

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.15.020

# 简单式绿色屋顶滞留效果模拟准确性的影响因素

张郁媛<sup>1,2</sup>, 宫永伟<sup>1</sup>, 何松<sup>3</sup>, 张贤巍<sup>4</sup>, 王文海<sup>1</sup>, 张紫阳<sup>1</sup>

(1. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 中铁第五勘察设计院集团有限公司, 北京 102600; 3. 深圳市城市规划设计研究院股份有限公司, 广东 深圳 518028; 4. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

**摘要:** 为分析简单式绿色屋顶模型模拟的准确性,基于降雨和径流监测数据模拟了不同构造的简单式绿色屋顶装置,研究了影响模拟准确性的因素。结果表明,装置构造、模拟连续性和降雨特征是影响简单式绿色屋顶滞留效果模拟准确性的主要因素。基质种类和规模不同的简单式绿色屋顶装置模型参数不能相互转移;基质种类相同但层厚度不同的装置模型参数可以相互转移,模拟准确性较好;采用不同排水层材料的装置模型参数具有良好的可转移性。简单式绿色屋顶在连续降雨条件下的模拟准确性优于单场次降雨条件。另外,降雨历时对模拟准确性有一定影响,较长的降雨历时可以提高模拟准确性。

**关键词:** 简单式绿色屋顶; 参数取值; 滞留效果; SWMM; 模拟准确性

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)15-0132-07

## Factors Affecting Simulation Accuracy of Extensive Green Roof Retention Performance

ZHANG Yu-yuan<sup>1,2</sup>, GONG Yong-wei<sup>1</sup>, HE Song<sup>3</sup>, ZHANG Xian-wei<sup>4</sup>,  
WANG Wen-hai<sup>1</sup>, ZHANG Zi-yang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. China Railway Fifth Survey and Design Institute Group Co. Ltd., Beijing 102600, China; 3. Urban Planning and Design Institute of Shenzhen, Shenzhen 518028, China; 4. CCCC Water Transportation Consultants Co. Ltd., Beijing 100007, China)

**Abstract:** This paper simulated the extensive green roof devices with different structures based on rainfall and runoff monitoring data, and investigated the factors affecting the simulation accuracy, so as to analyze the simulation accuracy of extensive green roof model. The device structure, simulation continuity and rainfall characteristics were the main factors affecting the simulation accuracy of the retention performance. The model parameters of extensive green roof devices with different substrate types and scales could not be transferred to each other. The model parameters of devices with the same substrate type but different layer thickness could be transferred to each other, and better simulation accuracy could

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51879004); 北京建筑大学市属高校基本科研业务费专项资金资助项目(X20160)

通信作者: 宫永伟 E-mail: gongyongwei@163.com

be obtained. The model parameters of the devices with different drainage layer materials had good transferability. The simulation accuracy of extensive green roof in continuous rainfall scenarios was better than that in single rainfall scenarios. In addition, rainfall duration had a certain influence on the simulation accuracy, and the longer rainfall duration improved the simulation accuracy.

**Key words:** extensive green roof; parameter value; retention performance; SWMM; model simulation accuracy

绿色屋顶作为一种典型的低影响开发设施,可以有效减少城市降雨径流和缓解径流污染<sup>[1]</sup>。绿色屋顶可以分为简单式和花园式两大类,简单式绿色屋顶主要利用草坪和地被植物对屋顶进行简单绿化,通常不设园林小品设施。近年来关于绿色屋顶滞留效果的研究逐渐成为热点,评估绿色屋顶的滞留效果可以对未来的规划和建设进行指导<sup>[2]</sup>。目前绿色屋顶滞留效果的模拟研究主要利用SWMM、HYDRUS-1D、MIKE URBAN、HELP等模型<sup>[3-4]</sup>。SWMM是基于物理的开源动态降雨径流模拟模型<sup>[5]</sup>,与其他模型相比其应用更为广泛,并且能够反映几种常用模型准确性的总体情况。

