#### DOI: 10.5846/stxb202210122896

目婧,张守红,章孙逊,王任重远,何瑛瑛,杨航,王恺.不同气候区绿色屋顶蒸散发模拟研究.生态学报,2023,43(10):3936-3945.

Yan J, Zhang S H, Zhang X X, Wang R Z Y, He Y Y, Yang H, Wang K.Simulation of evapotranspiration from green roofs in different climatic zones. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10):3936-3945.

# 不同气候区绿色屋顶蒸散发模拟研究

闫 婧¹,张守红¹,2,3,\*,章孙逊¹,王任重远¹,何瑛瑛¹,杨 航¹,王 恺¹

- 1 北京林业大学水土保持学院,北京 100083
- 2 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站,临汾 042200
- 3 北京市水土保持工程技术研究中心,北京 100083

摘要:蒸散发过程决定绿色屋顶雨水滞留能力的恢复,进而影响绿色屋顶径流调控功能。基于水量平衡原理和 Penman-Monteith 公式,利用北京市实验绿色屋顶气象和蒸散发连续监测数据,构建并验证绿色屋顶水文过程模型,模拟分析不同气候区城市绿色屋顶蒸散发变化规律。结果表明:①该模型能较准确模拟绿色屋顶蒸散发量,率定和检验期的 Nash-Sutcliffe 效率系数分别为 0.6385 和 0.6014,决定系数(R²)分别为 0.7191 和 0.6168;②基质厚度相同的情况下,从半干旱区(兰州)、半湿润区(北京)到湿润区(武汉和广州),绿色屋顶日平均实际蒸散发量呈增加趋势;③增加基质厚度可提升绿色屋顶最大雨水滞留能力,进而增加绿色屋顶实际蒸散发量,但基质厚度对绿色屋顶蒸散发量的影响存在阈值,在兰州、北京、武汉和广州,当基质厚度分别超过 10 cm、17 cm、24 cm 和 25 cm 时,绿色屋顶的日平均实际蒸散发量变化不再明显。此外,不同气候区城市绿色屋顶的日平均实际蒸散发量也存在阈值,广州绿色屋顶日平均实际蒸散发量的阈值依次高于武汉、北京和兰州。本研究有望为我国不同气候区绿色屋顶蒸散量估算以及绿色屋顶水文设计提供科学参考。

关键词:绿色屋顶;蒸散发;气候区;基质厚度;水文模型

### Simulation of evapotranspiration from green roofs in different climatic zones

YAN Jing<sup>1</sup>, ZHANG Shouhong<sup>1,2,3,\*</sup>, ZHANG Sunxun<sup>1</sup>, WANG Renzhongyuan<sup>1</sup>, HE Yingying<sup>1</sup>, YANG Hang<sup>1</sup>, WANG Kai<sup>1</sup>

- 1 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China
- 2 National Station for Forest Ecosystem Research in Ji County, Linfen 042200, China
- 3 Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation , Beijing 100083 , China

Abstract: Evapotranspiration restores stormwater retention capacity of green roofs during inter-event dry periods and thus affects their stormwater retention function. In this study, a conceptual hydrological green roof model was developed based on the Penman-Monteith method and water balance theory. The model was calibrated and verified with continuously observed meteorological and hydrological data of a green roof in Beijing, and then applied to simulate evapotranspiration processes of green roofs located in various climatic zones. The results show that the hydrological model could accurately simulate evapotranspiration process of the green roof, with the Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient of 0.6385 and 0.6014 as well as the Determination Coefficient of 0.7191 and 0.6168 for calibration and verification, respectively. For green roofs with the same depth of substrate, daily average value of actual evapotranspiration (AET) increases as the climate changes from semi-arid (Lanzhou) to semi-humid (Beijing) and humid (Guangzhou and Wuhan). Increasing depth of substrate results in the increased AET from green roofs, but the daily average AET from green roofs changes marginally when the depth of substrate

基金项目:国家自然科学基金项目(52279001);中央高校基本科研业务费专项(2021BLRD04)

收稿日期:2022-10-12; 采用日期:2023-04-03

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhangs@ bjfu.edu.cn

increases beyond thresholds. The thresholds of substrate depth of green roofs at Lanzhou, Beijing, Wuhan, and Guangzhou are 10 cm, 17 cm, 24 cm, and 25 cm, respectively. The daily average AET of green roofs located in different climate zones also have various thresholds, and the daily average AET threshold of green roofs at Guangzhou is in turn larger than that at Wuhan, Beijing, and Lanzhou. This study is expected to provide a scientific reference for estimation of green roof evapotranspiration and design of green roofs under different climatic zones in China.

