

# 不同降雨特征下透水沥青的径流系数变化

杜晓丽<sup>1,2</sup>, 郭 闯<sup>1</sup>, 杨明哲<sup>1</sup>, 崔瀚武<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. 北京建筑大学北京节能减排与城乡可持续发展省部共建协同创新中心, 北京 100044)

**摘要:** 针对不同降雨特征下透水沥青径流系数取值不清晰的问题, 通过模拟降雨分析了不同降雨特征下透水沥青的径流系数变化, 并得到了典型降雨条件时透水沥青径流系数建议取值范围。结果表明: 降雨重现期小于 20 a、降雨历时小于 120 min 时, 透水沥青雨量径流系数的随降雨重现期和降雨历时的增大而增大、随雨峰系数增大而减小; 流量径流系数随雨峰系数增大而增大, 随降雨重现期和降雨历时的增加呈先增大后减小的趋势; 降雨重现期和降雨历时是影响透水沥青雨量径流系数变化的主要因素, 雨峰强度是影响流量径流系数变化的主要因素。经拟合预测, 降雨重现期为 3~10 a、降雨历时小于 120 min 时, 透水沥青雨量径流系数和流量径流系数建议取值范围分别为 0.21~0.35 和 0.22~0.34。

**关键词:** 降雨特征; 透水沥青; 径流系数

中图分类号: TV121<sup>+</sup>. 2

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2025)02-0030-08

**Variation of runoff coefficient of permeable asphalt under different rainfall characteristics**//DU Xiaoli<sup>1,2</sup>, GUO Chuang<sup>1</sup>, YANG Mingzhe<sup>1</sup>, CUI Hanwu<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. 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:** In view of the unclear value of runoff coefficient of permeable asphalt under different rainfall characteristics, the variation of runoff coefficient of permeable asphalt under different rainfall characteristics was analyzed by simulating rainfall, and the recommended range of runoff coefficient of permeable asphalt under typical rainfall conditions was obtained. The results show that when the rainfall recurrence period is less than 20 a and the rainfall duration is less than 120 min, the volumetric runoff coefficient of permeable asphalt increases with the increase of rainfall recurrence period and rainfall duration, and decreased with the increase of rainfall peak coefficient. The flow runoff coefficient of permeable asphalt increases with the increase of rainfall peak coefficient, and increases first and then decreases with the increase of rainfall recurrence period and rainfall duration. Rainfall recurrence period and rainfall duration are the main factors affecting the variation of volumetric runoff coefficient of permeable asphalt, while rainfall peak intensity is the main factor affecting the variation of flow runoff coefficient of permeable asphalt. When the rainfall recurrence period is from 3 to 10 a and the rainfall duration is less than 120 min, the recommended value ranges of the volumetric runoff coefficient and flow runoff coefficient of permeable asphalt are 0.21 to 0.35 and 0.22 to 0.34, respectively.

**Key words:** rainfall characteristics; permeable asphalt; runoff coefficient

透水铺装是雨水径流源头控制的重要措施之一, 可通过下渗和滞蓄雨水来控制径流体积、削减径流峰值等。实际工程中常用径流系数来估算透水铺装的产流量。径流系数可分为雨量径流系数和流量径流系数, 雨量径流系数用于计算场次降雨在某一汇水区域内产生的径流总量, 流量径流系数可用于确定设计雨水管渠的最大流量<sup>[1-2]</sup>; 两者在排水系统

设计中均发挥重要作用。目前, 多数标准与规范中仅对透水铺装雨量径流系数进行了取值范围的界定, 如 GB 50400—2016《建筑与小区雨水控制及利用工程技术规范》中透水铺装地面的雨量径流系数建议取值范围为 0.29~0.36<sup>[3]</sup>, 《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》中透水铺装地面的雨量径流系数建议取值范围为 0.08~

基金项目: 北京市属高等学校高水平科研创新团队建设支持计划项目(BPHR20220108)

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

0.45<sup>[4]</sup>,北京市 DB11/685—2021《海绵城市雨水控制与利用工程设计规范》中透水铺装地面的雨量径流系数建议取值范围为 0.29~0.45<sup>[5]</sup>,JTG/T D33—2012《公路排水设计规范》中透水沥青路面的雨量径流系数范围为 0.60~0.80<sup>[6]</sup>;对透水铺装流量径流系数的取值仅在《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》中有所体现,建议取值为 0.08~0.45;此外,上述规范中仅 DB11/685—2021《海绵城市雨水控制与利用工程设计规范》对透水铺装径流系数取值进行了细化指导,即半透水铺装、全透水铺装和透水基层设有渗透管的全透水铺装取值分别不宜小于 0.5、0.4 和 0.3,并于条文说明中给出了不同降雨历时及重现期下透水铺装的径流系数<sup>[5]</sup>。可见,我国标准与规范中透水铺装径流系数的取值范围并不统一;同时,针对特定类型的透水铺装,标准与规范中也并未给予具体的取值说明。

