

全堵塞周期透水沥青产流量预测的 FRAC 修正模型

杜晓丽^{1,2}, 曹晓乐¹, 杨明哲¹, 崔瀚武¹

(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; 2. 北京节能减排与城乡可持续发展省部共建协同创新中心)

摘要:针对传统基于下渗曲线扣损法的下渗-产流模型难以灵活、高效预测全堵塞周期透水沥青表面产流量的问题,通过对部分损失(FRAC)模型进行积分变形,引入透水沥青的降雨初期损失量并修正模型径流转化比例参数(C_r),构建了预测全堵塞周期透水沥青产流量的修正 FRAC 模型。该模型采用渗透速率量化降雨初期损失量,建立了其经验拟合方程,并构建了修正后参数 C_r 与渗透速率、降雨强度之间的函数关系,实现了模型参数随降雨强度、透水沥青堵塞程度变化的动态取值。采用实测产流数据对模型进行了验证,结果表明:FRAC 模型高估了全堵塞周期透水沥青产流量,对产流量预测的平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)、纳什效率系数(NSE)分别为 15.87 mm、16.77 mm 和 -1.06;而 FRAC 修正模型的 MAE、RMSE 分别下降至 0.36 mm 和 0.67 mm, NSE 提升至 0.97;FRAC 修正模型在预测不同堵塞程度透水沥青产流量时表现出较高精度,能够有效反映实际产流总量。

关键词:透水沥青;堵塞程度;产流量;FRAC 模型;产流预测

Modified FRAC model for predicting runoff generation from permeable asphalt throughout entire clogging cycle//
Du Xiaoli^{1,2}, Cao Xiaole¹, Yang Mingzhe¹, Cui Hanwu¹ (1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment, Ministry of Education, Beijing University of Civil Engineering and Architecture; 2. Beijing Energy Conservation & Sustainable Urban and Rural Development Provincial and Ministry Co-construction National Collaboration Innovation Center)

Abstract: To address the difficulty of the traditional infiltration-runoff model based on the infiltration curve deduction method in flexibly and efficiently predicting the total runoff generation from permeable asphalt throughout an entire clogging cycle, a modified fractional loss (FRAC) model was developed by integrally deforming the FRAC model, introducing the permeable asphalt-induced initial rainfall loss, and adjusting the runoff conversion ratio parameter (C_r), and the modified model was applied to predict the runoff generation from permeable asphalt throughout the entire clogging cycle. The initial rainfall loss was quantified as a function of the infiltration rate, and its empirical fitting equation was established. Furthermore, a functional relationship between the modified parameter C_r , infiltration rate, and rainfall intensity was constructed, enabling dynamic parameter adjustment with variations in rainfall intensity and clogging degree of permeable asphalt. Measured runoff data were used to validate the models, and the results indicate that the FRAC model overestimates the runoff generation from permeable asphalt throughout the entire clogging cycle, with an average absolute error (MAE) of 15.87 mm, a root mean square error (RMSE) of 16.77 mm, and a Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) coefficient of -1.06 for runoff generation prediction. In contrast, the modified FRAC model achieves a substantially improved performance, with an MAE of 0.36 mm, an RMSE of 0.67 mm, and an NSE of 0.97. The modified FRAC model demonstrates high accuracy in predicting the runoff generation from permeable asphalt under various clogging degrees, and can effectively captures the actual total runoff generation.

Key words: permeable asphalt; clogging degree; runoff generation; FRAC model; prediction of runoff generation

作为源头减排设施的重要组成部分,透水铺装可通过有效渗透、滞蓄雨水减少地表径流量^[1-3]。下渗曲线扣损法是预测透水铺装产流量的常用方法之一,该方法通过模拟水分在透水铺装系统中的入渗动态,利用降水量与入渗损失量之差预测透水铺装

表面产流量^[4-5]。典型的下渗-产流模型有 Green-Ampt 模型^[6]、Horton 模型^[7]和 Philip 模型^[8]等,这些模型在应用时普遍存在参数获取困难、应用条件复杂、现场数据依赖性强等问题。例如:Song 等^[9]发现监测区域特性与水力梯度显著影响 Philip 和

Kostiakov 下渗模型对透水砖下渗过程的模拟效果; Lee 等^[10]指出 Green-Ampt 模型应用于透水铺装产流预测需要满足其复杂的模型前提假设,且关键参数依赖现场数据和回归拟合,限制了其在数据缺乏情况下的适用性;Farid 等^[11]研究发现,使用非线性拟合获取的 Horton 模型参数,如初始入渗率、最终稳定入渗率和衰减系数等需根据当地实测数据进行调整,且获取过程相对复杂,降低了该模型在实际工程中的推广效率。