Key Words: green roof; evapotranspiration; climatic zone; substrate depth; hydrological model

近年来,快速城市化导致城镇地区大面积的绿地被不透水面(如道路、停车场和建筑物等)替代<sup>[1]</sup>。城镇地区的自然景观和自然水循环过程遭到破坏,城市内涝频发,生态环境问题突出<sup>[2]</sup>。在此背景下,我国借鉴不同国家和地区的诸如低影响开发<sup>[3]</sup>、最佳管理措施<sup>[4]</sup>和可持续城市排水等<sup>[5]</sup>雨洪管理理念,提出了"海绵城市"建设战略<sup>[6]</sup>,旨在解决快速城市化造成的城市生态环境问题。绿色屋顶作为"海绵城市"的重要措施之一,具有减少径流、延迟产流和削减洪峰等径流调控功能<sup>[7]</sup>,在我国各地区得到广泛的关注和应用<sup>[8]</sup>。

绿色屋顶的径流调控功能主要通过植被层和基质层滞留雨水来实现<sup>[9]</sup>。当降雨进入绿色屋顶系统,小部分雨水被植被茎叶截留,大部分雨水进入基质层,补充基质水分,基质含水量增加,基质的雨水滞留能力下降。当基质含水率超过田间持水量时,多余的雨水通过基质层进入排水层并以径流形式排出。降雨结束后,植被层和基质层中滞蓄的水分通过蒸散发进入大气,绿色屋顶的雨水滞留能力逐渐恢复<sup>[9-10]</sup>。可见,蒸散发过程决定绿色屋顶雨水滞留能力的恢复,对绿色屋顶的径流调控功能有重要影响。已有研究表明<sup>[11-12]</sup>,绿色屋顶的蒸散发过程因受到基质、植被和气候等因素的综合影响而变化复杂。然而,当前对于绿色屋顶的研究多集中于降雨-径流过程和径流调控效益评估<sup>[9-10, 13-19]</sup>,对不同气候区绿色屋顶蒸散发变化规律的研究较少,一定程度上限制了绿色屋顶水热过程调控效益评估和不同气候区绿色屋顶的推广应用。

绿色屋顶蒸散发量很难直接测定<sup>[11]</sup>,以往研究通常采用实验间接测定<sup>[20]</sup>或模型模拟等方法获取<sup>[15,21-22]</sup>。其中,模型模拟方法被广泛应用于绿色屋顶蒸散发量估计。Li 等<sup>[21]</sup>基于水量平衡研发了模拟绿色屋顶蒸散发的水文模型,但该模型需叶面积指数、消光系数、压力水头以及土壤水分特征曲线参数等多个复杂参数,且计算过程繁琐;Talebi 等<sup>[23]</sup>开发了概念性水文模型并采用该模型模拟分析了8个城市的绿色屋顶蒸散发,但模型缺少实测数据支撑,可靠性有待检验。为精确模拟绿色屋顶蒸散发过程,亟待构建参数少、计算过程简单且实用性强的绿色屋顶水文过程模型。

本研究基于水量平衡原理和 Penman-Monteith 公式构建绿色屋顶水文模型,并采用北京市区搭建实验绿色屋顶 2019 年的蒸散发和气象数据进行模型率定和检验。通过输入不同气候区城市的气象数据,设定不同基质厚度,定量模拟分析不同气候区城市基质厚度对绿色屋顶蒸散发的影响。本研究有望为绿色屋顶蒸散发模拟提供工具,为我国不同气候区城市绿色屋顶的设计提供科学参考。

#### 1 材料与方法

#### 1.1 实验设计

本研究于 2019 年 7—10 月北京市海淀区北京林业大学林业楼楼顶(40°0′5.66″ N, 116°20′39.65″ E)开展绿色屋顶蒸散发过程监测实验。实验区 1970—2018 年年平均降水量为 551 mm(国家气象科学数据中心 http://data.cma.cn/)。

如图 1 所示,绿色屋顶(1 m×1 m)从上到下分别为植被层、基质层、过滤层和排水层。其中,植被层选用绿色屋顶常用植物八宝景天(Sedum spectabile),基质层选用厚度为 8 cm 的轻质生长基 [浮石:草炭土:沸石:碎木屑=4:3:2:1(体积比)],过滤层采用 300 g/m²的聚酯无纺布,排水层使用直径为 1—3.5 cm 的陶粒(厚度为 10 cm)。在绿色屋顶下方安装精确度为 0.1 kg 的称重传感器,用于记录绿色屋顶质量变化(间隔为 1 min)。

此外,使用分辨率为 1 mm 的翻斗式雨量计记录绿色屋顶的产流过程。在雨量计下方放置 250 L 的 HDPE 集水桶,承接绿色屋顶的全部产流。产流结束后,量取集水桶中径流总量,用以校核雨量计监测的绿色屋顶径流过程数据。在距离绿色屋顶 2 m 高处架装小型气象站(HOBO U30),记录实验区降雨、温度、气压、相对湿度和风速等数据。相较于基质质量,绿色屋顶植被每日生长量造成的系统质量变化很小,因此本研究通过称重传感器称量的实验系统质量差确定绿色屋顶日实际蒸散发量。因绿色屋顶早晚有露水凝结现象且夜间蒸散发量较少,本研究采用每日 8:00—17:00 绿色屋顶实际蒸散发量代表当日的实际蒸散发量[24]。

