DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2023. 05. 004

全堵塞周期内透水砖路面的下渗-产流模型研究

杜晓丽[1,2],杨明哲[1],尹子杰[1],崔瀚武[1]

(1. 北京建筑大学城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室,北京 100044;
2. 北京节能减排与城乡可持续发展省部共建国家协同创新中心,北京 100044)

摘要:采用下渗曲线扣损法对不同堵塞程度透水砖路面的场次降雨产流进行模拟,研究适用于全堵塞周期内透水砖的下渗-产流模型。结果表明:4 种下渗-产流模型对不同堵塞程度透水砖产流数据拟合效果由好到差依次为 Horton 模型、Kostiakov 模型、Green-Ampt 模型、Philip 模型,Horton 模型可以更好地描述全堵塞周期内透水砖路面的场次降雨产流过程;透水砖堵塞程度和降雨重现期均会影响 4 种模型对下渗-产流过程的模拟效果,Horton 模型和 Kostiakov 模型的模拟效果随透水砖堵塞程度增加而提高,Green-Ampt 模型和 Philip 模型的模拟效果则随堵塞程度增加而降低; 4 种模型对全堵塞周期内透水砖产流过程的模拟效果均随降雨重现期增大呈现先降低后升高的趋势;基于模拟效果,引入堵塞程度和降雨强度修正 Horton 模型,建立了适用于不同堵塞程度透水砖路面的下渗-产流模型。

关键词:透水砖;全堵塞周期;堵塞程度;降雨强度;下渗-产流模型

中图分类号:TV121^{+}.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2023)05 - 0025 - 07

Study on infiltration-runoff model of permeable brick pavement during full clogging cycle//DU Xiaoli[1,2], YANG Mingzhe[1], YIN Zijie[1], CUI Hanwu[1] (1. *Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment*, *Ministry of Education*, *Beijing University of Civil Engineering and Architecture*, *Beijing* 100044, *China*; 2. *Beijing Energy Conservation & Sustainable Urban and Rural Development Provincial and Ministry Co-construction Collaboration Innovation Center*, *Beijing University of Civil Engineering and Architecture*, *Beijing* 100044, *China*)

Abstract: The infiltration curve deduction method was used to simulate the rainfall runoff of permeable brick pavement with different clogging degrees, and the infiltration-runoff model suitable for permeable bricks during the full blockage cycle were studied. The results show that the fitting effects of the four infiltration-runoff models on the runoff data of permeable bricks with different clogging degrees, from good to bad, are Horton model, Kostiakov model, Green Ampt model, and Philip model, respectively. The Horton model can better describe the rainfall runoff process of permeable brick pavement during the full clogging cycle. The clogging degree of permeable bricks and the rainfall return period will both affect the simulation effect of the four models on the infiltration-runoff process. The simulation effect of Horton model and Kostiakov model increases with the increase of clogging degree of permeable bricks, while the simulation effect of Green Ampt model and Philip model decreases with the increase of clogging degree. As the rainfall return period increases, the simulation effects of the four models on the flow process of permeable bricks during the full clogging cycle show a trend of first decreasing and then increasing. Based on the simulation results, the Horton model was modified by introducing the clogging degree and rainfall intensity, and an infiltration-runoff model suitable for permeable brick pavement with different degrees of blockage was established.

Key words: permeable brick; full clogging cycle; clogging degree; rainfall intensity; infiltration-runoff model

作为一种重要的源头控制技术,透水铺装能够通过自身孔隙结构滞留径流雨水,实现对径流体积、径流峰值和径流污染的同步控制[1-2]。但随运行时间增加,人类活动、交通排放、大气沉降等作用使透水铺装表面聚集大量沉积物,降雨发生时细小颗粒物随径流入渗进入透水铺装孔隙,堵塞其排水通道,

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3200700);北京建筑大学金字塔人才培养工程项目(JDJQ20200302)

作者简介:杜晓丽(1980—),女,教授,博士,主要从事城市雨洪控制利用研究。E-mail:duxiaoli@ bucea. edu. cn

导致渗透性能降低[3-4]，而较大颗粒物会滞留在透水铺装面层形成毯状层进一步减少雨水下渗量，使透水铺装对径流体积控制、径流峰值削减等效能大大降低[5-6]。透水铺装刚铺设时，由于铺装层和土基层之间渗透速率差异，入渗雨水在土基层上以超渗产流模式使面层达到饱和持水状态，面层则以蓄满产流模式形成表面径流[7]；透水铺装堵塞后，面层降雨入渗速率大大降低，其产流机制演变为面层直接超渗产流。因此，研究全堵塞周期内透水铺装的产流规律对丰富和完善透水铺装的产汇流理论、评价其在城市排水系统中的长期作用具有重要意义。

透水铺装系统产流过程模拟通常采用 Horton 模型[8-9]、Kostiakov 模型[10]、Green-Ampt 模型[11]和 Philip 模型[12]等下渗-产流模型。例如：Hu 等[13]利用 Horton 模型评估了透水沥青、透水混凝土和透水连锁混凝土路面在社区范围内的削洪效果，发现透水混凝土削洪性能最佳；Song 等[14]使用 Kostiakov 等传统下渗模型对透水砖的入渗曲线进行了拟合，发现该模型的拟合效果受区域特性和水力梯度的影响显著；Lee 等[15]基于 Green-Ampt 模型开发了新的动态模型来模拟透水铺装的下渗规律，用于评估透水铺装的水文过程；Ribas 等[16]通过 Philip 模型估算了透水路面的饱和导水率以及吸水率，为透水路面的维护标准提供依据。目前研究还仅限于采用上述模型描述各种透水铺装系统的产流过程，对透水铺装堵塞后的适用性评价还鲜有报道。