模型模拟的准确性受到多种因素的影响,如模型本身的缺陷或限制条件、模型参数的不确定性和模型概化误差等。简单式绿色屋顶滞留效果模拟准确性的影响因素分为内部因素和外部因素,内部因素主要包括模型构造、模型参数取值和模拟连续性等,外部因素主要包括气候条件和降雨特征等,这些因素会导致简单式绿色屋顶的模拟结果不能较理想地反映实际情况,进而影响基于模型所设计的方案以及方案评价的准确性。而现有研究缺少对不同装置构造的简单式绿色屋顶参数取值的讨论,同时对建模工具模拟准确性的影响因素分析不足,无法确定模拟准确性与各类因素之间的相关性,因此很难总结出可以较为准确模拟绿色屋顶滞留效果的情况<sup>[6]</sup>。鉴于此,笔者基于简单式绿色屋顶试验装置的降雨和径流监测数据,分析绿色屋顶模型参数敏感性并进行参数的率定验证,在此基础上讨论不同构造的简单式绿色屋顶模型参数取值,研究装置构造、模拟连续性和降雨特征对简单式绿色屋顶装置模拟准确性的影响。

1 材料与方法

1.1 试验场地和装置

研究区域位于北京市大兴区,年平均气温约为

12℃,年平均降雨量为626 mm。试验场地为北京建筑大学大兴校区雨水实验室屋顶,采用7个聚乙烯材质的简单式绿色屋顶装置,内部长度为50~150 cm,高度为24~34 cm。每个装置从上至下依次为植物层(佛甲草)、基质层、过滤层和排水层。装置如图1所示,结构特征和参数见表1。



图1 简单式绿色屋顶试验装置

Fig.1 Experimental device of extensive green roof

表1 简单式绿色屋顶试验装置结构信息

Tab.1 Information of extensive green roof device

装置编号	尺寸(长×宽)/(m×m)	基质种类	基质层厚度/mm	排水层种类
TID-R-100-0.5	0.5×0.5	改良土	100	塑料凹凸排水板
TID-R-100-1.0	1.0×1.0	改良土	100	塑料凹凸排水板
TID-R-100-1.5	1.5×1.5	改良土	100	塑料凹凸排水板
TUD-E-100-0.5	0.5×0.5	超轻量基质	100	塑料凹凸排水板
TID-E-150-0.5	0.5×0.5	改良土	150	塑料凹凸排水板
TID-E-200-0.5	0.5×0.5	改良土	200	塑料凹凸排水板
TIC-R-100-0.5	0.5×0.5	改良土	100	陶粒

## 1.2 降雨数据选取

试验于2017年7月4日—8月13日开展,其间共监测到13场天然降雨事件,降雨特征见表2。

表2 试验期间监测到的天然降雨事件特征

Tab.2 Monitoring natural rainfall event characteristics during the experiment

降雨日期	降雨历时/min	雨前干期/d	降雨量/mm	平均降雨强度/(mm·min <sup>-1</sup> )
2017-07-04	498	8.4	24.4	0.05
2017-07-06	434	2.1	18.8	0.04
2017-07-07	10	1.2	4.4	0.44
2017-07-14	625	6.9	8.4	0.01
2017-07-18	200	2.9	8.0	0.04
2017-07-20	133	2.1	14.6	0.11
2017-07-21	284	0.3	3.8	0.01
2017-07-26	197	4.8	4.0	0.02
2017-08-02	198	6.4	37.2	0.19
2017-08-05	23	1.9	13.2	0.57
2017-08-11	697	6.1	9.8	0.01
2017-08-12	710	0.7	5.2	0.01
2017-08-13	1 178	0.8	15.4	0.01

## 1.3 评价指标及计算方法

利用Morris分类筛选法对模型的输入参数进行敏感性分析<sup>[7]</sup>,以10%为固定步长,对单一参数进行扰动,在保持所有其他参数不变的情况下,在其原始值的30%范围内调整每个参数。参数的灵敏度判别因子取多次扰动计算出的摩尔斯系数的平均值。对模型参数的灵敏度 $S$ 进行分级,具体的分级标准如下:0≤| $S$ |<0.05为不敏感参数、0.05≤| $S$ |<0.2为中敏感参数、0.2≤| $S$ |<1为敏感参数、| $S$ |≥1为高敏感参数。

利用雨水径流滞留率对简单式绿色屋顶的径流调控能力进行评价,选取决定系数( $R^2$ )和纳什效率系数( $E_{NS}$ )作为模型准确性的评价指标,两个指标数值越接近1,代表模拟准确性越高。