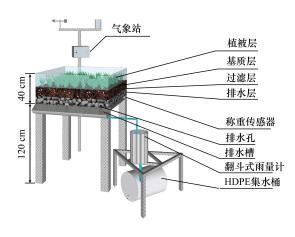


图 1 绿色屋顶结构与监测设施

## 1.2 模型构建 Fig.1 Structure of green roofs and monitoring facilities

本研究基于绿色屋顶水量平衡原理和 Penman-Monteith 公式构建概念性水文模型,该模型包括雨水滞留和蒸散发两个模块。

#### 1.2.1 雨水滞留模块

绿色屋顶雨水滞留过程主要包括植被截留和基质雨水滞留<sup>[9]</sup>。经观测,绿色屋顶的植被截留量较少,且通常可在降雨间隔期蒸发消耗,其雨水截留能力可在次日恢复。当基质含水率低于凋萎系数时,绿色屋顶植被将枯萎。为避免植物枯萎死亡,需适时灌溉以保证基质含水率不低于凋萎系数<sup>[9,25]</sup>。参考前人研究<sup>[23,26]</sup>,可假设当基质含水率达到凋萎系数时,基质层雨水滞留能力达到最大值。

$$S_t = S_{v_{\text{max}}} + (\theta_f - \theta_{t-1})h \tag{1}$$

$$S_{\text{max}} = S_{v_{\text{max}}} + (\theta_f - \theta_w)h \tag{2}$$

式中, $S_t$ 为 t 日基质的雨水滞留能力(mm); $S_{max}$ 为基质最大雨水滞留能力(mm); $S_{vmax}$ 为植被最大截留能力(mm); $\theta_f$ 为基质田间持水量(cm³/cm³); $\theta_w$ 为基质凋萎系数(cm³/cm³); $\theta_t$ 为 t 日的平均基质含水率(cm³/cm³);h 为基质厚度(mm)。

植被截留量受降雨量影响,当降雨量大于植被最大截留能力时,植被截留量等于植被最大截留能力,而当降雨量小于植被最大截留能力时,植被截留量等于降雨量。

$$S_{v_t} = \begin{cases} S_{v_{\text{max}}}; & P_t \geqslant S_{v_{\text{max}}} \\ P_t; & 0 \leqslant P_t < S_{v_{\text{max}}} \end{cases}$$
(3)

式中, $P_t$ 为 t 日的降雨量(mm)。

绿色屋顶初始基质质量由基质干重和初始基质含水率决定:

$$W_{\text{sub}_0} = W_{\text{bulk}} + \rho_w \theta_1 \frac{Oh}{1000} \tag{4}$$

$$W_{\text{bulk}} = \rho_{\text{bulk}} \frac{Oh}{1000} \tag{5}$$

式中, $W_{\text{sub0}}$ 为绿色屋顶初始基质质量(kg);O 为绿色屋顶底面积(m²); $W_{\text{bulk}}$ 为绿色屋顶基质干燥时质量(kg); $\theta_1$ 为初始基质含水率(cm³/cm³); $\rho_w$ 为水的密度,为 1000 kg/m³; $\rho_{\text{bulk}}$ 为基质干密度(kg/m³)。

基于绿色屋顶的水文过程,绿色屋顶在t日的基质质量为:

$$W_{\text{sub}_{t}} = \begin{cases} W_{\text{sub}_{t-1}} - \text{AET}_{t}; & P_{t} = 0\\ W_{\text{sub}_{t-1}} + P_{t} - R_{t} - \text{AET}_{t} - S_{v_{t}}; & P_{t} > 0 \end{cases}$$
(6)

式中, $W_{\text{sub}(-1)}$ 为 t-1 日绿色屋顶的基质质量(kg);AET,为绿色屋顶 t 日的实际蒸散发量(mm)。

绿色屋顶在 t 目的基质体积含水率可由下式计算:

$$\theta_{t} = \frac{W_{\text{sub}_{t}} - W_{\text{bulk}}}{W_{\text{bulk}}} \frac{\rho_{\text{bulk}}}{\rho_{w}} \tag{7}$$

根据水量平衡,绿色屋顶 t 日的径流量由下式计算:

$$R_{t} = \begin{cases} 0; & P_{t} \leq S_{t} + \text{AET}_{t} \\ P_{t} - \text{AET}_{t} - S_{t}; & P_{t} > S_{t} + \text{AET}_{t} \end{cases}$$

$$(8)$$

#### 1.2.2 蒸散发模块

参考作物蒸散发量采用 FAO-56 Penman-Monteith 公式进行计算[27]:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$$
(9)

式中, $ET_0$ 为参考作物蒸散发量(mm/d); $\Delta$  为饱和水汽压—温度曲线斜率(kPa/ $\mathbb{C}$ ); $R_n$ 为作物表面净辐射(MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>);G 为土壤热通量(MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>); $\gamma$  为干湿表常数(kPa/ $\mathbb{C}$ );T 为日平均气温( $\mathbb{C}$ ); $u_2$ 为 2 m 处的日平均风速(m/s); $e_s$ 为饱和水汽压(kPa); $e_a$ 为实际水汽压(kPa)。