相较于其他下渗-产流水文模型,部分损失 (fractional loss, FRAC) 模型仅采用径流转化比例 (C_r) 参数,具有结构简单、需求参数少、适应性强的优势,可用于快速预测透水铺装的产流量^[12]。该模型属于土壤降雨损失率模型,其成立条件为场次累计降水量大于植物截留和地表填洼、下渗等过程造成的降雨初期损失量,并假定降水量按恒定比例 C_r 转换为产流量。而透水沥青铺装不仅通过地表洼蓄和土基层下渗雨水,还具有较大的空隙结构,可形成蓄水空间以蓄存降雨初期的雨水^[13-14]。因此,仅基于下渗曲线扣损,采用 FRAC 模型难以准确预测透水沥青表面的产流量,有必要将透水沥青的降雨初期损失量引入模型,对 FRAC 模型进行修正。此外,随使用年限增加,受人类活动、交通排放、大气沉降等因素影响,透水沥青表面易累积大量沉积物^[15-16]。降雨过程中,细小颗粒物随径流入渗至透水沥青空隙中,较大颗粒物则滞留于透水沥青面层,形成毡状层,堵塞其排水通道,降低其渗透、滞蓄性能,导致透水沥青降雨初期损失量随堵塞程度发生变化,其产流总量亦会随之发生改变^[17-20]。吴允红等^[21]分析了透水铺装径流控制效能的影响因素,指出透水铺装面层渗透速率与其对产流量控制效能呈正相关关系;亓雪颖等^[22]基于透水铺装渗透模拟试验发现,堵塞导致透水铺装系统的渗透速率随使用年限增加呈指数衰减。

在量化透水沥青全堵塞周期降雨初期损失量的基础上,本文将引入 FRAC 模型,并对模型参数 C_r 进行修正,建立其与渗透速率、降雨强度之间的函数关系,构建预测全堵塞周期透水沥青产流量的 FRAC 修正模型,为准确评估透水沥青在城市排水系统中对产流量的控制效能提供参考。

1 材料与方法

1.1 透水沥青模拟装置及产流试验方法

透水沥青模拟装置为长 100 cm、宽 50 cm、高 80 cm 的无盖箱体,路面结构依据 CJJT 190—2012《透水沥青路面技术规程》中透水沥青路面 III 型设

计。各层材质依次为:面层采用 PAC-10 透水沥青,透水基层采用级配碎石,土基层采用素土夯实。依据 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》分层填土,每层 5 cm±0.5 cm,采用轻型电动击实仪(型号 HCD-80)以预试验确定的最优次数(25 次/层)压实,夯实度采用环刀法测定。每层夯实完成后,在土层表面随机选取 3 个测点,将环刀垂直压入土层中,挖取环刀周围土样,修整环刀两端多余土体后密封带回实验室烘干(105℃±2℃)至恒重;计算土体干密度与室内标准击实试验所得最大干密度的比值,即为夯实度。试验中透水沥青土基层夯实度应超过 90%。装置结构见图 1,各层碎石级配见表 1。经试验测得,该装置的初始空隙率为 18%,符合规程中的相应要求。在透水沥青面层、透水基层底部和土基层底部分别设置取样口、排水口和出口。取样口用于收集降雨时透水沥青表面的产流;排水口用于降雨结束后透水层蓄水的排空;出口与铺设在土基层底部的排水管相接,管道上均匀打孔,用于土基层入渗雨水出流。开始降雨时,关闭排水口,打开

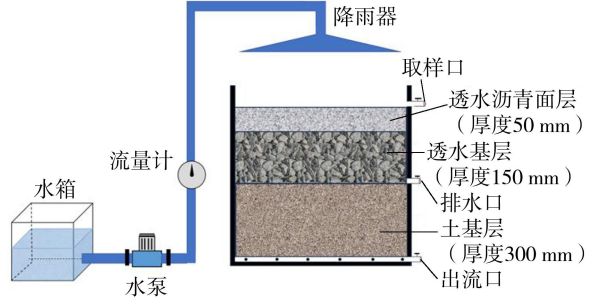


图 1 透水沥青与降雨模拟装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of permeable asphalt and rainfall simulation apparatus

表 1 PAC-10 透水沥青及透水基层碎石级配

Table 1 PAC-10 permeable asphalt and permeable subbase gravel gradation

| 类型 | 筛孔尺寸/mm | 通过率/% |
|-------------|---------|--------|
| PAC-10 透水沥青 | 13.20 | 100 |
| | 9.50 | 90~100 |
| | 4.75 | 50~70 |
| | 2.36 | 10~22 |
| | 1.18 | 6~18 |
| | 0.60 | 4~15 |
| | 0.30 | 3~12 |
| | 0.15 | 3~8 |
| | 0.08 | 2~6 |
| | 透水基层碎石 | 26.50 |
| 19.00 | | 85~95 |
| 13.20 | | 65~80 |
| 9.50 | | 55~71 |
| 4.75 | | 8~16 |
| 2.36 | | 0~7 |
| 0.08 | | 0~3 |

出流口和取样口,分别收集入渗流量和产流量;降雨结束后,待取样口不再产生径流时,打开排水口排空透水基层蓄水。每次降雨试验前装置闲置 48 h 以上,以保证基层排水充分。

1.2 降雨模拟装置

降雨模拟装置由喷淋式模拟降雨器、面板式流量计(LZM-6T ZYIA)和水泵组成,采用北京市Ⅱ区暴雨强度公式(式(1))计算重现期为 1、3、5、10、20 a 的 1 h 场次降雨强度,分别为 0.38、0.78、0.90、1.07、1.23 mm/min,并依次模拟 1 h 均匀降雨过程。采用 Christiansen 均匀系数法^[23-24]评价降雨均匀程度,测得 5 种降雨强度下平均降雨均匀性分别为 86.12%、85.97%、86.71%、88.04%、87.39%,均达到 80% 以上,相对误差分别为 1.3%、1.9%、1.8%、1.2%、1.6%,符合均匀降雨和目标降雨重现期要求。

$$i = 1602(1 + 1.037 \lg P_a) / (t + 11.593)^{0.681} \quad (1)$$

式中: i 为设计降雨强度; P_a 为设计降雨重现期; t 为降雨历时。

1.3 堵塞过程模拟

通过人工清扫和干式吸尘器采集北京市大兴区某透水沥青道路沉积物,用多孔筛去除路面沉积物中大于 2 mm 的颗粒。每次模拟降雨前,按照 10 g/m² 的沉积物累积负荷均匀布撒于透水沥青面层。布撒的颗粒物粒径分布如图 2 所示。