据报道,降雨特征会显著影响透水铺装的径流控制效果,进而影响其径流系数。Chen 等<sup>[7]</sup>研究表明,表层排水型透水混凝土径流系数随降雨重现期增加而增大,当降雨重现期从 1 a 增加到 50 a 时,其雨量径流系数从 0.04 增大到 0.68;Zhu 等<sup>[8]</sup>利用 SWMM 模拟了透水沥青在不同降雨条件时对地表径流的控制效果,发现透水沥青雨量径流系数随降雨重现期的增加而增大,当降雨重现期从 5 a 增加到 30 a 时,其雨量径流系数从 0.733 增大到 0.811;麦叶鹏等<sup>[9]</sup>研究发现透水砖的径流体积控制率与降雨历时呈正相关,当降雨历时从 30 min 增加到 120 min 时,其径流体积控制率从 28% 增大到 40%;Hernández-Crespo 等<sup>[10]</sup>研究表明,西班牙瓦伦西亚雨型和桑坦德雨型时透水混凝土的径流体积控制率分别为 16% 和 23%。可见,降雨重现期、降雨历时、降雨雨型等降雨特征的改变,均会导致透水铺装对径流的控制效果发生变化,其径流系数亦随之变化;但目前的标准和规范并未考虑不同降雨特征时透水铺装径流系数的差异<sup>[3-4,6]</sup>,无法针对性指导其取值。鉴于此,本文以典型透水铺装——透水沥青系统为研究对象,分析不同降雨特征下透水沥青径流系数的变化,以期为不同降雨特征时透水沥青径流系数的选取提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 模拟透水沥青系统与模拟降雨系统

根据 JTG B01—2014《公路工程技术标准》双车道宽度和 GB50014—2021《室外排水标准》<sup>[11-12]</sup>道路雨水口间距,同比例缩小单个雨水口服务透水沥

青路面范围,搭建模拟透水沥青系统与模拟降雨系统(图 1)。模拟透水沥青系统装置主体为 150 cm×50 cm×50 cm(长×宽×高)的无盖箱体,参考 CJJ/T 190—2012《透水沥青路面技术规程》从上到下依次设置透水沥青面层 50 mm、透水基层 150 mm 和路基 300 mm<sup>[13]</sup>,其中面层采用 PAC-10 透水沥青,透水基层采用级配碎石,路基采用素土夯实(夯实度大于 90%)。透水沥青面层级配和碎石透水基层级配见表 1。于透水沥青面层、透水基层底部和土基层底部分别设置取样口、排水口和出流口。取样口用于收集降雨时透水沥青的表面径流,排水口用于降雨结束后透水基层蓄水排空;出流口与铺设在土基层底部的管道相接,管道上均匀打孔,用于收集土基层入渗雨水。透水沥青入渗速率采用变水头单环法<sup>[14]</sup>进行测定,关闭取样口和排水口,开启出流口,计算水面下降高度与其所用时间的比值,得到系统初始入渗速率为 0.45 mm/min。

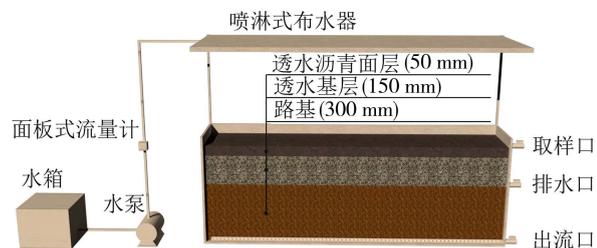


图 1 模拟透水沥青系统与模拟降雨系统

Fig. 1 Simulated permeable asphalt system and simulated rainfall system

表 1 透水沥青面层级配和碎石透水基层级配

Table 1 Grading of permeable asphalt surface layer and grading of gravel permeable base layer

填料位置	不同筛孔尺寸通过率/%						
	26.5	19.0	13.2	9.5	4.75	2.36	0.075
透水面层	100	100	100	95	60	16	4
透水基层	100	90	73	63	12	4	2

注:筛孔尺寸单位为 mm。

模拟降雨系统由喷淋式布水器、面板式流量计(LZM-6T ZYIA)、水箱和水泵组成;随机选取 4 种降雨强度,采用 Christiansen 均匀系数法评价模拟降雨系统的降雨均匀程度<sup>[15-16]</sup>,所得均匀系数  $C_{uc}$  均大于 80%,实际平均降雨强度和目标平均降雨强度之间相对误差均小于 5%,认为系统符合实验需求。