本文采用 Horton 模型、Kostiakov 模型、Green-Ampt 模型、Philip 模型 4 种下渗-产流模型分别对不同堵塞程度的透水砖系统场次降雨产流过程进行拟合，以获取适用于描述全堵塞周期内透水砖路面的下渗-产流模型，并建立模型参数与透水砖堵塞程度的函数关系，以期为研究堵塞对透水砖路面产流机制的影响提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验装置

1.1.1 模拟人行道透水砖系统

实验室模拟人行道透水砖路面系统见图 1，装置尺寸为 100 cm × 50 cm × 80 cm，内部由下至上依次装填土基层 200 mm、砾石层 200 mm 和找平层 40 mm，其中土基层采用素土夯实（夯实度大于 90%）、砾石基层采用级配砾石、找平层和填充砖缝采用级配砂，面层选用尺寸为 200 mm × 100 mm × 60 mm的混凝土透水砖（初始渗透系数为 2.3 × 10^{-2} cm/s，购于北京爱道爱和科技有限公司）。铺设所用素土、砾石与砂级配等要求参照 CJJ/T 188—2012《透水砖路面技术规程》。沿面层长边设置宽 2 cm、坡度 1% 的水泥抹面沟槽，沟槽底距透水砖表面 5 cm，于沟槽最低处设置取样口 1 用于采集透水砖表面径流；土基层和砾石层交界处设置取样口 2，用于采集透水砖系统下渗出流。

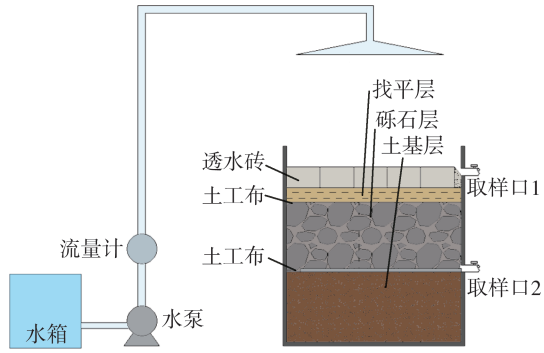


图 1 模拟透水砖系统及模拟降雨系统

Fig. 1 Simulated permeable pavement system and simulated rainfall system

1.1.2 模拟降雨装置

实验室模拟降雨装置见图 1，根据北京市Ⅱ区暴雨强度公式得到北京市降雨重现期分别为 1、3、5、10、20 a，降雨强度分别为 0.52、0.78、0.90、1.07、1.23 mm/min 的 1 h 降雨过程，降雨强度计算公式见式(1)。利用针头式模拟降雨器、流量计和水泵模拟降雨，调节流量计使降水量符合上述降雨过程。采用 Christiansen 均匀系数法[17]评价模拟降雨系统均匀程度，测得 5 种降雨强度下平均降雨均匀性分别为 90.53%、89.61%、85.62%、86.04%、86.71%，故认为模拟降雨装置可以满足试验所需降雨条件。

$$i = \frac{9.61(1 + 1.037\lg P')}{(t + 11.593)^{0.681}} \tag{1}$$

式中：i 为设计降雨强度，mm/min；P' 为设计降雨重现期，a；t 为降雨历时，min。

1.2 试验方法

1.2.1 堵塞过程模拟

每次模拟降雨前在透水砖面层使用 18 目多孔筛均匀布撒 10 g 采集的透水砖路面颗粒沉积物[18]，颗粒物粒径分布如图 2 所示。每次模拟降雨结束后，关闭取样口 1 阀门，打开取样口 2 阀门，保持透水砖上方 2 cm 恒水头使用量筒采集取样口 2 的出流量，直至取样口 2 出流量达到稳定，记录稳定出流量，并使用达西定律计算透水砖系统饱和渗透系数，计算公式见式(2)；采用式(3)计算此时透水砖的堵塞程度。待透水砖表面干燥、装置内滞留雨水排空

后，重复降雨过程，当透水砖系统堵塞程度达 90% 以上时，认为其已完全堵塞。

$$k = \frac{qL}{AH} \tag{2}$$

$$r = \frac{k_i - k_e}{k_i} \times 100\% \tag{3}$$

式中：q 为透水砖稳定出流量，m^3/s；k 为饱和渗透系数，m/s；H 为常水头高度，m；L 为水流的路径，m；A 为过水断面面积，m^2；r 为透水砖堵塞程度，%；k_i 为透水砖未堵塞时渗透系数，mm/min；k_e 为每次降雨结束后透水砖渗透系数，mm/min。