## 2 结果与分析

### 2.1 参数敏感性分析结果

通过敏感性分析找出对简单式绿色屋顶装置模拟结果影响较为显著的参数,可以减少参数率定和验证的工作量,提高模型模拟的准确性。采用北京市大兴区2年一遇的2h设计降雨作为模型输入的边界条件,进行绿色屋顶关键参数的敏感性分析。分别将不同装置构造的简单式绿色屋顶径流

量作为敏感性分析的评价指标,对模型的输入参数进行敏感性分析并排序。由于基质层厚度参数根据简单式绿色屋顶试验装置实际情况进行设置,因此未直接对该参数进行灵敏度计算。

敏感性分析结果如图2所示。可知,简单式绿色屋顶装置径流量的参数敏感性排序为:Initially Saturated>Field Capacity>Conductivity>Conductivity Slope>Porosity>Wilting Point>Suction Head, Surface Roughness、Void Fraction和Roughness三个参数的灵敏度均为0。其中Initially Saturated和Field Capacity为敏感参数,Conductivity、Conductivity Slope和Porosity为中敏感参数,其余均为不敏感参数。该结果与之前的研究结果<sup>[4]</sup>基本一致。

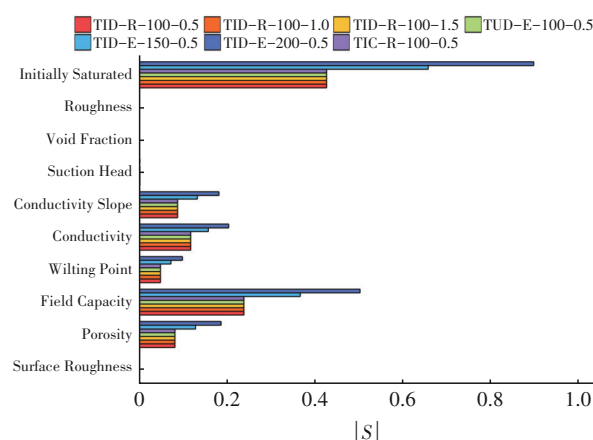


图2 简单式绿色屋顶关键参数的敏感性分析

Fig.2 Sensitivity analysis of key parameters of extensive green roof

### 2.2 模型参数率定和验证

模型参数率定选取2017年8月5日的实测降雨和出流数据,参数验证选取2017年8月13日的实测降雨和出流数据,参数率定期间 $R^2$ 范围为0.60~0.85、 $E_{NS}$ 范围为0.53~0.81,参数验证期间 $R^2$ 范围为0.51~0.83、 $E_{NS}$ 范围为0.51~0.85。总体而言,构建的模型能够较好地反映出不同类型简单式绿色屋顶装置的出流情况,可用于后续长期降雨的模拟分析。

选取2017年天然降雨和监测径流数据对简单式绿色屋顶进行连续降雨模拟,分别使用与单场次降雨模拟相同的参数进行模型参数的验证。图3比较了简单式绿色屋顶在13次降雨事件中的实测和模拟径流总量。可知,所有装置的 $R^2$ 值均高于0.85、 $E_{NS}$ 值均高于0.70,说明相较于单场次降雨模