### 1.2 模拟降雨过程

根据芝加哥雨型分配模拟降雨各时段降雨量,得到不同降雨特征下的设计降雨过程线(图 2);设置雨峰系数  $r$  为 0.3、降雨历时  $t$  为 60 min,分别进行降雨重现期  $P$  为 1、3、10、20 a 的降雨试验,得到不同降雨重现期下的设计降雨过程线(图 2(a)),以

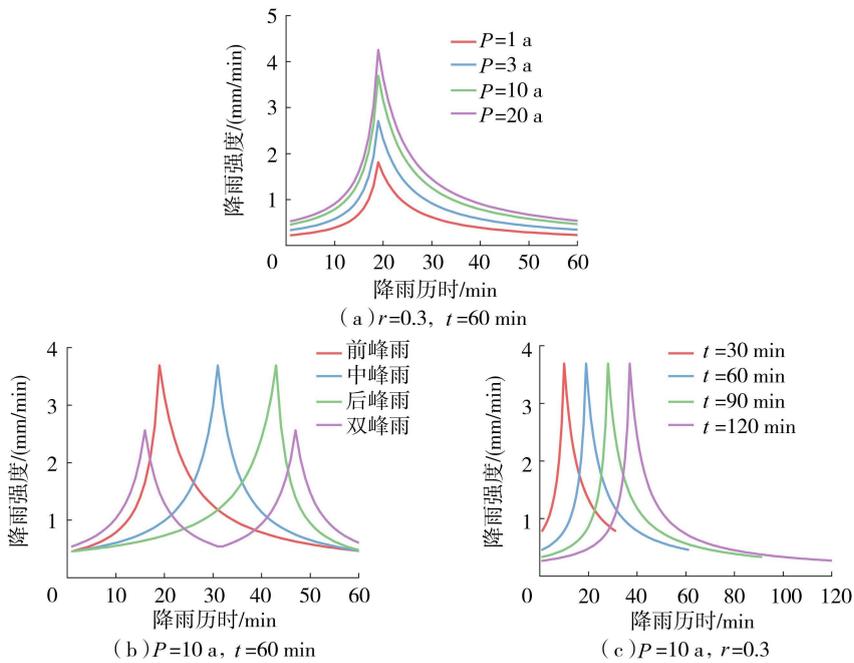


图 2 不同降雨特征下的设计降雨过程线

Fig. 2 Design rainfall process lines under different rainfall characteristics

此考察降雨重现期对透水沥青表面产流过程的影响;以降雨重现期为 10 a 的前峰雨(雨峰系数 0.3)、中峰雨(雨峰系数 0.5)、后峰雨(雨峰系数 0.7)和双峰雨(雨峰系数 0.5)分别进行 60 min 降雨试验,得到降雨过程线(图 2(b)),以此考察降雨雨型对透水沥青表面产流过程的影响;设置雨峰系数为 0.3、降雨重现期为 10 a,以降雨历时分别为 30、60、90 和 120 min 进行降雨试验,得到降雨过程线(图 2(c)),以此考察降雨历时对透水沥青表面产流过程的影响。模拟降雨前将不同场次降雨的逐分钟降水量结合装置面积换算为流量,模拟降雨过程中使用面板式流量计调节降水量,并关闭排水口和出口口,开启取样口收集透水沥青表面径流,记录逐分钟径流体积;降雨结束打开排水口和出口口将装置内集蓄水排空 48 h 后再进行下一场降雨。

### 1.3 雨量径流系数和流量径流系数

雨量径流系数是指场次降雨产生的径流总量与总降水量之比,即径流深度与降雨深度的比值;流量径流系数是场次降雨过程中最大汇流时段(形成高峰流量的时段)平均径流量与平均降水量之比<sup>[17]</sup>,其中最大汇流时段为降水峰值出现时刻到径流峰值出现时刻,该段时长记为  $t_c$ ,在降水峰值附近截取和  $t_c$  相等时间段的平均降水量,得到最大降水量时段平均降水量,记为  $\bar{q}_{t_c}$ ,在径流峰值附近截取和  $t_c$  相等时间段的平均径流量,得到最大径流量时段平均径流量,记为  $\bar{Q}_{t_c}$ 。雨量径流系数和流量径流系数的计算公式为

$$\Psi_c = R_c / P_c \quad (1)$$

$$\Psi_m = \bar{Q}_{t_c} / \bar{q}_{t_c} \quad (2)$$

式中:  $\Psi_c$  为场次雨量径流系数;  $R_c$  为场次降雨径流量;  $P_c$  为场次降水量;  $\Psi_m$  为流量径流系数。

### 1.4 模型预测效果评价

采用平均相对误差(MRE)、均方根误差(RMSE)和纳什效率系数(NSE)评价模型对不同降雨条件下透水沥青径流系数的预测效果。MRE 能反映模型的相对误差水平, RMSE 可衡量预测值和实测值之间的偏差。MRE 和 RMSE 越接近 0, 则模型的预测效果越好, NSE 常用于评价模型模拟结果, NSE 越接近 1, 则模型的预测效果越好。