除大气参考作物蒸散发外,绿色屋顶实际蒸散发还受植被和基质水分条件影响。参考前人研究<sup>[12,25,28]</sup>,可采用作物系数和土壤可用水函数分别定量表达植被和水分条件影响。绿色屋顶的实际蒸散发量计算如下:

$$AET_{t} = \begin{cases} 0; & \theta \leq \theta_{w} \\ \frac{\theta_{t-1} - \theta_{w}}{\theta_{c} - \theta_{w}} C_{0} ET_{0}; & \theta > \theta_{w} \end{cases}$$

$$(10)$$

式中,C。为作物系数(无量纲),常用于计算绿色屋顶实际蒸散发<sup>[27]</sup>。

#### 1.3 不同气候区城市气候特征

参考柯本气候分区<sup>[29-30]</sup>与 Cuthbert 等的研究方法<sup>[31]</sup>,本文选择兰州、北京、武汉和广州 4 个不同气候区城市作为研究对象,并依据湿润指数将其划分为湿润指数小于 1 的水分限制区(兰州 0.33 和北京 0.51)与湿润指数大于 1 的能量限制区(武汉 1.34 和广州 1.66)。本研究基于 4 个城市 1970—2018 年的日尺度气象数据,包括降雨量、气温、相对湿度、气压、太阳辐射和风速等(数据来源中国气象网 http://www.cma.gov.cn/),进行不同基质厚度八宝景天绿色屋顶实际蒸散发的模拟研究。各城市气候特征见表 1。

表 1 1970—2018 年各气候区典型城市气候特征[29-30]

 $Table\ 1\quad The\ climatic\ characteristics\ of\ selected\ cities\ in\ different\ climatic\ zones\ from\ 1970\ to\ 2018$ 

城市 City	气候 Climate	日平均降水量 Daily average rainfall/mm	日平均气温 Daily average air temperature/℃	日平均相对湿度 Daily average relative humidity/%	日平均太阳辐射 Daily average solar radiation/ (MJ/m²)	湿润指数(P/ET <sub>0</sub> ) Wetness Index
兰州	BSk(冷性草原气候)	0.87	8.59	54.27	16.82	0.33
北京	Dwa(冬干冷温气候)	1.51	12.69	55.38	14.47	0.51
武汉	Cfb(温夏常湿温暖气候)	3.47	16.92	76.68	13.83	1.34
广州	Cwa(热夏冬干暖温气候)	5.00	22.15	76.78	14.24	1.66

P:降雨量 Rainfall volume; ETo:参考作物蒸散发量 Reference crop evapotranspiration

#### 1.4 数据分析

本研究使用 Matlab 2018a 进行模型编程,分别使用 2019 年 7 月 12 日—9 月 5 日和 9 月 6 日—10 月 3 日 的气象数据(降雨量、温度、湿度、压强和风速等)和绿色屋顶蒸散发监测数据对模型参数(基质干密度、作物系数、田间持水量、凋萎系数和植被最大截留量)进行率定和检验。采用决定系数( $R^2$ )和 Nash-Sutcliffe 效率系数(NSE)评估模型模拟效果<sup>[32]</sup>。NSE 效率系数的计算方法如下:

NSE = 1 - 
$$\frac{\sum (AET_o^{\ \prime} - AET_m^{\ \prime})^2}{\sum (AET_o^{\ \prime} - \overline{AET_o})^2}$$
 (11)

式中, $AET_a$ 为绿色屋顶实际蒸散发量实测值(mm); $AET_m$ 为绿色屋顶实际蒸散发量模拟值(mm); $\overline{AET_a}$ 为绿色屋顶实际蒸散发量实测平均值(mm)。

#### 2 结果与分析

#### 2.1 模型率定与检验

本研究基于实验绿色屋顶蒸散发实测数据,对构建的绿色屋顶水文模型参数进行率定和检验,通过率定得到的模型参数值见表 2。模型率定和检验结果见图 2。模型率定和检验期的 Nash-Sutcliffe 效率系数分别为 0.6385 和 0.6014, R<sup>2</sup>分别为 0.7191 和 0.6168,表明模型可较准确模拟绿色屋顶蒸散发量。

表 2 模型率定参数值

Table 2 Calibrated parameter values of the model

绿色屋顶参数 Parameters of green roofs		绿色屋顶参数 Parameters of green roofs	数值 Value
基质干密度 Substrate bulk density/(kg/m³)	600	凋萎系数 Wilting point/(cm³/cm³)	0.05
作物系数 Crop coefficient	0.7	植被最大截留量	2
田间持水量 Field capacity/(cm³/cm³)	0.35	Maximum vegetation interception capacity/mm	

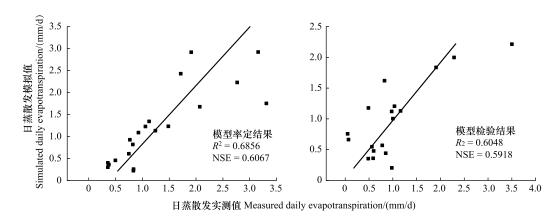


图 2 模型率定和检验结果

Fig.2 Calibration and verification of the model

R<sup>2</sup>;决定系数 Determination Coefficient; NSE; Nash-Sutcliffe 效率系数 Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient

#### 2.2 不同气候区绿色屋顶蒸散发

图 3 对比了北京、广州、武汉和兰州 1970—2018 年日平均降雨量、参考作物蒸散发量和绿色屋顶实际蒸散发量。虽然 4 个城市日均参考作物蒸散发量差异不大(2.58—3.01 mm/d),但绿色屋顶日均实际蒸散发量差异明显,且随日均降雨量增大而增加。广州绿色屋顶(基质厚度为 10 cm)的日均实际蒸散发量最大(1.30 mm/d),依次高于武汉(1.09 mm/d)、北京(0.66 mm/d)和兰州(0.49 mm/d)。降雨量越大的城市绿色屋顶实际蒸散发量越大,这与 Talebi<sup>[23]</sup>等的研究结果一致。除降雨量外,各城市不同量级降雨日数的分布特征也是影响绿色屋顶蒸散发量的重要因素。兰州和北京降雨日数较少,约 80%的日数为无降雨日(图 4),绿色屋顶基质含水率因长时间得不到降雨补给而处于相对较低水平,水源不足限制了绿色屋顶蒸散发<sup>[23]</sup>,因此,这两个城市绿色屋顶实际蒸散发长时间保持在较低水平(0—1 mm/d),两个城市绿色屋顶蒸散发量超过 1 mm 的