拟,简单式绿色屋顶在长期降雨事件模拟中的径流量和实测值之间具有更好的一致性。SWMM 模拟虽然低估了大部分装置的累积径流量,但模拟累积径流量与实测数据非常接近。

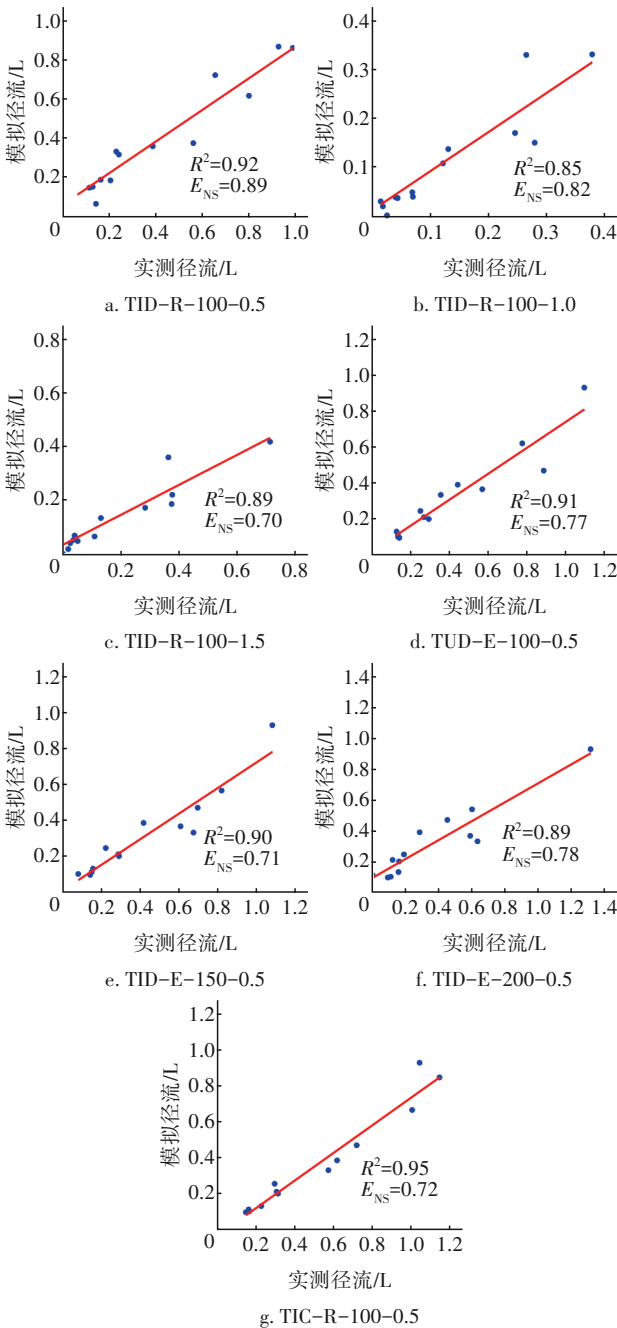


图3 简单式绿色屋顶实测和模拟径流量对比  
Fig.3 Comparison between observed and simulated runoff of extensive green roof

2.3 模拟准确性的影响因素分析

2.3.1 装置构造对模拟准确性的影响

通过对装置构造不同的简单式绿色屋顶模型

进行参数率定和验证,获得相似且具有可转移的参数,可以进一步用于缺少试验数据的绿色屋顶模拟。本研究根据参数敏感性分析结果,选取6个较为敏感的参数进行参数取值和可转移性分析,将7个简单式绿色屋顶装置的模型参数分为A~G共7组,如表3所示。所有参数均在SWMM模型合理设定范围内。

表3 SWMM率定选择的参数值

Tab.3 Parameters chosen for calibration in SWMM

参数	A	B	C	D	E	F	G
Porosity	0.50	0.48	0.58	0.50	0.51	0.54	0.50
Field Capacity	0.42	0.30	0.32	0.43	0.43	0.43	0.40
Wilting Point	0.02	0.05	0.07	0.09	0.05	0.03	0.10
Conductivity/(mm·h <sup>-1</sup> )	509.3	605.6	395.8	460.4	788.9	828.3	963.1
Conductivity Slope	47.7	19.5	12.8	59.2	47.5	34.6	44.4
Initially Saturated/%	83.8	35.8	39.7	82.1	82.8	75.0	73.1

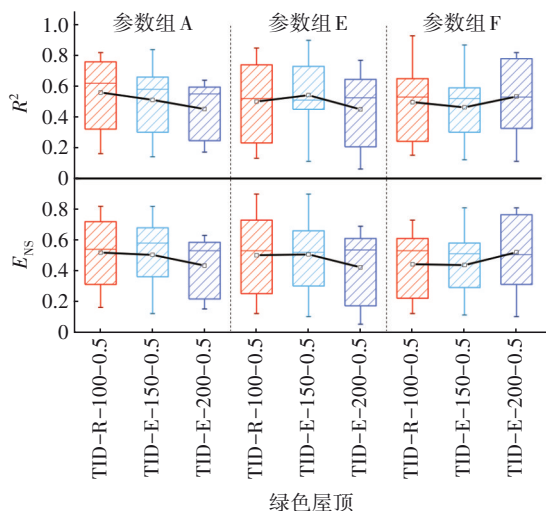
将7组模型参数分为4种情况,分析装置构造对滞留效果模拟准确性的影响,验证简单式绿色屋顶模型参数在基质层厚度、基质层种类、排水层种类和装置规模等不同条件下是否具有可转移性。利用不同参数组在2017年13场天然降雨事件下对7个简单式绿色屋顶试验装置进行模拟,评价结果如图4所示。