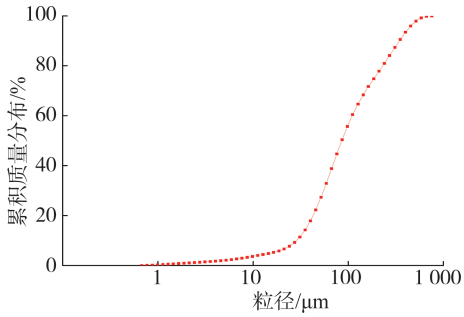


图 2　采集的透水砖表面沉积颗粒物粒径分布

Fig. 2　Particle size distribution of deposited sediments collected from surface of permeable bricks

1.2.2　入渗-产流模型

采用下渗曲线扣损法计算城市地表透水区域的产流量，其原理认为降水量由径流量和入渗量两部分组成。基于此，透水砖铺装的产流量为降水量与入渗量之差：

$$Q = P - F \tag{4}$$

其中

$$F = \int_t^{t+\Delta t} f \mathrm{d}t$$

式中：P 为降水量，mm；Q 为面层径流量，mm；F 为入渗量，mm，为便于模型模拟，入渗量可按降雨历时细化为入渗速率；f 为 t 时刻入渗速率，mm/min。

a. Horton 模型。Horton 模型是 Horton 于 1933 年建立的经验模型，假设充分供水，地表薄层积水，无地下水干扰条件下，用分离变量法求解一维垂直下渗条件的 Richards 方程推导而得。模型公式为

$$f = f_c + (f_0 - f_c)\mathrm{e}^{-kt} \tag{5}$$

式中：f_0 为初始入渗率，mm/min；f_c 为稳定入渗率，mm/min；k 为下渗速率衰减指数。

b. Kostiakov 模型。Kostiakov 模型是由 Kostiakov 在 1932 年通过试验得出的经验渗透公式，符合一般介质的入渗曲线，没有明确的适用条件，其公式为幂函数形式：

$$f = at^{-b} \tag{6}$$

式中 a、b 是利用试验数据拟合的参数。

c. Green-Ampt 模型。Green-Ampt 模型是 1911 年由 Green 和 Ampt 以毛细管理论为基础提出的具有相同初始含水量的均匀介质入渗模型。该模型假设湿润土壤为饱和持水状态，水在土壤中的迁移过程符合达西定律，湿润锋前的土壤空气压力为恒定值，湿润区土壤含水率保持不变，湿润锋处水压为恒定值，忽略湿润锋由初始含水量变为饱和含水量的土层厚度。模型公式为

$$f = K_s\left(1 + \frac{\psi_s \theta}{F}\right) \tag{7}$$

式中：K_s 为稳定渗透系数，mm/min；ψ_s 为有效水吸力，mm；θ 为缺水率。

d. Philip 模型。Philip 模型是 Philip 在 1975 年提出的，该模型假定充分供水，地表薄层积水，水力传导度和水力扩散度都是含水率的函数，结合边界初始条件运用 Bolman 变换，由一维垂直下渗条件的 Richards 方程级数解推导而得。模型公式为

$$f = \frac{1}{2}Bt^{-0.5} + A \tag{8}$$

式中：B 为吸湿率，$mm/min^{-0.5}$；A 为稳渗率，mm/min。

2　结果与分析

2.1　堵塞情景下各模型对透水砖单场降雨下渗-产流过程模拟

选取降雨重现期分别为 1、5、20 a 的 1 h 降雨过程，采用最小二乘法计算 Horton 模型、Kostiakov 模型、Green-Ampt 模型、Philip 模型 4 种下渗-产流模型参数，并对透水砖堵塞程度为 0.0%、46.0%、90.3% 时表面径流量进行模拟，图 3 为单场次降雨径流过程线及模拟过程线。由图 3 可见，由于降雨强度始终小于透水砖系统的饱和导水率导致雨水全部入渗，在重现期为 1 a 条件下 1 h 降雨过程中堵塞程度为 0.0% 的透水砖表面并未产生径流；除此之外，在其他降雨强度和堵塞程度时场次降雨径流速率随降雨历时增加呈现先快速增加后趋于稳定的趋势，这是因为开始降雨时透水砖的雨水入渗速率最大，然后逐渐衰减至系统饱和导水率后保持稳定[19]。径流速率增加至稳定阶段所需的时间受透水砖堵塞程度和降雨重现期影响；同一降雨强度下，透水砖堵塞程度越大，所需时间越短；同一堵塞程度下，降雨强度越大，所需时间越短。如，透水砖堵塞程度为 46.0%，降雨重现期为 1、5、20 a 时径流速率增长至稳定所需的时间分别为 42、20、14 min；而堵塞程度为 90.3% 时，时间则