日数分别只有 18%和 25%(图 4)。而广州的降雨日数最多,占比为 41%(图 4),频繁降雨经常性供给水分,绿色屋顶蒸散发量超过 1 mm 的日数接近 60%,为 4 个城市最高值(图 4)。降雨是无灌溉绿色屋顶蒸散发主要水分来源。广州雨量最大且降雨日数最多,降雨对绿色屋顶水分补给量大且补给频繁,使得绿色屋顶基质含水率长时间维持在较高水平,因此,广州绿色屋顶雨水供给充足,蒸散发量最大[26]。然而,北京和兰州降雨量较少且无降雨日数较多,绿色屋顶基质含水率因长时间得不到降雨充分补给而处于较低水平,限制了绿色屋顶蒸散发,因此,北京和兰州绿色屋顶的日均蒸散发量较低。

#### 2.3 基质厚度对绿色屋顶蒸散发的影响

如图 5,北京、广州、武汉和兰州绿色屋顶实际蒸散发量均随基质厚度增加而增大。基质越厚的绿色屋顶最大雨水滞留能力越大<sup>[9]</sup>,基质中储存的可供蒸散发的水量越多,因此,绿色屋顶实际蒸散发量均随基质厚度增加而增大。由图 6 可见,在相同气象条件下,随着

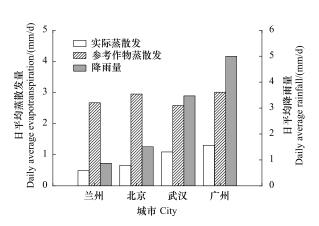


图 3 不同城市 1970—2018 年日平均降雨量、绿色屋顶参考作物蒸散发量和实际蒸散发量

Fig.3 Daily average rainfall, reference crop evapotranspiration, and actual evapotranspiration of green roofs in different cities from 1970 to 2018

绿色屋顶实际蒸散发量以基质厚度为 10 cm 的八宝景天绿色屋顶 为例

基质厚度增加,绿色屋顶基质含水率波动幅度变小且维持在相对较高水平,基质水分对实际蒸散发的限制较小,实际蒸散发量较大<sup>[33—34]</sup>,因此增加基质厚度可以提高绿色屋顶的实际蒸散发量。值得注意的是,当基质厚度超过一定限度时,绿色屋顶实际蒸散发量增加的趋势减缓。当兰州、北京、武汉和广州绿色屋顶基质厚度分别超过 10 cm、17 cm、24 cm 和 25 cm 时,绿色屋顶的实际蒸散发量增加不明显,日均实际蒸散发量随基质厚度增长速率均小于 0.01 mm/cm。由此可见,基质厚度对绿色屋顶实际蒸散发量的影响存在阈值,且不同气候区绿色屋顶基质厚度阈值不同。当基质厚度为 50 cm 时,广州绿色屋顶 1970—2018 年日平均实际蒸散发量阈值为 1.73 mm/d,依次高于武汉(1.49 mm/d)、北京(0.95 mm/d)和兰州(0.58 mm/d),可见不同气候区城市的绿色屋顶日平均实际蒸散发量也存在不同阈值。

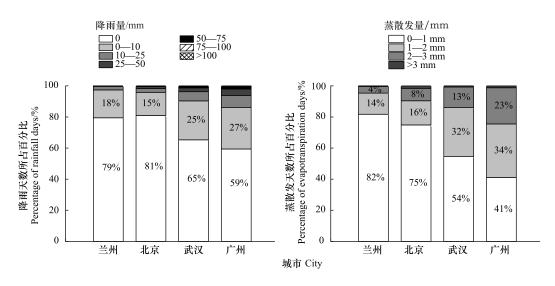


图 4 不同气候区城市 1970—2018 年不同量级降雨量和蒸散发量日数分布

Fig.4 Daily distributions of different levels of rainfall and actual evapotranspiration from green roofs at different cities from 1970 to 2018

#### 3 讨论

#### 3.1 气候因素对绿色屋顶蒸散发的影响

本研究结果表明,不同气候区城市相同基质厚度绿色屋顶的日平均实际蒸散发量呈现兰州<北京<武汉<广州的规律。太阳辐射为绿色屋顶蒸散发提供能量<sup>[11,27,35]</sup>,当水分充足时,太阳辐射越强,绿色屋顶蒸散发量越大。相对湿度低的环境饱和水汽压差较大,从而提高绿色屋顶蒸散发<sup>[36—37]</sup>。在所选 4 个气候区城市中,尽管兰州的日平均太阳辐射最大且相对湿度最小(表 1),但兰州绿色屋顶的实际蒸散发量仍最低。这是由于在无灌溉条件下,绿色屋顶基质含水率主要受降水影响。兰州降水量明显低于北京、武汉和广州(图 3),且无降雨日数比例接近 80%(图 4),导致绿色屋顶基质含水率因长时间得不到降雨充分补给而处于较低水平,