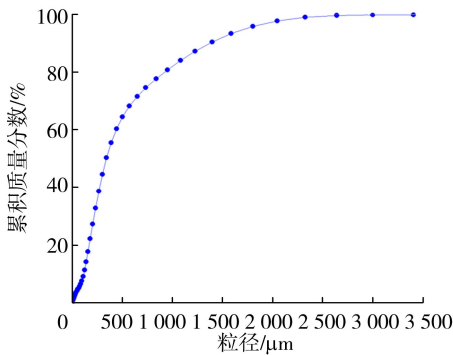


图 2 颗粒物粒径-质量分布

Fig. 2 Particle size-mass distribution of sprayed particles

每次降雨后,采用变水头单环法^[25]测定透水沥青渗透速率。具体方法为:一次性向直径为 300 mm 的测量环中加入 50 mm 深的水进行预湿润;再一次性加入 50 mm 深的水后,测得水量完全下渗所需的时间;待透水沥青表面干燥、装置内滞蓄雨水排空后,重复上述过程使透水沥青完全堵塞(堵塞程度大于 90% 时即认为透水沥青完全堵塞)。透水沥青的渗透速率(k)和堵塞程度(s)的计算公式为:

$$k = h/t_1 \quad (2)$$

$$s = \frac{k_i - k_r}{k_i} \times 100\% \quad (3)$$

式中: h 为水面下降高度,试验时取 $h = 50$ mm; t_1 为水面下降时间; k_i 为透水沥青初始未堵塞时的渗透速率; k_r 为降雨结束后透水沥青的渗透速率。

透水沥青堵塞程度与渗透速率的计算结果见表 2。利用透水沥青渗透速率的衰减量化堵塞程度,并将全堵塞周期定义为系统从完全未堵塞($s = 0$)发展至严重堵塞($s > 90\%$)的过程^[22]。

表 2 透水沥青堵塞程度与渗透速率

Table 2 Clogging degree and infiltration rate of permeable asphalt

| $s/\%$ | $k/(\text{mm}/\text{min})$ | $s/\%$ | $k/(\text{mm}/\text{min})$ |
|--------|----------------------------|--------|----------------------------|
| 0 | 0.560 | 50.8 | 0.280 |
| 10.3 | 0.504 | 60.2 | 0.224 |
| 21.5 | 0.448 | 73.4 | 0.168 |
| 30.7 | 0.392 | 80.2 | 0.112 |
| 42.1 | 0.336 | 92.3 | 0.056 |

1.4 FRAC 模型

依据 FRAC 模型,在累计降水量大于降雨初期损失量的前提下,流域单位时间的降水量按恒定比例转换为损失量^[12],降雨过程损失率的计算公式为:

$$\beta_t = (1 - C_r) i_t \quad (4)$$

式中: β_t 为 t 时刻的降雨过程损失率; i_t 为 t 时刻的降雨强度。根据文献[26]对 C_r 进行参数取值,当渗透速率为 0~0.025、>0.025~0.13、>0.13~0.33、>0.33 时, C_r 分别取值为 0.70、0.68、0.66 和 0.61。

依据下渗曲线扣损法,产流速率(e_t)^[27]可表示为:

$$e_t = i_t - \beta_t = C_r i_t \quad (5)$$

对式(5)按降雨历时进行积分可计算场次降雨产流总量:

$$R = C_r P \quad (6)$$

式中: R 为产流总量; P 为降水量。

1.5 FRAC 模型修正原理

结合 FRAC 模型积分变形过程可知,对式(5)进行积分时,积分时间段由开始降雨持续至降雨结束,因此,式(6)是建立在流域持续产流的前提下。而事实上,透水沥青的高渗透、延迟产流特性导致降雨前期其表面未立即产流^[28],即不是整场降雨都按比例转换为径流,实测场次产流量必然小于模型直接积分后计算的产流量。因此,预测产流量时,FRAC 模型中的 P 应去除降雨初期损失量(I_a)。引入 I_a 后的 FRAC 修正模型为:

$$R = C_r (P - I_a) \quad (7)$$

1.6 预测效果评价

利用平均绝对误差 (MAE)、均方根误差 (RMSE)、纳什效率系数 (NSE) 和相对误差 (δ) 评价修正后的 FRAC 模型对全堵塞周期透水沥青产流量的预测性能^[29-30]。MAE 为评估误差分布的指标^[31], RMSE 则用于评估预测值与实测值之间的离散度^[32], MAE 和 RMSE 越接近于 0, 模型性能越好。NSE 反映预测值与实测值的匹配程度, 其值接近于 1, 表明模型拟合程度较好^[33]; 当 NSE 大于或等于 0.5 时, 认为模型预测结果较为可靠^[34-35]。 δ 反映预测的可信程度, 其值越接近于 0, 表明预测结果越接近真实值, 可信度越高^[36]。