图4(a)为利用A、E、F三组参数值模拟不同基质层厚度的简单式绿色屋顶的准确性结果。可知,TID-R-100-0.5和TID-E-150-0.5装置对应的参数组A和E可以相互转移,模拟准确性较好;在TID-E-200-0.5获得的参数组F不能转移到其他装置中。TID-R-100-0.5和TID-E-150-0.5装置使用参数组F模拟后, $R^2$ 平均值分别为0.49和0.46, $E_{NS}$ 平均值分别为0.44和0.43。但也有部分场次降雨下的 $R^2$ 和 $E_{NS}$ 值大于0.50。

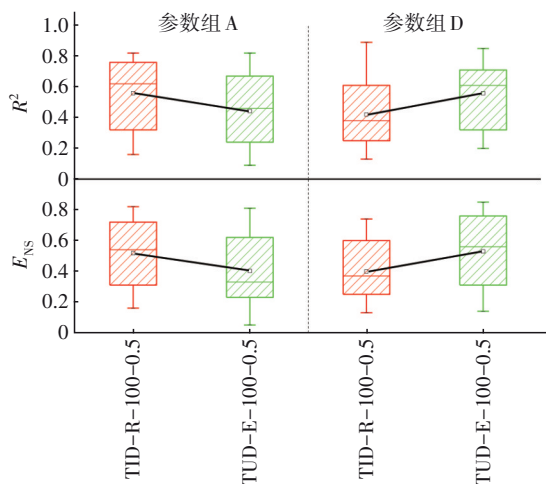
图4(b)为利用A和D两组参数值模拟不同基质层种类的简单式绿色屋顶的准确性结果。可知,TUD-E-100-0.5采用参数组A模拟后, $R^2$ 和 $E_{NS}$ 的平均值分别为0.44和0.40;TID-R-100-0.5采用参数组D模拟后, $R^2$ 和 $E_{NS}$ 的平均值分别为0.42和0.39,说明不同基质层种类的简单式绿色屋顶模型



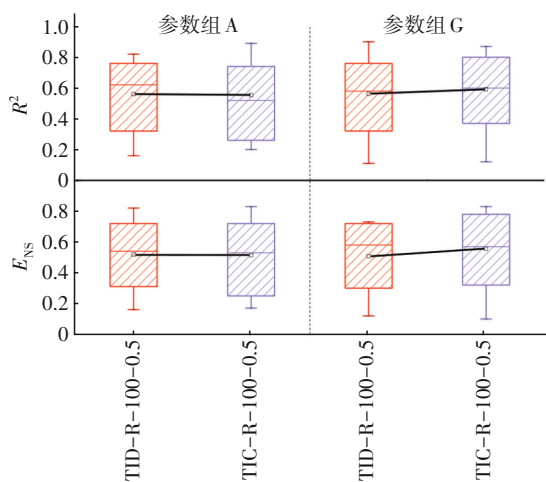
参数不能相互转移,需各自进行参数率定和验证后才能达到良好的滞留模拟效果。



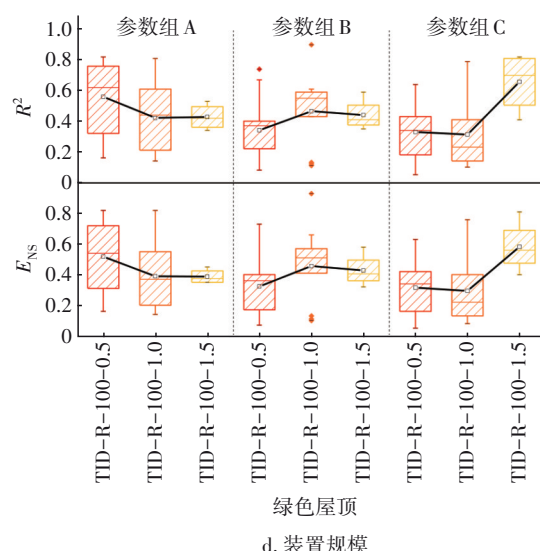
a. 基层厚度



b. 基层种类



c. 排水层种类



d. 装置规模

图4 不同构造的简单式绿色屋顶在不同参数组下的模拟准确性结果

Fig.4 Simulation accuracy results of extensive green roofs with different device structures under different parameter groups