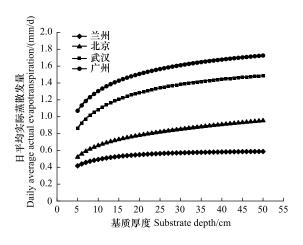


图 5 各城市不同基质厚度绿色屋顶日平均实际蒸散发量 Fig.5 The daily average actual evapotranspiration of green roofs with different substrate depths in 4 cities

制约了绿色屋顶的蒸散发过程<sup>[23,26,38]</sup>。北京日平均相对湿度较武汉和广州低且日平均太阳辐射与武汉和广州相差不大,但较低的降水量(图3)和较高的无降雨日数比例(图4)仍易限制绿色屋顶的实际蒸散发量。广州和武汉的日平均太阳辐射和相对湿度相差较小,但广州的日平均气温明显高于武汉,两地相差 5.23℃。因为高温可以加快绿色屋顶周围水汽分子扩散速度<sup>[34]</sup>,加之广州降雨量较武汉多,所以广州绿色屋顶实际蒸散发量高于武汉。

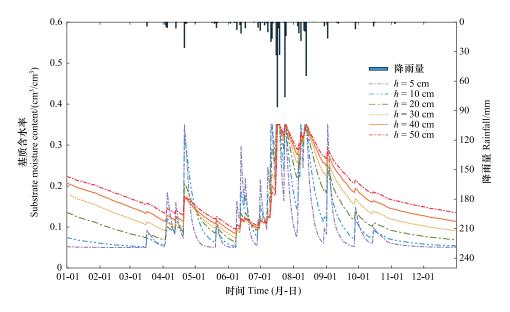


图 6 2018 年北京不同基质厚度绿色屋顶基质含水率变化过程

Fig.6 The substrate moisture content process of green roofs with different substrate depth in Beijing in 2018 h:绿色屋顶基质厚度 Substrate depth of green roofs

#### 3.2 基质厚度对不同气候区绿色屋顶蒸散发的影响

本研究结果表明,基质厚度对绿色屋顶实际蒸散发量的影响存在阈值,绿色屋顶实际蒸散发量也存在阈值且不同气候区城市阈值不同(图 5)。Budyko<sup>[39]</sup>理论表明,蒸散发主要受能量和水源两方面因素影响。大气相对湿度和水汽扩散条件也会影响实际蒸散发过程,而大气相对湿度和水汽扩散条件在很大程度上也取决

于区域气候条件下的能量和降水特征。因此,蒸散发存在阈值的根本原因是能量输入或水分来源限制[40]。 当降水充足时,能量是限制蒸散发的主要因素;降水较少时,水源供给状况则是限制蒸散发的主要因素[40]。 绿色屋顶的蒸散发也遵循能量或水分限制规律。基质厚度增加对绿色屋顶蒸散发影响存在阈值主要有以下 两种机制:其一,在降水充足的气候条件下,增加基质厚度,可提升绿色屋顶雨水滞留能力和雨水滞留量,为绿 色屋顶蒸散发提供充足的水分来源,但绿色屋顶的蒸散发量因能量输入限制而存在一定阈值,并不会随着基 质厚度的增加而无限升高;其二,在干旱或半干旱气候条件下,增加基质厚度,虽可提升绿色屋顶雨水滞留能 力,但因降水较少,绿色屋顶实际可滞留的雨水量存在阈值,绿色屋顶的蒸散发量因水分来源限制而存在一定 阈值,同样不会随着基质厚度的增加而无限升高。由表1湿润指数可知,兰州和北京是水分限制区,参考作物 蒸散发量高,但降水较少。尽管增加基质厚度提高了绿色屋顶的最大雨水滞留能力[9,17,26],但供给绿色屋顶 蒸散发的水分有限,因而限制了这两个城市绿色屋顶的蒸散发。武汉和广州等是能量限制区,降水多,但参考 作物蒸散发量有限。绿色屋顶基质较薄时,基质雨水滞留量较少,蒸散发所需消耗的能量也较少。当基质厚 度逐渐增加,绿色屋顶滞留的雨水增加,蒸散发所需的能量供给不足,导致绿色屋顶蒸散发受到限制。如表 1,广州的日平均太阳辐射和日均气温(分别为 14.24 MJ/m²和 22.15℃)均高于武汉,即广州绿色屋顶蒸散发 的能量限制阈值高于武汉(分别为 13.83 MJ/ $m^2$ 和 16.92 $^{\circ}$ ),且广州降雨充足(日均降雨量 5.00 mm),因此, 广州绿色屋顶日平均蒸散发量阈值高于武汉。综上,不同气候区城市绿色屋顶日平均蒸散发量存在阈值,且 广州绿色屋顶日平均蒸散发量阈值依次高于武汉、北京和兰州。