2 结果与分析

2.1 FRAC 模型对透水沥青产流量预测效果

2.1.1 预测值与实测值对比

根据 C_r 取值, 采用式 (6) 对降雨强度分别为 0.78、0.90、1.07、1.23 mm/min 时, 不同堵塞程度透水沥青产流量进行预测, 并与实测值进行对比, 结果如表 3 所示。

由表 3 可知, FRAC 模型显著高估了透水沥青表面产流总量, 使得预测产流量均高于实测值, 计算其 MAE、RMSE、NSE 的值分别为 15.87 mm、16.77 mm 和 -1.06, 表明 FRAC 模型应用于透水沥青产流量预测时存在离散程度高、误差大、匹配程度低的不足。但随着透水沥青堵塞程度的增加, 预测结果与实测产流量的差距越来越小, 如降雨强度为 1.07 mm/min, 透水沥青堵塞程度由 0 增加至 92.3% 时, 预测产流量的相对误差由 97% 降至 17%。此外, 随着降雨强度增大, FRAC 模型对透水沥青全堵塞过程场次降雨产流总量的预测效果逐渐变好, 如降雨强度由 0.78 mm/min 增加至 1.23 mm/min 时, 全堵塞周期下模型预测结果的 NSE 由 -14.29 增加至 -3.08, 表明模型在高强度降雨下对产流量

表 3 FRAC 模型预测的透水沥青产流量与实测值对比

Table 3 Comparison between FRAC model simulated and measured runoff generation from permeable asphalt

| s/% | 实测产流量/mm | | | | 预测产流量/mm | | | |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | $i=0.78$ mm/min | $i=0.90$ mm/min | $i=1.07$ mm/min | $i=1.23$ mm/min | $i=0.78$ mm/min | $i=0.90$ mm/min | $i=1.07$ mm/min | $i=1.23$ mm/min |
| 0 | 3.84 | 10.29 | 20.12 | 29.15 | 29.11 | 33.59 | 39.67 | 45.75 |
| 10.3 | 4.89 | 11.33 | 21.49 | 30.44 | 29.11 | 33.59 | 39.67 | 45.75 |
| 21.5 | 5.29 | 11.64 | 22.59 | 31.86 | 29.11 | 33.59 | 39.67 | 45.75 |
| 30.7 | 6.83 | 12.28 | 25.12 | 34.76 | 29.11 | 33.59 | 39.67 | 45.75 |
| 42.1 | 7.11 | 13.73 | 25.39 | 34.78 | 29.11 | 33.59 | 39.67 | 45.75 |
| 50.8 | 10.71 | 17.37 | 28.53 | 38.11 | 31.49 | 36.34 | 42.92 | 49.50 |
| 60.2 | 10.95 | 17.78 | 28.60 | 38.18 | 31.49 | 36.34 | 42.92 | 49.50 |
| 73.4 | 14.89 | 21.56 | 32.02 | 41.34 | 31.49 | 36.34 | 42.92 | 49.50 |
| 80.2 | 17.24 | 24.93 | 35.28 | 44.56 | 32.45 | 37.44 | 44.22 | 51.00 |
| 92.3 | 19.92 | 26.78 | 37.67 | 47.23 | 32.45 | 37.44 | 44.22 | 51.00 |

的预测精度有所提升。

对于同一堵塞程度, 随降雨强度的增大, 透水沥青表面产流量明显增加。除降雨强度本身增大所带来的直接影响外, 还因为高强度降雨下, 透水沥青容易发生超渗产流, 进一步推高了产流总量。对于同一降雨强度, 随着堵塞程度的增加, 透水沥青产流量也明显增加, 这主要是因为堵塞程度加剧导致透水沥青面层的入渗能力下降, 降雨初期损失量减少, 从而使得产流量增加。由此可知, 堵塞程度和降雨重现期均是影响透水沥青产流量的重要因素。

在 FRAC 模型中, 降雨初期损失量仅作为判断条件而未引入, 场次降雨全部降水量按恒定比例 C_r 转化为产流量。而透水沥青面层渗透速率和结构层空隙率较大, 降雨前期大量雨水入渗和滞蓄使得降雨初期损失量在整场降雨中占据较大比例, 因此造成 FRAC 模型预测值大于实测产流总量。当堵塞程度增加时, 越来越多的颗粒物进入透水沥青结构中, 并在其面层堆积, 导致透水沥青空隙率显著降低, 阻塞了排水通道, 削弱了其产流雨水的渗透与滞蓄能力, 使降雨初期损失量减小^[37], 也使得降雨后期 FRAC 模型预测值与实测值之间的误差减小。当降雨强度较大时, 初期雨水难以被充分截留与入渗, 透水沥青表面更易形成超渗产流, 使得模型预测的产流量与实测值差距缩小。可见, 不同降雨强度下采用 FRAC 模型进行全堵塞周期透水沥青产流量预测时, 需去除降雨初期损失量以满足具有高渗透、延迟产流特性的透水沥青产流量预测要求, 且应考虑透水沥青堵塞程度和降雨强度变化对模型参数的影响。

2.1.2 FRAC 模型参数 C_r 取值与计算值对比

在 FRAC 模型中, 参数 C_r 是衡量下垫面产流能力的关键参数, 直接影响模型对实测产流量的模拟精度。根据试验获取的透水沥青产流量及降水量实测数据, 采用式 (6) 计算全堵塞周期不同堵塞程度 (以渗透速率表征) 下, 降雨强度分别为 0.78、0.90、

