研制的实时自动监测系统可有效地对屋顶植物槽雨水滞蓄系统的小气候环境、雨水滞蓄能力、产流过程和基质土壤相对湿度等状况进行全天候动态监测。通过 1 年的实时监测数据分析,结果显示,屋顶植物槽系统的雨水滞蓄效能、产流特征及基质土壤的保水性能与气象气候条件、降雨强度、降雨量和植物类型及其季节变化、基质组成等因素密切相关,因此,在屋顶植物槽雨水滞蓄系统效能研究和建设时,需要进一步对适宜植物品种的筛选、基质组配、植物季节配置、日常管护技术以及相关的室外监测传感技术等方面开展深入系统研究。同时,加强对屋顶绿化试验平台的长期持续监测,获取长期数据,开展长期研究十分必要。另外,由于实时监测系统搭建于屋顶室外,为避免传感器出现故障,在系统运行过程中应定期进行排查与校准。

#### 参考文献:

- [1] VANWOERT N D, ROWE D B, ANDRESEN J A, et al. Green roof storm water retention: Effects of roof surface, slope, and media depth[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(3): 1036-1044.
- [2] GETTER K L, ROWE D B, ANDRESEN J A. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention[J]. *Ecological Engineering*, 2007, 31(4): 225-231.
- [3] ABUALFARAJ N, CATALDO J, ELBOROLOS Y, et al. Monitoring and modeling the long-term rainfall-runoff response of the Jacob K. Javits center green roof[J]. *Water*, 2018, 10(11): 1494. doi: 10.3390/w10111494.
- [4] BURSZA-ADAMIAK E, STAŃCZYK J, ŁOMOTOWSKI J. Hydrological performance of green roofs in the context of the meteorological factors during the 5-year monitoring period[J]. *Water and Environment Journal*, 2019, 33(1): 144-154.
- [5] BUCCOLA N, SPOLEK G. A pilot-scale evaluation of green roof runoff retention, detention, and quality[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2011, 216(1): 83-92.
- [6] 张彦婷,郭健康,李欣,等.利用正交设计研究屋顶绿化基质对雨水的滞蓄效果[J].*上海交通大学学报(农业科学版)*, 2015, 33(6): 53-59.
- [7] 张华,李茂,张泮,等.简单屋顶绿化的滞蓄特性[J].*土木建筑与环境工程*, 2015, 37(4): 135-141.
- [8] BOUZOUIDJA R, SÉRÉ G, CLAVERIE R, et al. Green

- roof aging: Quantifying the impact of substrate evolution on hydraulic performances at the lab-scale[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 416-423.
- [9] WANG J, GARG A, LIU N, et al. Experimental and numerical investigation on hydrological characteristics of extensive green roofs under the influence of rainstorms[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(35): 53121-53136.
- [10] 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.
- [11] LOCATELLI L, MARK O, MIKKELSEN P S, et al. Modelling of green roof hydrological performance for urban drainage applications[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 3237-3248.
- [12] YILMAZ D, SABRE M, LASSABATÈRE L, et al. Storm water retention and actual evapotranspiration performances of experimental green roofs in French oceanic climate[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2016, 20(3): 344-362.
- [13] KEMP S, HADLEY P, BLANUŠA T. The influence of plant type on green roof rainfall retention[J]. *Urban Ecosystems*, 2019, 22(2): 355-366.
- [14] LIU W, FENG Q, CHEN W P, et al. Runoff retention assessment for extensive green roofs and prioritization of structural factors at runoff plot scale using the Taguchi method[J]. *Ecological Engineering*, 2019, 138: 281-288.
- [15] CHARALAMBOUS K, BRUGGEMAN A, ELIADES M, et al. Stormwater retention and reuse at the residential plot level: Green roof experiment and water balance computations for long-term use in Cyprus[J]. *Water*, 2019, 11(5): 1055. doi: 10.3390/w11051055.
- [16] GAN L, GARG A, WANG H, et al. Influence of biochar amendment on stormwater management in green roofs: Experiment with numerical investigation[J]. *Acta Geophysica*, 2021, 69(6): 2417-2426.
- [17] WANG J, GARG A, HUANG S, et al. The rainwater retention mechanisms in extensive green roofs with ten different structural configurations[J]. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2021, 84(8): 1839-1857.
- [18] RAZZAGHMANESH M, BEECHAM S. The hydrological behaviour of extensive and intensive green roofs in a dry climate[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 499: 284-296.
- [19] 杨浩, 林添堤, 徐永, 等. 基于 PLC 的光调控植物跟踪生长系统[J]. *农机化研究*, 2020, 42(9): 87-92.
- [20] 杨帆, 赵彤轩, 王钰涌, 等. 基于 S7-1200 PLC 的材料实验室环境监测物联网系统的设计[J]. *工业仪表与自动化装置*, 2022(1): 60-65.
- [21] VANUYTRECHT E, VAN MECHELEN C, VAN MEERBEEK K, et al. Runoff and vegetation stress of green roofs under different climate change scenarios[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 122: 68-77.
- [22] 郑美芳, 邓云, 刘瑞芬, 等. 绿色屋顶屋面径流量水质影响实验研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2013, 47(10): 1846-1851.
- [23] 张贤巍. 北京市气候特征下简单式绿色屋顶植物生长及径流雨水调控规律研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
- [24] 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 subtropical climate[J]. *Urban Ecosystems*, 2008, 11(4): 339-348.

【责任编辑 李晓卉】