图4(c)为利用A和G两组参数值模拟不同排水层种类的简单式绿色屋顶的准确性结果。可知,采用塑料凹凸排水板和陶粒的简单式绿色屋顶装置具有良好的模型参数可转移性。参数组A和G可以反映出TID-R-100-0.5和TIC-R-100-0.5装置的滞留效果,但是否适用于其他排水层材料的简单式绿色屋顶仍需进一步研究。

图4(d)为利用A、B、C三组参数值模拟不同装置规模的简单式绿色屋顶的准确性结果。可知,不同装置规模的简单式绿色屋顶装置表现出较差的参数可转移性,TID-R-100-1.0和TID-R-100-1.5装置使用TID-R-100-0.5装置对应的参数组A模拟后, $R^2$ 的平均值分别为0.42和0.43, $E_{NS}$ 的平均值分别为0.39和0.38;使用参数组B模拟后,TID-R-100-0.5和TID-R-100-1.5装置的 $R^2$ 平均值下降了39.15%和33.08%, $E_{NS}$ 平均值下降了37.59%和26.61%;使用参数组C模拟后,TID-R-100-0.5和TID-R-100-1.0装置的 $R^2$ 平均值下降了41.07%和32.89%, $E_{NS}$ 平均值下降了39.67%和35.58%。其原因可能是三组参数中Initially Saturated这一参数相差较大,而绿色屋顶模拟的滞留效果主要受基质Initially Saturated的影响<sup>[8]</sup>。

### 2.3.2 模拟连续性对模拟准确性的影响

SWMM 可以进行单场次降雨模拟和连续降雨

模拟,二者在实际工程中的指导意义不同,均具有一定的参考价值。利用13场单场次降雨事件和2017年连续性降雨模拟分析连续性对简单式绿色屋顶模拟准确性的影响,评价结果如图5所示。可知,所有装置在单场次降雨模拟中的模拟准确性总体较好, $R^2$ 和 $E_{NS}$ 最大值分别为0.90和0.93。其中,32.1%的 $R^2$ 值和25.9%的 $E_{NS}$ 值大于0.70,61.7%的 $R^2$ 值和63.0%的 $E_{NS}$ 值大于0.50,只有8.6%的 $R^2$ 值和11.1%的 $E_{NS}$ 值小于0.20。但各场次降雨的模拟准确性之间存在较大差异, $E_{NS}$ 的最大值和最小值分别为0.93和0.10, $R^2$ 的最大值和最小值分别为0.90和0.11。连续性降雨模拟的 $R^2$ 和 $E_{NS}$ 值均高于单场次降雨模拟,模型的模拟准确性更好。