#### 3.3 建议与展望

本研究基于 4 个气候区代表性城市(兰州、北京、武汉和广州)的气象数据,模拟分析 4 个城市的绿色屋顶蒸散发变化特征。结果表明,在房屋结构承重允许的情况下,可通过适当增加基质厚度的方式提高绿色屋顶实际蒸散发量,进而提升绿色屋顶的雨水滞留效益。此外,在降水较少的兰州,绿色屋顶基质含水率一年中有较长时段处于接近凋萎系数水平,表明植被生长易受水分限制,需要对绿色屋顶进行适时灌溉以维持植被生长。

考虑绿色屋顶基质饱和导水率较高(3—118.8 mm/min)<sup>[9]</sup>且具有排水层,因此,本文构建水文模型的雨水滞留模块并未考虑基质含水率高于田间持水量的情景。为保证绿色屋顶植物的生长,在干旱气候条件下需要对绿色屋顶进行灌溉以避免因基质含水率低于凋萎系数而造成植物枯萎,因此,该模型的雨水滞留模块未考虑基质含水率低于凋萎系数的情景。然而,在基质透水率较低、无排水层或排水层排水不畅的情况下,绿色屋顶基质含水率可能会高于田间持水量,且在干旱气候条件下绿色屋顶基质含水率可能会低于凋萎系数。由于仅考虑基质含水率在田间持水量和凋萎系数之间的动态变化,该模型不适用于因基质透水率较低、无排水层或排水层排水不畅导致霍顿产流过程的模拟,也不适用于极端干旱情况下绿色屋顶植被凋萎后基质蒸发模拟。此外,不同气候条件下绿色屋顶植被生长状况不同,作物系数存在差异,且作物系数在不同植被生长阶段也呈动态变化。未来研究中,根据不同气候条件和不同生长阶段,动态调整作物系数,有望提升绿色屋顶蒸散发过程模拟精度。可在不同气候区布设对比观测实验,对比分析不同气候条件对绿色屋顶植被生长特征和蒸散发过程影响,并在此基础上进一步优化绿色屋顶雨水滞留和蒸散发过程模拟,以满足不同气候区城市绿色屋顶设计的实际需求。

#### 4 结论

本研究构建绿色屋顶水文模型对不同气候区城市不同基质厚度的绿色屋顶蒸散发进行模拟分析,得到以下结论:

- 1)本研究构建的绿色屋顶水文模型能较准确模拟绿色屋顶蒸散发量,率定与检验期的 Nash-Sutcliffe 效率系数分别为 0.6385 和 0.6014,决定系数( $R^2$ )分别为 0.7191 和 0.6168;
  - 2)从半干旱区(兰州)、半湿润区(北京)到湿润区(武汉和广州),相同基质厚度绿色屋顶的日平均实际

#### 蒸散发量呈增加趋势;

3)增加基质厚度可提高绿色屋顶实际蒸散发量,但增加基质厚度对绿色屋顶日平均实际蒸散发量的影响存在阈值,且不同气候区城市绿色屋顶日平均实际蒸散发的阈值不同。兰州、北京、武汉和广州绿色屋顶的基质厚度阈值分别为 10 cm、17 cm、24 cm 和 25 cm,广州绿色屋顶日平均实际蒸散发量的阈值依次高于武汉、北京和兰州。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Zhou X F, Chen H. Impact of urbanization-related land use land cover changes and urban morphology changes on the urban heat island phenomenon. Science of the Total Environment, 2018, 635; 1467-1476.
- [2] Mustafa A, Bruwier M, Archambeau P, Erpicum S, Pirotton M, Dewals B, Teller J. Effects of spatial planning on future flood risks in urban environments. Journal of Environmental Management, 2018, 225: 193-204.
- [ 3 ] Darnthamrongkul W, Mozingo L A. Toward sustainable stormwater management; understanding public appreciation and recognition of urban Low Impact Development (LID) in the San Francisco Bay Area. Journal of Environmental Management, 2021, 300; 113716.
- [4] Chang H J, Makido Y, Foster E. Effects of land use change, wetland fragmentation, and best management practices on total suspended solids concentrations in an urbanizing Oregon watershed, USA. Journal of Environmental Management, 2021, 282: 111962.
- [5] Ellis J B, Lundy L. Implementing sustainable drainage systems for urban surface water management within the regulatory framework in England and Wales. Journal of Environmental Management, 2016, 183: 630-636.
- [ 6 ] Yue T J, Zhang S H, Zhang J J, Zhang B, Li R X. Variation of representative rainfall time series length for rainwater harvesting modelling in different climatic zones. Journal of Environmental Management, 2020, 269; 110731.
- [7] Czemiel Berndtsson J. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: a review. Ecological Engineering, 2010, 36 (4): 351-360.
- [8] 范俊鹏. 海绵城市理论下的沣西新城绿色屋顶设计研究. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- [ 9 ] Zhang S H, Guo Y P. Analytical probabilistic model for evaluating the hydrologic performance of green roofs. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18(1): 19-28.
- [10] Ahiablame L M, Engel B A, Chaubey I. Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research. Water, Air & Soil Pollution, 2012, 223(7): 4253-4273.
- [11] Cascone S, Coma J, Gagliano A, Pérez G. The evapotranspiration process in green roofs: a review. Building and Environment, 2019, 147: 337-355.
- [12] Jahanfar A, Drake J, Sleep B, Gharabaghi B. A modified FAO evapotranspiration model for refined water budget analysis for Green Roof systems. Ecological Engineering, 2018, 119; 45-53.
- [13] 葛德, 张守红. 不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益影响. 环境科学, 2018, 39(11): 5015-5023.
- [14] 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. 中国水土保持科学, 2019, 17(3): 31-38.
- [15] Liu W, Feng Q, Chen W P, Wei W, Deo R C. The influence of structural factors on stormwater runoff retention of extensive green roofs: new evidence from scale-based models and real experiments. Journal of Hydrology, 2019, 569; 230-238.
- [16] Liu W, Engel B A, Feng Q. Modelling the hydrological responses of green roofs under different substrate designs and rainfall characteristics using a simple water balance model. Journal of Hydrology, 2021, 602: 126786.
- [ 17] Zhang S H, Lin Z X, Zhang S X, Ge D. Stormwater retention and detention performance of green roofs with different substrates: Observational data and hydrological simulations. Journal of Environmental Management, 2021, 291; 112682.
- [18] Barnhart B, Pettus P, Halama J, McKane R, Mayer P, Djang K, Brookes A, Moskal L M. Modeling the hydrologic effects of watershed-scale green roof implementation in the Pacific Northwest, United States. Journal of Environmental Management, 2021, 277: 111418.
- [19] Ebrahimian A, Wadzuk B, Traver R. Evapotranspiration in green stormwater infrastructure systems. Science of the Total Environment, 2019, 688: 797-810.
- [20] Arboit N K S, Tassi R, Liberalesso T, Ceconi D E, Piccili D G A. Green roof evapotranspiration rates and stormwater control under subtropical climate; a case study in Brazil. RBRH, 2021, 26; 2318-0331.
- [21] Li S X, Qin H P, Peng Y N, Khu S T. Modelling the combined effects of runoff reduction and increase in evapotranspiration for green roofs with a storage layer. Ecological Engineering, 2019, 127: 302-311.
- [22] Limos A G, Mallari K J B, Baek J, Kim H, Hong S, Yoon J. Assessing the significance of evapotranspiration in green roof modeling by SWMM.