1.07、1.23 mm/min 时透水沥青的 C_r 值,并与依据文献[26]的 C_r 取值(FRAC 模型原始值)进行对比,结果如图 3 所示。

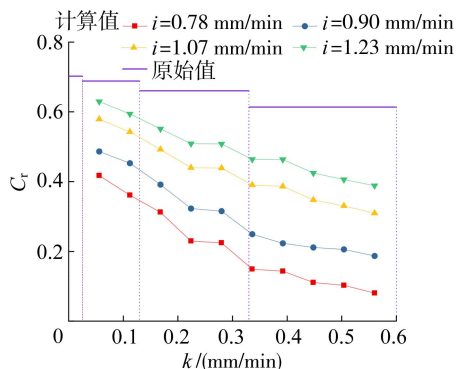


图 3 FRAC 模型 C_r 取值与计算值对比

Fig. 3 Comparison between C_r values of FRAC model and calculated values

由图 3 可知,在 4 种降雨强度下, C_r 计算值均低于 FRAC 模型的 C_r 取值,但随堵塞程度增加,即渗透速率减小时,透水沥青 C_r 计算值增大,且逐渐接近 FRAC 模型的 C_r 取值。如当降雨强度为 0.90 mm/min,透水沥青堵塞程度由 0 增加至 80.2% (渗透速率由 0.56 mm/min 降至 0.11 mm/min), C_r 计算值的相对误差由 69% 降至 33%。这是由于随着堵塞程度增加,透水沥青滞蓄雨水能力降低,降雨初期损失量减少,更多的雨水以径流形式外排^[38],从而使 C_r 计算值更加贴近 FRAC 模型取值。由图 3 还可以看出,FRAC 模型的 C_r 取值未考虑降雨强度的影响,而不同降雨强度下透水沥青 C_r 计算值存在一定差异。当堵塞程度一定时,降雨强度越小, C_r 计算值越偏离 FRAC 模型的 C_r 取值。如当透水沥青堵塞程度为 42.1% (渗透速率为 0.336 mm/min),降雨强度由 1.23 mm/min 降低至 0.78 mm/min 时, C_r 计算值的相对误差由 24% 升高至 77%。这是因为降雨强度越小,更多的初期雨水被截留和入渗,降雨初期损失量越大,降雨转化为径流的比例越小,导致 C_r 计算值更加偏离 FRAC 模型的 C_r 取值。

2.2 FRAC 模型修正

2.2.1 降雨初期损失量

降雨初期损失量实质上代表一场降雨过程中初期未产生径流的损失量,其大小与地表材料的渗透性能密切相关。对降雨初期损失量与渗透速率、降雨强度进行 Pearson 相关性分析得出,降雨初期损失量与渗透速率的相关系数为 0.97 ($p < 0.01$),降雨初期损失量与降雨强度的相关系数为 0.02,渗透速率与降雨强度的相关系数为 0。说明降雨初期损失量仅与渗透速率呈现出显著相关性,与降雨强度无

关,即透水沥青渗透速率是降雨初期损失量的主要影响因素。这是因为在透水性良好的透水沥青中,初期雨水通常被快速吸收填补透水沥青孔隙,导致场次降雨下,降雨初期损失量主要受透水沥青本身蓄滞能力影响。

将透水沥青的渗透速率作为堵塞状态的响应指标,基于实测数据探究其与降雨初期损失量的函数关系,结果如图 4 所示。随着堵塞程度增加(渗透速率减小),降雨初期损失量减小。这是由于随着堵塞程度增加,透水沥青孔隙结构逐渐被细小颗粒或有机物堵塞,使有效孔隙率和饱和导水率显著降低,进而导致渗透与滞蓄能力下降^[39]。当透水沥青无法快速滞蓄初期降雨或达到饱和状态时,产流过程提前开始,从而导致降雨初期损失量减少。结合上述分析,将降雨初期损失量与透水沥青渗透速率进行拟合,得到基于统计相关性拟合的经验模型,可用于预测不同堵塞条件下透水沥青的降雨初期损失量。拟合公式为:

$$I_a = 45.22k^{0.24} \quad (8)$$

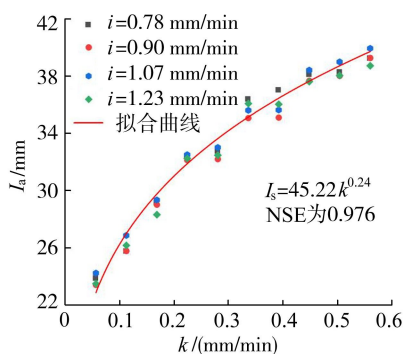


图 4 降雨初期损失量与渗透速率的关系

Fig. 4 Relationship between initial rainfall loss and infiltration rate

2.2.2 参数 C_r 修正

将式(8)得到 I_a 的代入式(7),计算 FRAC 修正模型的参数 C_r ,结果如图 5 所示。由图 5 可知,FRAC 修正模型的 C_r 值更接近 FRAC 模型的 C_r 取值(原始值),如降雨强度为 0.78 mm/min 时,计算结果的 RMSE 由 0.43 降低至 0.1。修正模型 C_r 值与原始值之间仍存在一定差距,是因为 FRAC 模型的 C_r 取值是针对不同土壤渗透速率确定的,缺乏对降雨特征及下垫面特性变化的动态响应。因此,在预测不同堵塞程度透水沥青产流量时,引入降雨初期损失量后, C_r 值在不同工况下的赋值应结合实际降雨特征和铺装渗透状态进行动态表征,以增强模型参数的适应性和合理性。