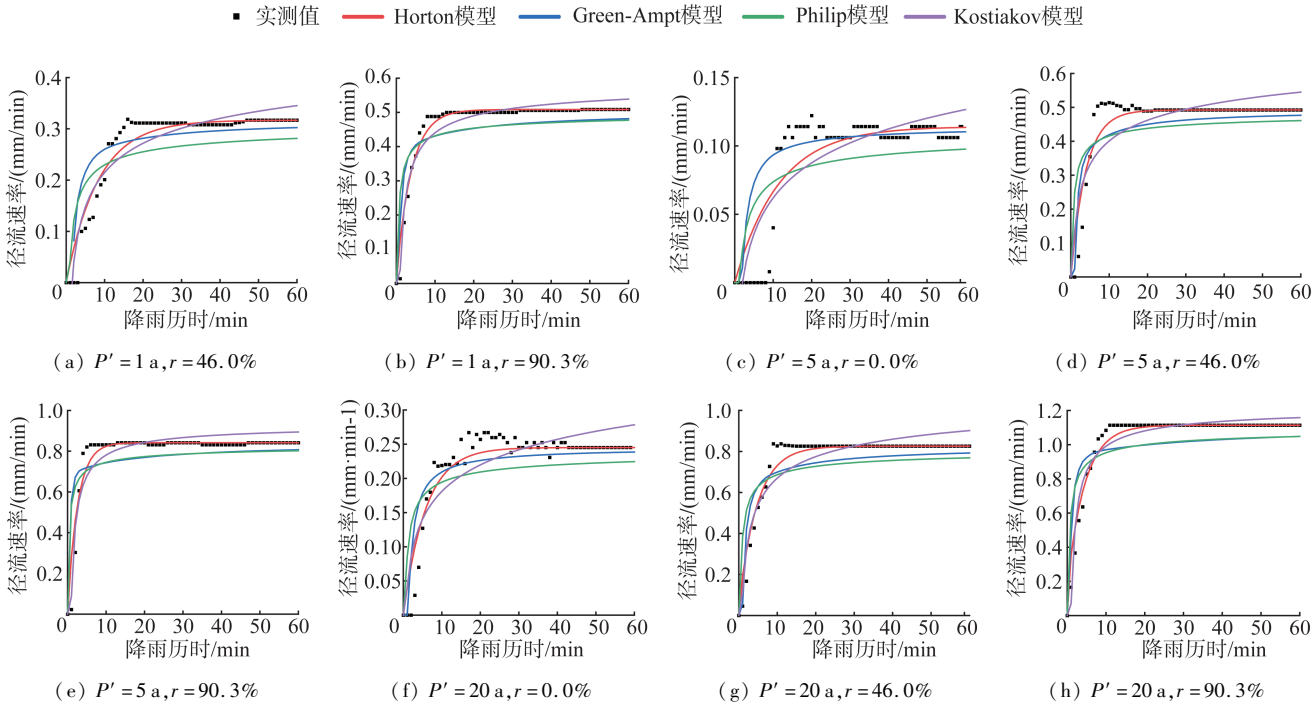


图 3　场次降雨径流过程及 4 种模型模拟径流过程线

Fig. 3　Runoff process of rainfall event and simulated runoff curves by four models

分别缩短为 31、12、10 min。与此同时，同一降雨重现期条件下，透水砖表面的稳定径流速率随堵塞程度增加而增加；而同一堵塞程度条件下，其稳定径流速率亦随重现期增加而增加。如，透水砖堵塞程度为 46.0%，重现期为 1、5、20 a 时场次降雨稳定径流速率分别为 0.32、0.49、0.83 mm/min；而堵塞程度为 90.3% 时，其稳定径流速率则分别为 0.51、0.84、1.11 mm/min。这是因为随透水砖堵塞程度增加，透水砖饱和导水率逐渐减小，使得稳定径流速率逐渐增加；而降雨重现期越大，降雨强度越大，透水砖表面径流速率自然越大。

对比 4 种模型对透水砖径流过程的模拟曲线可知，Horton 模型对透水砖各堵塞程度下的场次降雨稳定径流速率的模拟最贴合实测值；而 Kostiakov 模型、Green-Ampt 模型和 Philip 模型模拟得到的径流速率与实测稳定径流速率有偏差，且降雨重现期越小、透水砖堵塞程度越小，其偏差越大，说明透水砖堵塞程度和降雨重现期对模型性能均有直接影响。此外，在透水砖堵塞程度为 0.0% 时的两场降雨以及堵塞程度为 46.0%、重现期为 1a 的降雨中，4 种模型模拟产流时间比实测值均有所提前。这是因为透水砖未堵塞或堵塞初期其渗透性能大于降雨强度时，透水砖达到饱和导水率的时间较长，下渗速率衰减较慢；而下渗曲线拟合的过程中，4 种模型则低估了降雨初期透水砖的雨水下渗速率，使得产流时间提前。

2.2　全堵塞周期内透水砖路面下渗-产流模型模拟效果评价

2.2.1　综合评价

使用 Horton 模型、Kostiakov 模型、Green-Ampt 模型、Philip 模型对 5 种降雨重现期下的场次降雨在透水砖堵塞程度分别为 0.0%、15.0%、24.8%、28.3%、39.8%、46.0%、55.8%、69.0%、80.5% 和 90.3% 情况下的径流过程进行预测，并与实测值进行对比，通过平均绝对误差（MAE）、均方根误差（RMSE）和纳什效率系数（NSE）量化评价模型预测性能，结果如图 4 所示。一般而言，MAE 表示预测值与实测值绝对误差的平均值，其值越小越好[20]；RMSE 能够评估预测值和实测值的离散程度，其值越小越好[21]；而 NSE 通常用于验证水文模型模拟结果的好坏，其值越接近 1 说明该模型拟合效果越好[22]。由图 4 可见，Horton 模型、Kostiakov 模型、Green-Ampt 模型、Philip 模型对各场次降雨在不同堵塞程度下透水砖表面径流量模拟结果的 MAE 平均值分别为 0.016、0.038、0.049、0.062 mm，NSE 的平均值分别为 0.882、0.771、0.634、0.489，而 RMSE 的平均值分别为 0.034、0.048、0.064、0.076 mm。可见，3 个参数对 4 种模型效果评价结果一致，对全堵塞周期内透水砖表面径流模拟效果由好到差的依次为 Horton 模型、Kostiakov 模型、Green-Ampt 模型、Philip 模型。Horton 模型对不同降雨重现期时场次降雨的全堵塞周期透水砖径流过程的模拟效果最