## 2 结果与分析

### 2.1 降雨特征对透水沥青径流控制效果的影响

#### 2.1.1 降雨重现期对透水沥青径流控制效果的影响

采用雨峰系数为 0.3 的芝加哥雨型进行降雨重现期为 1、3、10、20 a 的 60 min 降雨试验, 得到不同重现期降雨和透水沥青表面径流过程线(图 3)。

由图 3 可知, 降雨重现期为 1 a 时透水沥青表面并未产生径流, 雨水全部进入透水沥青孔隙。在同一降雨雨型、同一降雨历时下, 透水沥青表面场次径流总量随降雨重现期的增加而增大, 径流体积控制率随降雨重现期的增大而减小; 其雨量径流系数随降雨重现期增加而增大, 降雨重现期为 1 a 和 3 a 时其雨量径流系数分别为 0 和 0.186。当降雨重现期由 10 a 增加至 20 a 后, 雨量径流系数仅从 0.337 增

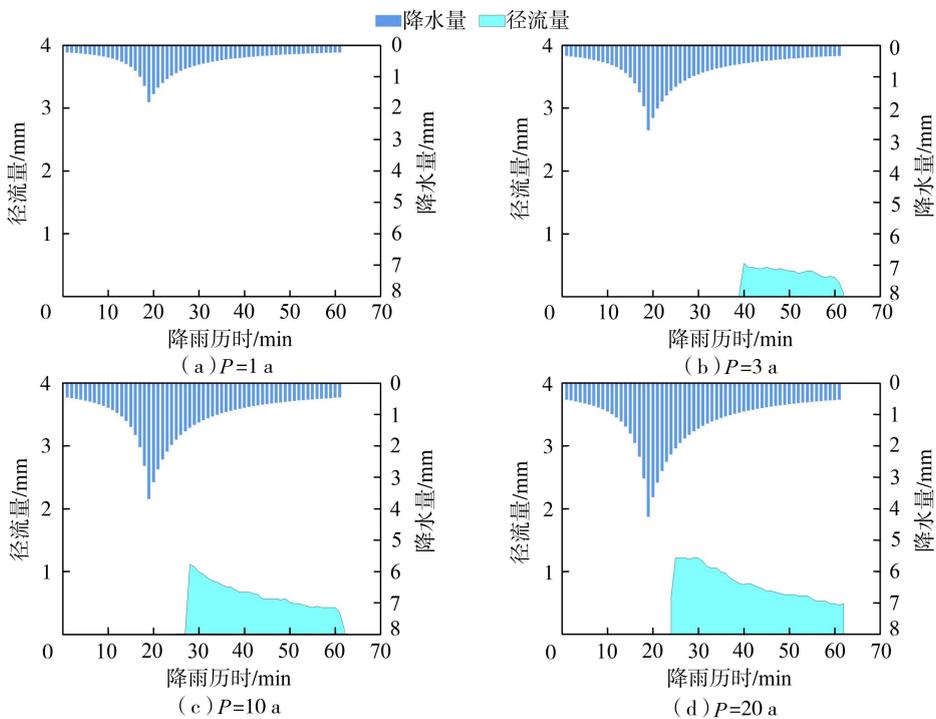


图 3 不同重现期降雨和透水沥青表面径流过程线

Fig. 3 Process lines of rainfall and surface runoff of permeable asphalt in different rainfall recurrence periods

大至 0.396, 可见透水沥青可以更好地削减中小降雨径流体积。这是因为在中小降雨时下渗径流优先填充透水沥青孔隙, 到达田间持水量再使得孔隙蓄满后才产流<sup>[18]</sup>, 所以产流量较小。

透水沥青对降雨峰值的削减率随降雨重现期的增加而减小, 如降雨重现期从 1 a 增加到 20 a, 峰值削减率从 100.00% 减小到 71.43%; 径流峰值相对降雨峰值的延后率随降雨重现期增加而减小, 如降雨重现期从 3 a 增加到 10 a, 峰值延后率从 110.53% 降低到 47.37%, 这是因为径流峰现时刻随产流时刻提前而前移所致。降雨重现期为 1、3、10 和 20 a 时透水沥青的流量径流系数分别为 0、0.186、0.336 和 0.329; 同雨量径流系数一样, 降雨重现期大于 10 a 后, 透水沥青的流量径流系数变化范围缩小; 说明透水沥青对中小降雨削峰效果也较好。

### 2.1.2 降雨雨型对透水沥青径流控制效果的影响

采用降雨重现期为 10 a 的芝加哥雨型进行 60 min 降雨试验, 具体雨型分别为前峰雨、中峰雨、后峰雨和双峰雨, 得到不同雨型降雨和透水沥青表面径流过程线(图 4)。