进一步对 FRAC 修正模型的参数 C_r 与渗透速率、降雨强度进行 Pearson 相关性分析得出,参数 C_r

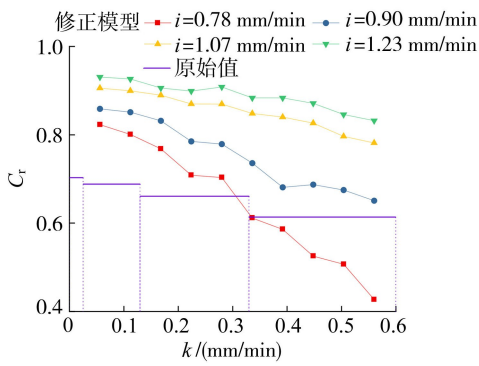


图5 FRAC模型修正前后的 C_r 值对比

Fig. 5 Comparison between C_r values of FRAC model before and after modification

与渗透速率的相关系数为 -0.55 ,参数 C_r 与降雨强度的相关系数为 0.75 。FRAC修正模型的参数 C_r 与渗透速率和降雨强度均表现出显著的相关性,说明降雨强度和透水沥青堵塞程度均对FRAC修正模型的参数 C_r 影响较大,因此需建立其随降雨强度和堵塞程度变化的函数关系,以动态表达不同堵塞程度和降雨强度下透水沥青产流量的变化,提升FRAC修正模型对不同条件下透水沥青产流量的模拟精度。基于L-M(Levenberg-Marquardt)迭代算法的拟合曲面(图6),利用非线性最小二乘法得到修正后的参数 C_r 与降雨强度和渗透速率之间的关系式(拟合优度 R^2 为 0.99):

$$C_r = -1.609k + 2.314i - 0.169k^2 + 1.302ki - 1.083i^2 - 0.297 \quad (9)$$

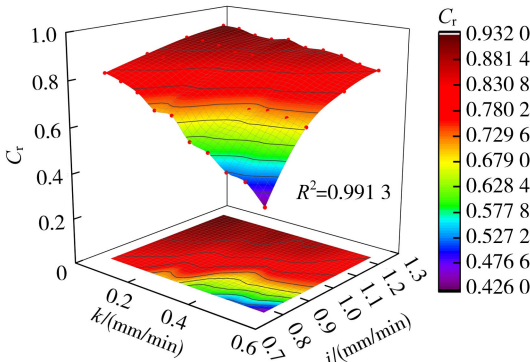


图6 FRAC修正模型参数 C_r 的3D拟合曲面

Fig. 6 Three-dimensional fitting surface of C_r of modified FRAC model

2.2.3 FRAC修正模型产流量预测效果评价

将修正后的参数 C_r 代入式(7),得到FRAC修正模型:

$$R = (P - 45.22k^{0.24}) (-1.609k + 2.314i - 0.169k^2 + 1.302ki - 1.083i^2 - 0.297) \quad (10)$$

为检验FRAC修正模型对全堵塞周期透水沥青场次降雨产流总量的预测效果,采用全堵塞周期下

场次降雨强度为 0.38 mm/min 时透水沥青的产流量进行验证,将预测值与实测值进行对比,结果如表4所示。

表4 FRAC修正模型预测值与实测值对比

Table 4 Comparison between predicted values of modified FRAC model and measured values

| $s/\%$ | R/mm | | $s/\%$ | R/mm | |
|--------|---------------|------|--------|---------------|-------|
| | 预测值 | 实测值 | | 预测值 | 实测值 |
| 0 | 0 | 0 | 50.8 | 2.20 | 2.36 |
| 10.3 | 0 | 0 | 60.2 | 3.92 | 3.70 |
| 21.5 | 0 | 0 | 73.4 | 5.98 | 5.90 |
| 30.7 | 0 | 0 | 80.2 | 8.55 | 8.93 |
| 42.1 | 0.75 | 1.67 | 92.3 | 12.10 | 13.95 |

由表4可知,在降雨强度为 0.38 mm/min 的情况下,当 $s < 42.1\%$ 时,降雨强度始终小于透水沥青渗透速率,雨水快速下渗至土基层,且未填满透水沥青空隙,故其表面未发生产流,FRAC修正模型对此过程实现了正确的预测,证明其对于初期下渗过程预测的精准性;当 $s \geq 42.1\%$ 时,透水沥青堵塞加重,渗透速率小于降雨强度,透水沥青表面出现产流,模型捕捉到产流量随堵塞程度增加而上升的整体趋势,拟合效果较好。进一步计算可得,FRAC修正模型的MAE、RMSE、NSE分别为 0.36 mm 、 0.67 mm 和 0.97 ,说明FRAC修正模型在模拟不同堵塞程度透水沥青产流量时表现出较高的精度,能够有效反映实际产流总量。计算结果验证了其有效性与可靠性。

3 结论

a. FRAC模型预测透水沥青产流量时,存在明显高估现象,模拟精度不足,MAE、RMSE、NSE分别为 15.87 mm 、 16.77 mm 和 -1.06 。尤其在低堵塞程度和降雨强度较小时,模型误差较显著。参数 C_r 计算值远小于模型取值,且随着堵塞程度和降雨强度的增加, C_r 计算值的偏差减小,模型预测结果逐渐接近实测值。

b. 选取渗透速率的衰减量作为透水沥青堵塞状态的响应指标,建立渗透速率与降雨初期损失量的函数关系,引入FRAC模型;同时建立了去除降雨初期损失量后参数 C_r 与渗透速率、降雨强度的函数关系式,并构建了预测全堵塞周期透水沥青产流量的FRAC修正模型。在低堵塞程度和降雨强度较小的条件下,FRAC修正模型对全堵塞周期透水沥青产流量的预测误差显著减小, C_r 值偏差由大幅偏离收敛至合理范围,模型预测结果与实测值吻合良好。随着堵塞程度和降雨强度的增加,FRAC修正模型同样保持较高精度,有效克服了FRAC模型在不同