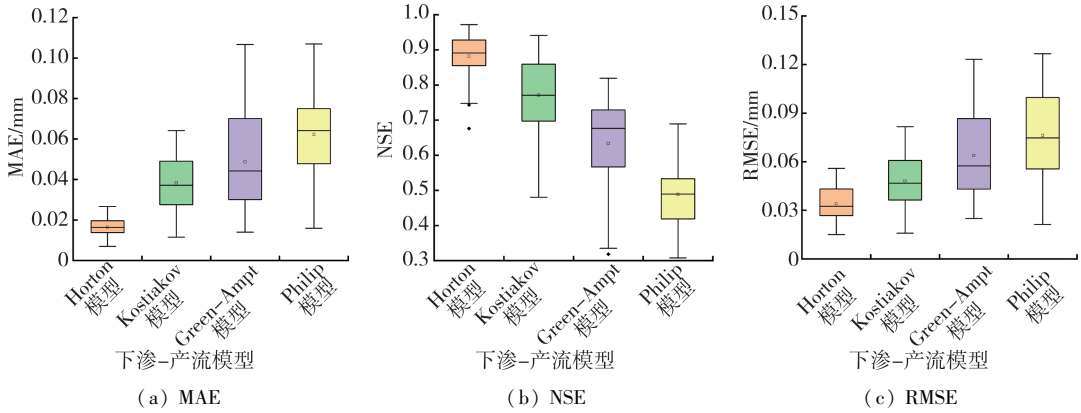


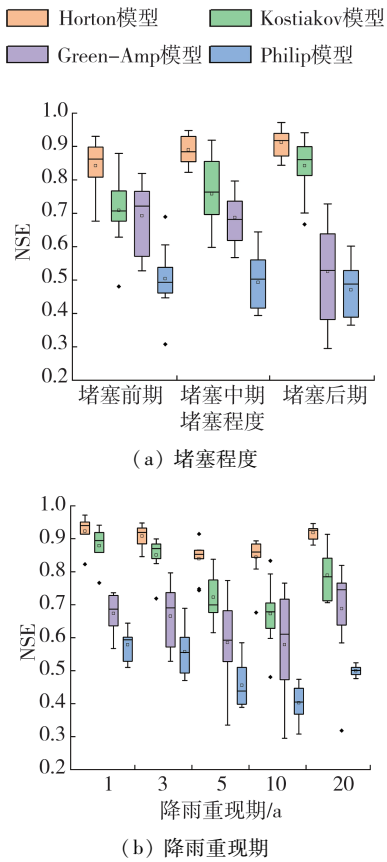
图 4　各模型对场次降雨事件透水砖表面径流的模拟效果

Fig. 4　Simulation performance of all models for runoff events on permeable brick surface

好,Philip 模型的模拟效果最差。

2.2.2　影响因素分析

分别计算并比较每场降雨时模型的 NSE 来评估各模型在透水砖不同堵塞时期和不同降雨强度时单场降雨产流过程的模拟效果,结果如图 5 所示。其中,将透水砖堵塞程度 0.0% ~28.3% 定义为堵塞前期,39.8% ~55.8% 定义为堵塞中期,69.0% ~90.3% 定义为堵塞后期。



(a) 堵塞程度

(b) 降雨重现期

图 5　不同堵塞程度和降雨重现期下各模型对场次降雨径流事件的模拟效果

Fig. 5　Simulation performance of all models for permeable brick runoff events at different clogging degrees based on clogging degree and rainfall intensity

由图 5(a)可见,在透水砖堵塞前、中、后期 3 个阶段,采用 Horton 模型模拟场次降雨事件产流过程时 NSE 均值最高(均为 0.8 以上),采用 Philip 模型模拟时的 NSE 均值最小(均小于 0.5);且在 3 个堵塞阶段中 Horton 模型的 NSE 值箱线图跨度最短,而其他模型在各个堵塞阶段的 NSE 值箱线图跨度变化较大;说明在不同堵塞阶段,Horton 模型均可较好地模拟透水砖表面径流过程。这是因为 Horton 模型推导时并未考虑渗透介质与含水率的影响[23],所以堵塞和降雨并未对其模拟透水砖表面径流过程产生较大影响。此外,随透水砖堵塞程度增加,Horton 模型和 Kostiakov 模型对透水砖产流过程的模拟效果随透水砖堵塞程度增加而提高,而 Green-Ampt 模型和 Philip 模型则表现为随堵塞程度增加而降低的趋势。由于 Horton 模型是超渗产流模型,透水砖堵塞使其产流机理由混合产流逐渐转变为超渗产流,因此堵塞后期透水砖产流机制与 Horton 模型的适用条件更加相符;使其 NSE 均值由堵塞前期的 0.842增至堵塞后期的 0.912。