由图 4 可知, 在同一降雨重现期同一降雨历时 4 种不同雨型时透水沥青表面产流量略有差异, 前峰雨与中峰雨时透水沥青表面径流总量相差不大, 产流量大于双峰雨时产流量, 后峰雨时产流量最小; 前峰雨、中峰雨、后峰雨和双峰雨时透水沥青的径流体积控制率分别为 66.29%、65.46%、73.04% 和

69.86%, 其相应的雨量径流系数分别为 0.337、0.345、0.270 和 0.301。

可见, 降雨峰现位置可影响透水沥青的径流体积控制率, 进而影响其雨量径流系数。前峰雨和中峰雨时因降雨峰值靠前使得透水沥青内部持水量迅速增加、基质势减小, 后续再降雨时沥青内部饱和, 使降雨难以入渗截留<sup>[19]</sup>; 双峰雨因第一个雨峰强度较小, 透水沥青表面并未产流、系统内还未达到饱和持水量, 至第二个峰现时刻前饱和再产流; 而后峰雨因峰现时刻前降雨量储存于透水沥青孔隙的同时还不断向基层入渗, 直至系统内持水量达到饱和后才开始产流。所以, 后峰雨时透水沥青雨量径流系数最小, 而双峰雨次之, 前峰雨和中峰雨最大。

前峰雨、中峰雨和后峰雨时透水沥青对降雨峰值的削减率分别为 69.81%、67.06% 和 67.06%, 其透水沥青的流量径流系数相差不大, 分别为 0.338、0.378 和 0.380。径流峰值相对降雨峰值的延后率随雨峰系数的增加而减小, 如雨峰系数为 0.3、0.5 和 0.7 时, 峰值延后率分别为 47.37%、6.45% 和 -2.33%。一般而言, 降雨峰现时刻在稳定入渗速率出现时刻之前时透水沥青能以较大的入渗速率削减峰值雨量, 而雨峰系数增大会导致透水沥青在降雨峰现时刻前就近乎达到饱和含水量并使雨水以稳定入渗速率下渗<sup>[20]</sup>, 在降雨峰现时快速达到饱和含水量并开始产流从而使径流峰现时刻提前。

### 2.1.3 降雨历时对透水沥青径流控制效果的影响

采用降雨重现期为 10 a、雨峰系数为 0.3 的芝

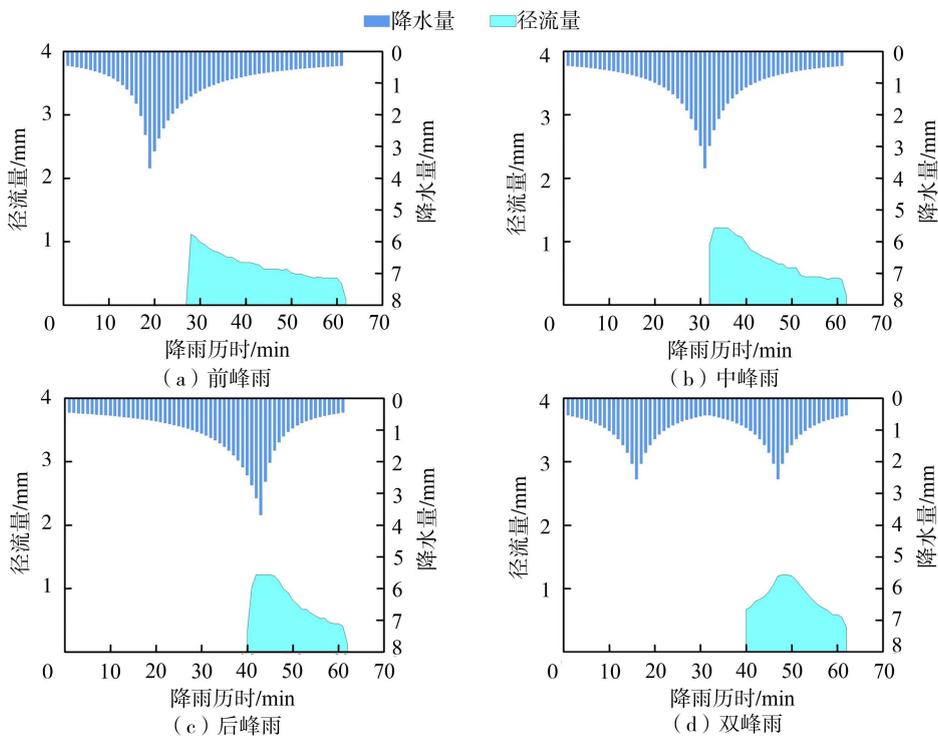


图 4 不同雨型降雨和透水沥青表面径流过程线

Fig. 4 Process lines of rainfall and surface runoff of permeable asphalt in different rainfall pattern