工况下的高估问题。

c. 采用全堵塞周期下场次降雨强度为 0.38 mm/min 时透水沥青的实测产流量数据对 FRAC 修正模型的预测效果进行验证,结果表明预测结果与实测值较接近,MAE、RMSE、NSE 分别为 0.36 mm、0.67 mm 和 0.97,FRAC 修正模型有效预测了不同堵塞状态下透水沥青的产流总量。

参考文献:

[1] 王宏宇,吴昊,马宏伟,等.海绵城市建设中三种类型透水路面削减内涝效果研究[J].中国给水排水,2019,35(12):44-48. (Wang Hongyu, Wu Hao, Ma Hongwei, et al. Study on waterlogging reduction effect of three types of permeable pavements in sponge city construction [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(12):44-48. (in Chinese))

[2] 周晋军,黄天意,刘家宏,等.我国透水路面发展研究综述[J].水利水电科技进展,2024,44(4):78-88. (Zhou Jinjun, Huang Tianyi, Liu Jiahong, et al. Review of permeable pavement development in China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(4):78-88. (in Chinese))

[3] 黄国如,赵晓莺,麦叶鹏.低影响开发措施对雨水径流的控制效应[J].水资源保护,2021,37(4):29-36. (Huang Guoru, Zhao Xiaoying, Mai Yepeng. Control effect of low impact development measures on rainwater runoff [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4):29-36. (in Chinese))

[4] 杜晓丽,杨明哲,尹子杰,等.全堵塞周期内透水砖路面的下渗-产流模型研究[J].水资源保护,2023,39(5):25-31. (Du Xiaoli, Yang Mingzhe, Yin Zijie, et al. Study on infiltration-runoff model of permeable brick pavement during full clogging cycle [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5):25-31. (in Chinese))

[5] 赵利东,冯平,李建柱,等.基于物理实验的典型透水铺装水文效应研究[J].水力发电学报,2024,43(2):75-85. (Zhao Lidong, Feng Ping, Li Jianzhu, et al. Experimental study on hydrological effects of typical permeable pavement [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024, 43(2):75-85. (in Chinese))

[6] Cheng Zhuo, Zhang Jun, Yu Bofu, et al. Stormflow response and "effective" hydraulic conductivity of a degraded tropical *Imperata* grassland catchment as evaluated with two infiltration models [J]. Water Resources Research, 2023, 59(5):e2022WR033625.

[7] Verma S C. Modified Horton's infiltration equation [J]. Journal of Hydrology, 1982, 58(3/4):383-388.

[8] Philip J R. The theory of infiltration; 1. the infiltration equation and its solution [J]. Soil Science, 1957, 83(5):345-358.

[9] Song Jianying, Wang Jianlong, Wang Wenhui, et al. Comparison between different infiltration models to describe the infiltration of permeable brick pavement system via a laboratory-scale experiment [J]. Water Science & Technology, 2021, 84(9):2214-2227.

[10] Lee J G, Borst M, Brown R A, et al. Modeling the hydrologic processes of a permeable pavement system [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2015, 20(5):04014070.

[11] Farid H U, Mahmood-Khan Z, Ahmad I, et al. Estimation of infiltration models parameters and their comparison to simulate the onsite soil infiltration characteristics [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(3):84-91.

[12] Thompson D B, Cleveland T G, Copula D B, et al. Loss-rate functions for selected Texas watersheds [R]. Lubbock; Texas Tech University, 2008.

[13] 王雷,黄鑫海,李振达,等.透水钢渣沥青路面力学与水文响应模拟分析[J].公路,2025,70(3):19-27. (Wang Lei, Huang Xinhai, Li Zhenda, et al. Simulation analysis of mechanical and hydrological response of permeable steel slag asphalt pavement [J]. Highway, 2025, 70(3):19-27. (in Chinese))

[14] 陈莎,陈晓宏.城市雨水径流污染及LID控制效果模拟[J].水资源保护,2018,34(5):13-19. (Chen Sha, Chen Xiaohong. Simulation of urban rainfall runoff pollution and control effect by low impact development [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5):13-19. (in Chinese))

[15] Sousa M, Dinis Almeida M, Fael C, et al. Permeable asphalt pavements (PAP): benefits, clogging factors and methods for evaluation and maintenance: a review [J]. Materials, 2024, 17(24):6063.

[16] 宋亚霖,杜新强,刘文娜,等.海绵城市透水砖堵塞规律试验[J].水资源保护,2018,34(6):56-59. (Song Yalin, Du Xinqiang, Liu Wenna, et al. Experimental research on clogging laws of permeable brick in sponge city [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(6):56-59. (in Chinese))

[17] Marcaida A K, Nguyen T H, Ahn J. Investigation of particle-related clogging of sustainable concrete pavements [J]. Sustainability, 2018, 10(12):4845.