由图 5(b)可见,在不同降雨重现期条件下,采用 Horton 模型模拟场次降雨事件在不同堵塞程度下产流过程时 NSE 均值最高(均为 0.8 以上),采用 Philip 模型模拟时的 NSE 均值最小;且在 5 个降雨重现期条件下,Horton 模型拟合的 NSE 值箱线图跨度最短,而其他模型在不同降雨重现期条件下拟合的 NSE 值箱线图跨度变化较大;说明 Horton 模型可较好地模拟不同降雨重现期时透水砖表面径流过程。随降雨重现期增加,4 种模型的拟合效果均表现出先降低后升高的趋势,说明降雨强度对模型的拟合效果有一定的影响,这与吴冰等[24]的研究结果一致。这可能是因为降雨强度的改变直接导致了模型参数发生变化,如 Horton 模型中初始入渗速率、Green-Ampt 模型中入渗量等,降雨强度增加会使初

始入渗速率增加，进而使初始入渗量增加，使得模型拟合结果较差；而降雨强度过大时，透水砖表面快速积水使其初始入渗速率同降雨强度较小时一样得以缓慢进行，从而导致降雨强度较小或较大时模型模拟效果较好。

2.3 Horton 模型参数与影响因素相关性分析

为进一步探究透水砖堵塞程度和降雨强度对 Horton 模型参数的影响，对 Horton 模型参数、透水砖堵塞程度、降雨强度进行 Pearson 相关性分析，结果见表1。由表1可见，稳定入渗率 f_c 与透水砖堵塞程度呈显著负相关关系（$r=0.964$，$p<0.01$）、与降雨强度不相关，这是因为稳定入渗速率等于透水砖系统饱和导水率，仅与透水砖系统结构组成、孔隙率等因素有关。随透水砖堵塞程度增加，其孔隙率下降、系统饱和导水率减小[25-26]，所以稳定入渗率也逐渐降低。初始入渗率 f_0 与透水砖堵塞程度呈显著负相关关系（$r=-0.360$，$p<0.05$），与降雨强度呈显著正相关关系（$r=0.977$，$p<0.01$）；下渗速率衰减系数 k 与透水砖堵塞程度呈显著正相关关系（$r=0.634$，$p<0.01$），与降雨强度呈显著正相关关系（$r=0.316$，$p<0.05$），说明透水砖堵塞程度和降雨强度均会对参数 f_0 和 k 造成影响。

表1 透水砖堵塞程度、降雨强度与 Horton 模型参数的 Pearson 相关分析结果

Table 1 Pearson correlation analysis result between clogging degree of permeable brick, rainfall intensity, and Horton model parameters

参数	变量	相关系数	显著性
f_c	堵塞程度	−0.964**	0.000
	降雨强度	0.295	0.052
f_0	堵塞程度	−0.360*	0.016
	降雨强度	0.977**	0.000
k	堵塞程度	0.634**	0.000
	降雨强度	0.316*	0.036

注：** 表示 $p<0.01$，相关性高度显著；* 表示 $p<0.05$，相关性显著。

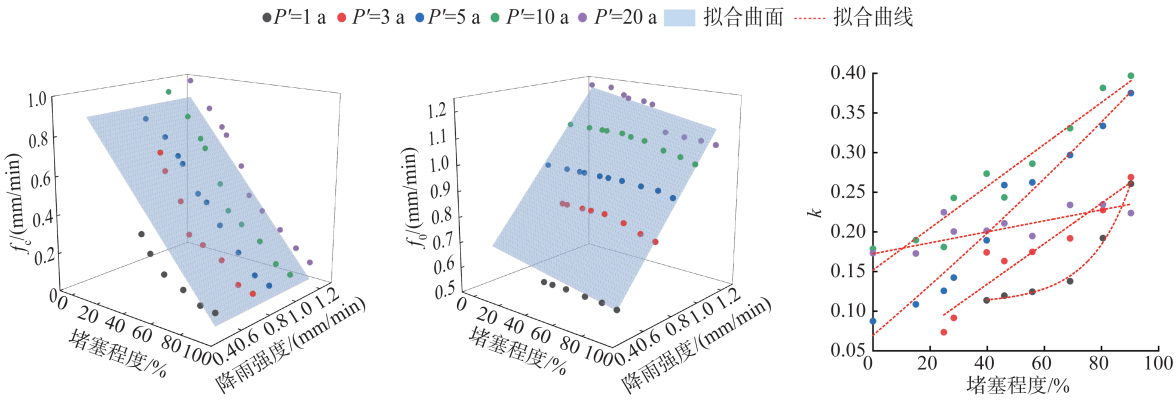
基于透水砖堵塞程度和降雨强度与 Horton 模型参数 f_c、f_0、k 的相关关系，结合各参数物理意义，使用一元或多元回归分析拟合 f_c、f_0、k 与透水砖堵塞程度和降雨强度的关系，建立基于透水砖堵塞程度 r 和降雨强度 i 的下渗-产流模型。虽然 k 与透水砖堵塞程度和降雨强度均显著相关，但由于 k 很大程度反映的是透水砖下渗过程，而透水砖在同一堵塞程度、不同降雨强度时很难用同一下渗过程表达，所以分别建立不同降雨强度下透水砖堵塞程度 r 与 k 的函数关系。透水砖堵塞程度、降雨强度与 Horton 模型参数的拟合曲面（曲线）、拟合公式分别如图6和表2所示。