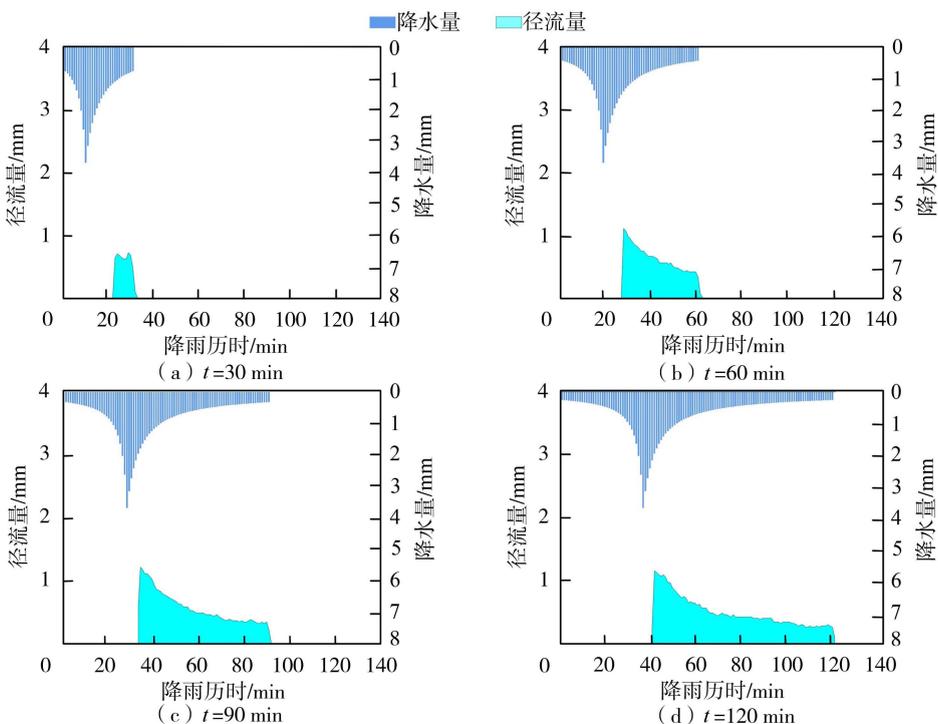


图 5 不同历时降雨和透水沥青表面径流过程线

Fig. 5 Process lines of rainfall and surface runoff of permeable asphalt in different rainfall duration

加哥雨型进行降雨历时为 30、60、90、120 min 的降雨,得到不同历时降雨和透水沥青表面径流过程线(图 5)。

由图 5 可知,在同一降雨重现期同一降雨雨型下透水沥青表面的径流总量随降雨历时增加而增大,透水沥青系统的径流体积控制率随降雨历时的

增加而减小;其雨量径流系数随降雨历时的增加而增大,降雨历时为 30、60、90、120 min 时雨量径流系数分别为 0.128、0.338、0.438 和 0.453。综上,降雨历时短、降雨总量小时,大部分降雨可储存于透水沥青内部孔隙,产流量较小,雨量径流系数较小;而降雨历时越长、降雨总量越大,沥青内部可存储水量有

限,产流量较大,雨量径流系数较大。

降雨历时为 30 min 时透水沥青对降雨峰值的削减率为 80.24%,其余降雨历时均约 68%;降雨历时为 30、60、90、120 min 所对应的流量径流系数依次为 0.213、0.332、0.365 和 0.353。这是由于降雨历时为 30 min 时的部分峰值雨量被透水沥青系统消纳,而降雨历时为 60、90、120 min 时透水沥青内部含水率在降雨峰现时刻已饱和,导致三者峰值削减率基本一致且比降雨历时为 30 min 时低,流量径流系数相差不大。径流峰值相对降雨峰值的延后率随降雨历时的增加而减小,如降雨历时从 60 min 增加到 120 min,峰值延后率从 52.63%减小到 13.51%。

## 2.2 透水沥青径流系数取值

### 2.2.1 影响因素分析

由前面的分析结果可知,透水沥青径流系数会受降雨特征变化影响;在实验条件下,透水沥青表面的雨量径流系数范围为 0~0.453,流量径流系数范围为 0~0.380,与《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》所给出的取值范围基本相符<sup>[5]</sup>。将降雨重现期、雨峰系数、降雨历时以及雨峰强度作为影响透水沥青雨量径流系数  $\Psi_c$  和流量径流系数  $\Psi_m$  的因素,分别对各影响因素与径流系数进行相关性分析,结果见表 2。由于径流系数与其影响因素并非完全的线性关系,选择 Spearman 相关系数作为相关性分析指标;同时进行偏相关分析以剔除影响因素间的相互影响。

表 2 不同降雨特征与雨量径流系数、流量径流系数相关性分析结果

Table 2 Correlation analysis results between rainfall characteristics and volumetric runoff coefficient, flow runoff coefficient