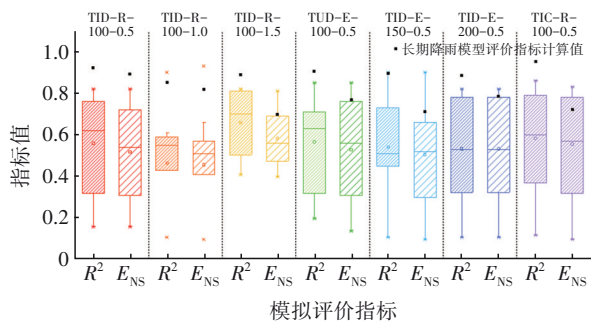


图5 简单式绿色屋顶装置模拟评价结果

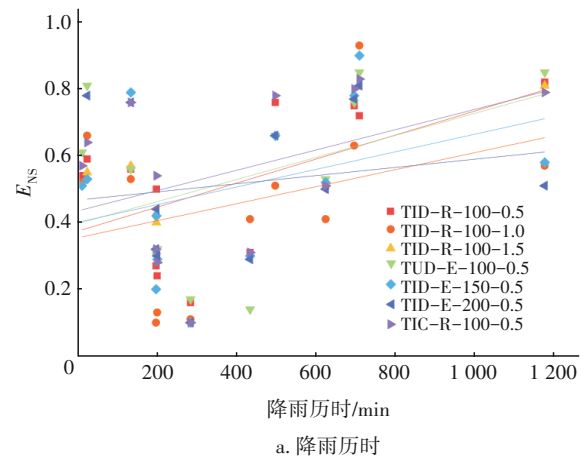
Fig.5 Simulation evaluation results for extensive green roof devices

连续降雨模拟反映了真实的降雨过程,能够综合考虑降雨间隔时间和基质等因素对模拟准确性的影响,但其弊端在于获取大量的实际监测数据存在困难。单场次降雨事件模拟对分析特殊和重大的降雨事件来说更有意义,但由于未考虑前期降雨,会导致径流产生过程与现实情况不符,仍需进一步对模型进行开发,以提高模拟的准确性。在实际工程中,设计人员可以依据实际需求合理选择模拟方案。

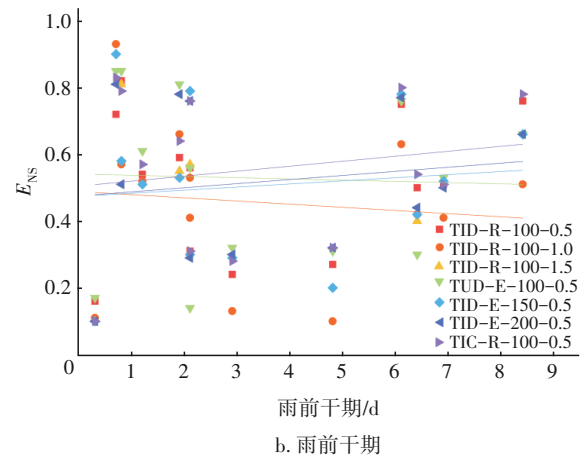
### 2.3.3 降雨特征对模拟准确性的影响

分别在不同降雨历时、雨前干期、降雨量和平均降雨强度条件下分析简单式绿色屋顶模型 $E_{NS}$ 值的变化, $E_{NS}$ 值与降雨特征的相关性分析结果见图6(由于TID-R-100-1.5装置的 $E_{NS}$ 值计算结果较少,线性趋势线不具有参考意义,故图中不显示TID-R-100-1.5装置的趋势线)。图6(a)表明降雨历时可在一定程度上影响SWMM模型模拟的准确性,降雨历时越长则模拟的准确度越高。图6(b)和(c)表明

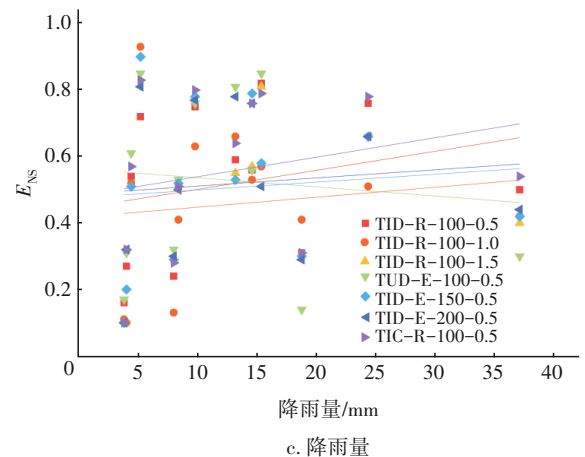
雨前干期和降雨量对模拟准确性无显著影响,虽然 $E_{NS}$ 值随着雨前干期和降雨量的增加而出现升高的情况,但没有明显的数据集中趋势。对于降雨量较小的场次降雨,不同装置构造的简单式绿色屋顶模拟准确性差异较大[见图6(c)]。由图6(d)可知,平均降雨强度不显著影响模型模拟的准确性,Palla等<sup>[9]</sup>研究表明,绿色屋顶在高降雨强度的事件中具有更好的模拟效果。