表2 基于透水砖堵塞程度和降雨强度的 Horton 模型参数拟合公式

Table 2 Fitting equation of Horton model parameters based on clogging degree of permeable brick and rainfall intensity

P'/a	模型参数拟合公式	R^2
任意	$f_c=-0.96r+0.89$	0.93
任意	$f_0=-0.11r+0.77i+0.27$	0.97
1	$k=2.93e^{6.93r}+0.11$	0.99
3	$k=0.26r+0.03$	0.98
5	$k=0.34r+0.06$	0.96
10	$k=0.26r+0.15$	0.92
20	$k=0.07r+0.17$	0.78

由表2可见，由于参数 f_c 与降雨强度不相关，故参数 f_c 拟合公式中仅包括透水砖堵塞程度 r，确定系数 R^2 为0.93；参数 f_0 则包含堵塞程度 r 和降雨强度 i 两个变量，R^2 为0.97。参数 k 与透水砖堵塞程度 r 之间的 R^2 随降雨强度增大而减小；在降雨重现期为1 a时，两者间呈指数关系（$R^2=0.99$），降雨重现期为3～10 a时，两者关系变为线性（$R^2>0.90$）；当降雨强度增大至20 a时，R^2 降至0.78，说明此时透水砖堵塞程度对参数 k 的影响变小；这可能是因为降



(a) f_c　(b) f_0　(c) k

图6 透水砖堵塞程度、降雨强度与 Horton 模型参数拟合关系

Fig. 6 Fitting correlation between clogging degree of permeable brick, rainfall intensity, and Horton model parameters

雨强度过大时,无论透水砖是否堵塞,其表面均会快速积水,导致下渗速率衰减的趋势相近。可见,降雨强度对参数 k 的影响较复杂,不宜直接引入公式。将表 2 中 Horton 模型参数与变量的关系式代入式(5),结合式(4),即可得到基于透水砖堵塞程度 r 和降雨强度 i 的修正后 Horton 下渗-产流模型,见式(9)。由此,当获知透水砖堵塞程度以及此时降雨强度时,便可快速计算出 Horton 模型参数,进而预测出不同降雨强度不同堵塞程度时透水砖表面径流量。

$$Q = P - \int_{t}^{t+\Delta t} [-0.96r + 0.89 + (0.85r + 0.77i - 0.62)e^{-kt}]dt \tag{9}$$

3 结 论

a. 使用 4 种下渗-产流模型对不同降雨重现期时各堵塞程度透水砖场次降雨径流过程进行模拟,模拟效果从好到差依次为 Horton 模型、Kostiakov 模型、Green-Ampt 模型、Philip 模型;Horton 模型可以较好地模拟全堵塞周期内透水砖表面径流的下渗-产流过程。

b. Horton 模型和 Kostiakov 模型对透水砖产流过程的模拟效果随透水砖堵塞程度增加而提高,而 Green-Ampt 模型和 Philip 模型的模拟效果则随透水砖堵塞程度增加而降低。

c. 4 种下渗-产流模型对全堵塞周期内透水砖产流过程的模拟效果均随降雨重现期的增大而呈现先降低再升高的趋势。

d. 将堵塞程度和降雨强度引入 Horton 模型,建立了适用于不同堵塞程度透水砖路面的下渗-产流模型。

参考文献:

[1] 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))

[2] 张智贤,王俊岭,秦全城,等. 改良型透水铺装对弱透水土质地区 SS 的去除效果试验[J]. 水资源保护,2019,35(4):76-79. (ZHANG Zhixian, WANG Junling, QIN Quancheng, et al. Experiment on removal effect of improved permeable pavement on SS in weak permeable soil area[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4):76-79. (in Chinese))

[3] YONG C F, MCCARTHY D T, DELETIC A. Predicting physical clogging of porous and permeable pavements[J]. Journal of Hydrology, 2013, 481:48-55.

[4] ZHANG J, SHE R, DAI Z, et al. Experimental simulation study on pore clogging mechanism of porous pavement [J]. Construction and Building Materials, 2018, 187:803-818.

[5] KIA A, WONG H S, CHEESEMAN C R. Clogging in permeable concrete: a review[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 193:221-233.

[6] 成智文,耿康,陈晓薇,等. 雨水径流颗粒物对陶瓷透水砖堵塞的影响[J]. 水资源保护,2020,36(6):7-11. (CHENG Zhiwen, GENG Kang, CHEN Xiaowei, et al. Impacts of rainwater runoff particles on clogging of ceramic permeable brick[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6):7-11. (in Chinese))

[7] 赵飞,陈建刚,张书函,等. 透水铺装地面降雨产流模型研究[J]. 给水排水,2010,36(5):154-159. (ZHAO Fei, CHEN Jiangang, ZHANG Shuhan, et al. Study of rainfall-runoff model at permeable pavement [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(5): 154-159. (in Chinese))

[8] HORTON R E. The role of infiltration in the hydrologic cycle[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1933, 14(1):446-460.

[9] HORTON R E. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity [J]. Soil Science Society of America Journal, 1941, 5(C):399-417.