- Journal of Hydroinformatics, 2018, 20(3): 588-596.
- [23] Talebi A, Bagg S, Sleep B E, O'Carroll D M. Water retention performance of green roof technology: a comparison of Canadian climates. Ecological Engineering, 2019, 126: 1-15.
- [24] Xu J Z, Liu X Y, Yang S H, Qi Z M, Wang Y J. Modeling rice evapotranspiration under water-saving irrigation by calibrating canopy resistance model parameters in the Penman-Monteith equation. Agricultural Water Management, 2017, 182: 55-66.
- [25] Viola F, Hellies M, Deidda R. Retention performance of green roofs in representative climates worldwide. Journal of Hydrology, 2017, 553: 763-772.
- [26] Yan J, Zhang S H, Zhang S X, Zhang C Y, Yang H, Wang R Z Y, Wei L Y. Stormwater retention performance of green roofs with various configurations in different climatic zones. Journal of Environmental Management, 2022, 319; 115447.
- [27] Allen R G. Crop evapotranspiration; guidelines for computing crop water requirements. Rome; Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [28] Poë S, Stovin V, Berretta C. Parameters influencing the regeneration of a green roof's retention capacity via evapotranspiration. Journal of Hydrology, 2015, 523: 356-367.
- [29] Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B, Rubel F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorologische Zeitschrift, 2006, 15(3): 259-263.
- [30] 王婷,周道玮,神祥金,范高华,张慧. 中国柯本气候分类. 气象科学, 2020, 40(6): 752-760.
- [31] Cuthbert M O, Rau G C, Ekström M, O'Carroll D M, Bates A J. Global climate-driven trade-offs between the water retention and cooling benefits of urban greening. Nature Communications, 2022, 13(1): 518.
- [32] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I—a discussion of principles. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290.
- [33] Bevilacqua P, Coma J, Pérez G, Chocarro C, Juúrez A, Solé C, De Simone M, Cabeza L F. Plant cover and floristic composition effect on thermal behaviour of extensive green roofs. Building and Environment, 2015, 92: 305-316.
- [34] He Y, Yu H, Ozaki A, Dong N N, Zheng S L. Influence of plant and soil layer on energy balance and thermal performance of green roof system. Energy, 2017, 141: 1285-1299.
- [35] Tabares-Velasco P C, Srebric J. A heat transfer model for assessment of plant based roofing systems in summer conditions. Building and Environment, 2012, 49: 310-323.
- [36] 芮孝芳. 水文学原理. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [37] Jim C Y, Peng L L H. Substrate moisture effect on water balance and thermal regime of a tropical extensive green roof. Ecological Engineering, 2012, 47: 9-23.
- [38] 杨泽龙,李艳忠,白鹏,杜深文,郝奕,钱畅,李超凡. 1980—2020 年中国九大流域蒸散发及其组分时空评估. 地球信息科学学报, 2022, 24 (5); 889-901.
- [39] Budyko M I. Climate and life. New York: Academic Press, 1974.
- [40] Chen Q W, Liu M J, Lyu J L, Li G Q, Otsuki K, Yamanaka N, Du S. Characterization of dominant factors on evapotranspiration with seasonal soil water changes in two adjacent forests in the semiarid Loess Plateau. Journal of Hydrology, 2022, 613: 128427.