a. 降雨历时



b. 雨前干期



c. 降雨量

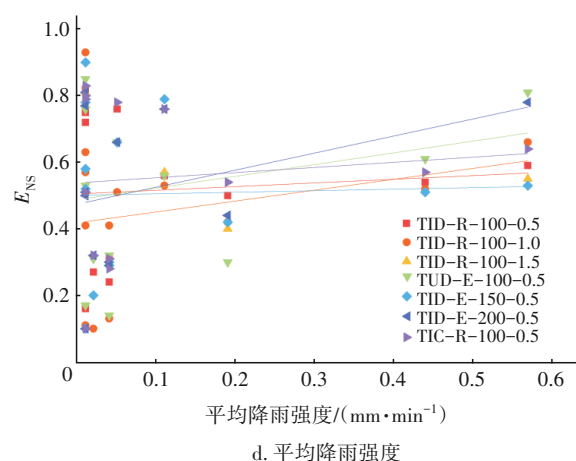


图6  $E_{NS}$  值与降雨特征的相关性

Fig.6 Correlation analysis between  $E_{NS}$  calculated values and rainfall characteristics

本研究在平均降雨强度 $>0.4 \text{ mm/min}$ 的两场降雨事件中,所有装置的 $E_{NS}$ 值均大于0.5,而由于大型降雨事件的样本数量较少,难以得出明确结论,后续研究中应进一步探究平均降雨强度对模拟准确性的影响。

### 3 结论

① 经绿色屋顶参数敏感性分析确定 Initially Saturated、Field Capacity、Conductivity、Conductivity Slope、Porosity 和基质层厚度是影响绿色屋顶模拟的敏感参数。

② 部分构造不同的简单式绿色屋顶装置模型参数具有一定的可转移性。规模和基质层种类不同的装置模型参数不能相互转移;基质层厚度为100 mm和150 mm的装置模型参数可以相互转移,模拟准确性较好;采用塑料凹凸排水板和陶粒的装置模型参数具有良好的可转移性。

③ 模拟连续性和降雨特征也是影响简单式绿色屋顶模拟准确性的主要因素。各场次降雨的模拟准确性之间存在较大差异,连续降雨模拟的准确性优于单场次降雨模拟。降雨历时可以一定程度影响SWMM模型模拟的准确性,降雨历时越长则模拟的准确性越高。

### 参考文献:

[1] SHAFIQUE M, KIM R, RAFIQ M. Green roof benefits, opportunities and challenges—a review [J].

Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 90: 757–773.

[2] VIJAYARAGHAVAN K. Green roofs: a critical review on the role of components, benefits, limitations and trends [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 57: 740–752.

[3] XIE H W, WU Y W, WANG L P, *et al.* Comparing simulations of green roof hydrological processes by SWMM and HYDRUS-1D [J]. Water Science & Technology: Water Supply, 2019. DOI: 10.2166/ws.2019.140.

[4] 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.

[5] HAMOUZ V, MUTHANNA T M. Hydrological modelling of green and grey roofs in cold climate with the SWMM model [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 249: 109350.

[6] JOHANNESSEN B G, HAMOUZ V, GRAGNE A S, *et al.* The transferability of SWMM model parameters between green roofs with similar build-up [J]. Journal of Hydrology, 2019, 569: 816–828.

[7] FRANCOS A, ELORZA F J, BOURAOUI F, *et al.* Sensitivity analysis of distributed environmental simulation models: understanding the model behaviour in hydrological studies at the catchment scale [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2003, 79(2): 205–218.

[8] HAKIMDAVAR R, CULLIGAN P J, FINAZZI M, *et al.* Scale dynamics of extensive green roofs: quantifying the effect of drainage area and rainfall characteristics on observed and modeled green roof hydrologic performance [J]. Ecological Engineering, 2014, 73: 494–508.

[9] PALLA A, GNECCO I. Hydrologic modeling of low impact development systems at the urban catchment scale [J]. Journal of Hydrology, 2015, 528: 361–368.

作者简介:张郁媛(1997–),女,北京人,硕士研究生,主要研究方向为城市雨洪控制与利用。

E-mail:511010578@qq.com

收稿日期:2022-03-05

修回日期:2022-05-05

(编辑:刘贵春)