分析方法	控制因素	相关变量	相关系数	显著性 $p$
Spearman 相关性分析		$P$ 与 $\Psi_c$	0.632*	0.037
		$t$ 与 $\Psi_c$	0.736**	0.010
		$i_{\max}$ 与 $\Psi_c$	0.471	0.144
		$r$ 与 $\Psi_c$	-0.027	0.937
		$P$ 与 $\Psi_m$	0.422	0.196
		$t$ 与 $\Psi_m$	0.439	0.176
		$i_{\max}$ 与 $\Psi_m$	0.628*	0.039
		$r$ 与 $\Psi_m$	0.674*	0.023
偏相关分析	降雨历时	$P$ 与 $\Psi_c$	0.822	0.004
	降雨重现期	$t$ 与 $\Psi_c$	0.791	0.006
	雨峰强度	$r$ 与 $\Psi_m$	0.044	0.905
	雨峰系数	$i_{\max}$ 与 $\Psi_m$	0.867	0.001

注:其中  $P$  为降雨重现期, $t$  为降雨历时, $r$  为雨峰系数, $i_{\max}$  为雨峰强度。标注符号表示相关性显著,\* 表示  $p \leq 0.05$ ; \*\* 表示  $p \leq 0.01$ 。

由表 2 可知,降雨重现期和降雨历时与透水沥青雨量径流系数呈显著正相关关系,其相关系数分

别为 0.632( $p < 0.05$ ) 和 0.736( $p < 0.01$ ),说明两者均可显著影响透水沥青雨量径流系数。由此,选择降雨重现期和降雨历时作为影响因素对透水沥青雨量径流系数进行偏相关分析。当以降雨历时为控制因素时,降雨重现期与雨量径流系数呈显著正相关关系( $p < 0.01$ ),相关系数为 0.822;当以降雨重现期为控制因素时,降雨历时与透水沥青雨量径流系数呈显著正相关关系( $p < 0.01$ ),相关系数为 0.791。与 Spearman 相关分析相比,降雨重现期、降雨历时与透水沥青雨量径流系数的相关系数均增大,表明二者对雨量径流系数的影响是相拮抗的;且根据相关系数增大的数值可以看出降雨历时增加可显著削弱降雨重现期增加对雨量径流系数的影响。由表 2 还可知,雨峰强度和雨峰系数与透水沥青流量径流系数显著正相关关系( $p < 0.05$ ),其相关系数分别为 0.628 和 0.674,说明两者均可显著影响透水沥青流量径流系数。这是由于雨峰强度反映的是最大汇流时段的降雨量,而流量径流系数体现的是最大汇流时段内降雨量和径流量的关系,所以雨峰强度与流量径流系数相关性较高。由此选择雨峰系数和雨峰强度作为影响因素对透水沥青流量径流系数进行偏相关分析。当以雨峰强度为控制因素时,雨峰系数与透水沥青流量径流系数无显著相关性,说明雨峰系数无法作为独立因素对流量径流系数产生影响,其并非影响流量径流系数的关键因素;当以雨峰系数为控制因素时,雨峰强度与流量径流系数显著正相关关系( $p < 0.01$ ),相关系数为 0.867,明显高于 Spearman 相关系数,说明雨峰强度对流量径流系数的影响受雨峰系数抑制。

### 2.2.2 径流系数取值模型建立

由上,降雨重现期和降雨历时是影响透水沥青雨量径流系数的主要因素,雨峰强度是影响流量径流系数的主要因素;而雨峰强度和降雨重现期高度相关<sup>[21]</sup>,因此选择降雨重现期和降雨历时两个影响因素对雨量径流系数和流量径流系数进行非线性拟合,分别得到透水沥青雨量径流系数和流量径流系数与降雨重现期、降雨历时的定量关系式,见式(3)和式(4)。

$$\Psi_c = -174.85 + 174.98e^{-\frac{(P+28.92)}{4.15}} - 493.08e^{-\frac{(t-46.08)}{14.26}} + 493.47e^{-\frac{(P+28.92)}{4.15} - \frac{(t-46.08)}{14.26}} \quad (3)$$

$$\Psi_m = (16.72 - 5.07P - 1.63t + 0.004889t^2 + 1.16Pt) / (1000 - 42.19P - 20t + 4.46P^2 + 0.174256t^2 + 2.11Pt) \quad (4)$$

利用式(3)和式(4)对典型降雨条件下(因透水

沥青对中小降雨发挥较好的径流控制效果,本研究只选取降雨重现期小于 20 a 的情景)透水沥青雨量径流系数和流量径流系数进行预测,结果见图 6(a)和图 6(b);将预测值与实测值进行对比,结果如图 7 所示。由图 7 可见,不同降雨条件下透水沥青径流系数实测值和预测值基本在 1:1 线周边。其中,预测得到的雨量径流系数相对误差范围为 -12.37% ~ 4.73%, MRE 为 4.00%, RMSE 为 0.0135, NSE 为 0.9929;预测得到的流量径流系数相对误差范围为 -4.82% ~ 4.23%, MRE 为 3.41%, RMSE 为 0.0101, NSE 为 0.9932;说明采用上述公式可较好的预测不同降雨特征条件下透水沥青的径流系数。