[18] Poor C, Kaye J, Struck R, et al. Permeable pavement in the northwestern united states: pollution source or treatment option? [J]. Sustainability, 2023, 15(17):12926.

[19] 牟子婕,李俊奇.土工布强化透水铺装对径流污染阻隔的研究[J].水利水电技术(中英文),2022,53(6):184-193. (Mu Zijie, Li Junqi. Study on prevention and control of runoff pollution by geotextile reinforced permeable pavement [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(6):184-193. (in Chinese))

[20] 张皓东.不同空隙率透水沥青混合料路用性能及堵塞

- 衰变规律研究[J]. 公路, 2022, 67(9):115-121. (Zhang Haodong. Study on the road properties and clogging decay law of permeable asphalt mixtures with different void ratios [J]. Highway, 2022, 67(9):115-121. (in Chinese))
- [21] 吴允红, 李俊奇, 张哲, 等. 渗排型透水铺装运行维护研究进展[J]. 给水排水, 2022, 48(8):151-159. (Wu Yunhong, Li Junqi, Zhang Zhe, et al. Operation and maintenance of permeable pavement with underdrainage: a review [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(8):151-159. (in Chinese))
- [22] 亓雪颖, 张守红, 王玉杰, 等. 颗粒物粒径和维护方式对透水砖铺装透水率衰减过程影响[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(8):28-35. (Qi Xueying, Zhang Shouhong, Wang Yujie, et al. Impacts of particle size and maintenance on clogging processes of permeable pavement systems [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(8):28-35. (in Chinese))
- [23] Ricks M D, Horne M A, Faulkner B, et al. Design of a pressurized rainfall simulator for evaluating performance of erosion control practices [J]. Water, 2019, 11(11):2386.
- [24] 杜晓丽, 郑泽东, 尹子杰, 等. 透水砖堵塞程度对径流颗粒物冲刷规律的影响[J]. 水资源保护, 2022, 38(1):73-81. (Du Xiaoli, Zheng Zedong, Yin Zijie, et al. Influence of blockage degree of permeable brick on scouring law of runoff particles [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1):73-81. (in Chinese))
- [25] Qin Yinghong, Yang Haifeng, Deng Zhiheng, et al. Water permeability of pervious concrete is dependent on the applied pressure and testing methods [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2015, 2015(1):404136.
- [26] United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division. Urban hydrology for small watersheds: conservation engineering division, technical release 55 [R]. Washington: United States Department of Agriculture, 1986.
- [27] Dingman S L. Physical hydrology [M]. 3rd ed. Long Grove: Waveland Press, 2015.
- [28] 赵飞, 张书函, 桑非凡, 等. 透水砖铺装系统产流特征研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(15):133-138. (Zhao Fei, Zhang Shuhan, Sang Feifan, et al. Runoff characteristics of permeable brick pavement system [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(15):133-138. (in Chinese))
- [29] Du Xiaoli, Yang Mingzhe, Yin Zijie, et al. Influence of initial abstraction ratios in NRCS-CN model on runoff estimation of permeable brick pavement affected by clogging [J]. Water Resources Management, 2023, 37(8):3211-3225.
- [30] 徐嘉远, 邹磊, 夏军, 等. TVGM-LSTM 耦合模型及其径流模拟效果分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(6):104-110. (Xu Jiayuan, Zou Lei, Xia Jun, et al. TVGM-LSTM coupling model and its runoff simulation effect analysis [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6):104-110. (in Chinese))
- [31] Reich N G, Lessler J, Sakrejda K, et al. Case study in evaluating time series prediction models using the relative mean absolute error [J]. The American Statistician, 2016, 70(3):285-292.
- [32] Ajmal M, Waseem M, Ahn J H, et al. Improved runoff estimation using event-based rainfall-runoff models [J]. Water Resources Management, 2015, 29(6):1995-2010.
- [33] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models, part I: a discussion of principles [J]. Journal of hydrology, 1970, 10(3):282-290.
- [34] 杨雨潇, 李家科. 基于 HYPE 模型的汉江安康断面以上流域非点源污染模拟 [J]. 水资源保护, 2024, 40(3):140-148. (Yang Yuxiao, Li Jiake. Simulation of non-point source pollution in watershed above Ankang Section of the Han River based on HYPE model [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3):140-148. (in Chinese))
- [35] 周鹏, 许月萍, 周欣磊, 等. 基于多模型融合的椒江流域季节性径流集合预报 [J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(3):62-69. (Zhou Peng, Xu Yueping, Zhou Xinlei, et al. Ensemble forecasting of seasonal streamflow in the Jiaojiang River Basin based on multi-model fusion [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(3):62-69. (in Chinese))
- [36] Joint Committee for Guides in Metrology. Evaluation of measurement data: guide to the expression of uncertainty in measurement: JCGM 100: 2008 [R]. Sèvres: Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.
- [37] Tota-Maharaj K, Karunanayake C, Kunwar K, et al. Evaluation of permeable pavement systems (PPS) as best management practices for stormwater runoff control: a review [J]. Water Conservation Science and Engineering, 2024, 9(1):32.
- [38] Ma Yaolu, Chen Xianhua, Geng Yanfen, et al. Effect of clogging on the permeability of porous asphalt pavement [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 2020(1):4851291.
- [39] Król J B, Khan R, Collop A C. The study of the effect of internal structure on permeability of porous asphalt [J]. Road Materials and Pavement Design, 2018, 19(4):935-951.

(收稿日期: 2025-07-21 编辑: 施业)