[10] KOSTIAKOV A N. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration [C]//Trans. 6th Cong. International. Soil Science, Russian Part A. Moscow: Springer, 1932: 17-21.

[11] HERBER G W, AMPT G. Studies of soil physics I: the flow of air and water through soils[J]. Journal Agriculture Science, 1911, 4:1-24.

[12] PHILIP J R. Stability analysis of infiltration [J]. Soil Science Society of America Journal, 1975, 39(6): 1042-1049.

[13] HU M, ZHANG X, SIU Y L, et al. Flood mitigation by permeable pavements in Chinese sponge city construction [J]. Water, 2018, 10(2):172.

[14] SONG J, WANG J, WANG W, et al. Comparison between different infiltration models to describe the infiltration of permeable brick pavement system via a laboratory-scale experiment[J]. Water Science and Technology, 2021, 84(9):2214-2227.

[15] 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.

(下转第 98 页)

[20] 李超超,程晓陶,王艳艳,等.洪涝灾害三参数损失函数的构建:Ⅰ. 基本原理[J].水利学报,2020,51(3):349-357. (LI Chaochao, CHENG Xiaotao, WANG Yanyan, et al. A three-parameter flood damage function: Ⅰ. theory and development[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2020,51(3):349-357. (in Chinese))

[21] 姜彤,赵晶,曹丽格,等.共享社会经济路径下中国及分省经济变化预测[J].气候变化研究进展,2018,14(1):50-58. (JIANG Tong, ZHAO Jing, CAO Lige, et al. Projection of national and provincial economy under the shared socioeconomic pathways in China[J]. Climate Change Research,2018,14(1):50-58. (in Chinese))

[22] 姜彤,赵晶,景丞,等.IPCC 共享社会经济路径下中国和分省人口变化预估[J].气候变化研究进展,2017,13(2):128-137. (JIANG Tong, ZHAO Jing, JING Cheng, et al. National and provincial population projected to 2100 under the shared socioeconomic pathways in China[J]. Climate Change Research, 2017, 13(2): 128-137. (in Chinese))

[23] 石勇,许世远,石纯,等.洪水灾害脆弱性研究进展[J].地理科学进展,2009,28(1):41-46. (SHI Yong, XU Shiyuan, SHI Chun, et al. A review on development of vulnerability assessment of floods[J]. Progress in Geography,2009,28(1):41-46. (in Chinese))

[24] WANG Xiaojie, XIA Junqiang, DONG Boliang, et al. Spatiotemporal distribution of flood disasters in Asia and influencing factors in 1980-2019[J]. Natural Hazards, 2021,108(3):2721-2738.

[25] 王盼,陆宝宏,张瀚文,等.基于随机森林模型的需水预测模型及其应用[J].水资源保护,2014,30(1):34-37. (WANG Pan, LU Baohong, ZHANG Hanwen, et al. Water demand prediction model based on random forests model and its application[J]. Water Resources Protection,2014, 30(1):34-37. (in Chinese))

[26] BREIMAN L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001,45(1):5-32.

[27] 姜彤,王艳君,苏布达,等.全球气候变化中的人类活动视角:社会经济情景的演变[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2020,12(1):68-80. (JIANG Tong, WANG Yanjun, SU Buda. Perspectives of human activities in global climate change: evolution of socio-economic scenarios[J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology(Natural Science Edition),2020, 12(1):68-80. (in Chinese))

[28] GAFFIN S R, ROSENZWEIG C, XING X S, et al. Downscaling and geo-spatial gridding of socio-economic projections from the *IPCC Special Report on Emissions Scenarios* (*SRES*)[J]. Global Environmental Change, 2004,14(2):105-123.

(收稿日期:2022-10-04 编辑:施业)

(上接第 31 页)

[16] RIBAS L V D S, COUTINHO A P, LASSABATERE L, et al. Effect of the choice of different methods on the permeable pavement hydraulic characterization and hydrological classification[J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics,2021,69(3):332-346.

[17] 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.

[18] 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))

[19] LIU Q, LIU S, HU G, et al. Infiltration capacity and structural analysis of permeable pavements for sustainable urban: a full-scale case study[J]. Journal of Cleaner Production,2021,288:125111.

[20] CHAI T, DRAXLER R R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): arguments against avoiding RMSE in the literature[J]. Geoscientific Model Development,2014,7(3):1247-1250.

[21] KRAUSE P, BOYLE D, BASE F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment[J]. Advances in Geosciences,2005,5:89-97.

[22] 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.

[23] SHUKLA M, LAL R, UNLEFER P. Experimental evaluation of infiltration models for different land use and soil management systems[J]. Soil Science, 2003, 168(3): 178-191.

[24] 吴冰,朱元骏,邵明安,等.降雨强度对含砾石土壤产沙及入渗的影响[J].水土保持学报,2011,25(6):87-91. (WU Bing, ZHU Yuanjun, SHAO Mingan, et al. Effect of rainfall intensity on sediment yield and infiltration on stony soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2011,25(6):87-91. (in Chinese))

[25] MEININGER R C. No-fines pervious concrete for paving[J]. Concrete International,1988,10(8):20-27.

[26] MONTES F, HASELBACH L. Measuring hydraulic conductivity in pervious concrete[J]. Environmental Engineering Science,2006,23(6):960-969.

(收稿日期:2022-10-24 编辑:王芳)