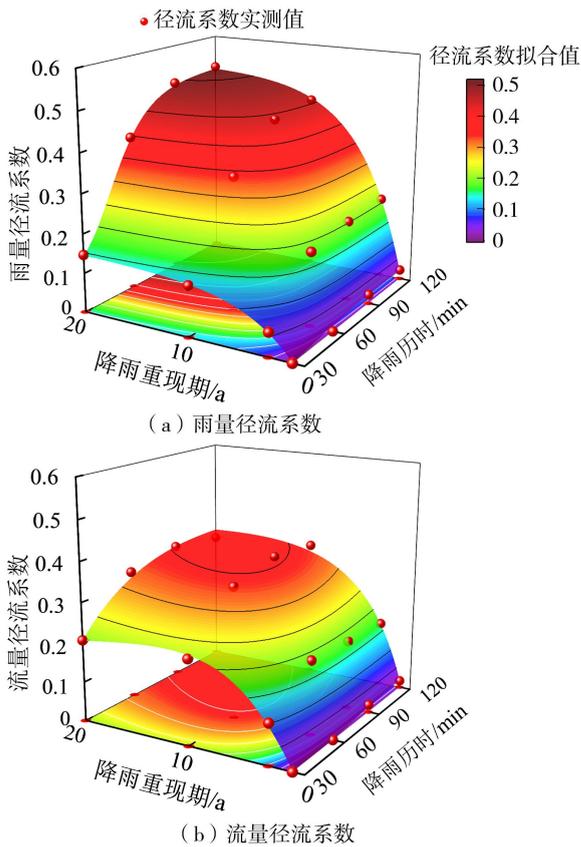


图 6 非线性拟合透水沥青径流系数  
Fig. 6 Runoff coefficients of permeable asphalt obtained by nonlinear fitting

由拟合结果可知,降雨重现期在 1~20 a 且降雨历时在 30~120 min 时透水沥青的雨量径流系数范围在 0.00~0.52,流量径流系数范围在 0.00~0.37。由于实际降雨场景中所有类型下垫面的产流均汇于雨水口而进入雨水管渠;因此,透水沥青径流系数的选择应以服务雨水口和排水管渠设计为基准,即选择重现期为 3~10 a 降雨所对应的径流系数作为透水沥青径流系数取值依据<sup>[12]</sup>,建议透水沥青雨量径流系数在 0.21~0.35 之间取值,流量径流系数在

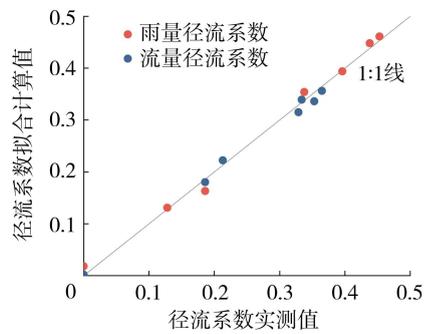


图 7 径流系数预测值与实测值对比  
Fig. 7 Comparison of predicted values and observed values of runoff coefficient

0.22~0.34 之间取值。降雨重现期小于 3 a、降雨历时小于 30 min 时,透水沥青雨量径流系数和流量径流系数可分别在 0.21 和 0.22 以下取值;降雨重现期大于 10 a 且降雨历时大于 60 min 时,透水沥青雨量径流系数和流量径流系数可分别在 0.35 以上和 0.34 以上取值。此外,透水沥青径流系数取值还应综合考虑透水沥青结构形式、坡度、地形等因素影响。

### 3 结论

a. 透水沥青雨量径流系数随降雨重现期和降雨历时增加而增大、随雨峰系数的增加而减小;其中,降雨重现期和降雨历时是影响其变化的主要因素;降雨重现期为 3~10 a、降雨历时小于 120 min 时,建议透水沥青雨量径流系数在 0.21~0.35 取值,降雨重现期在 3 a 及以下或降雨历时小于 30 min 时可在 0.00~0.21 取值,降雨重现期在 10 a 及以上且降雨历时大于 60 min 时可在 0.35~0.52 取值。

b. 透水沥青流量径流系数随雨峰强度、雨峰系数的增加而增大,随降雨重现期和降雨历时增加呈先增大后减小的趋势;雨峰强度是影响其变化的主要因素;降雨重现期为 3~10 a、降雨历时小于 120 min 时,建议透水沥青流量径流系数在 0.22~0.34 取值,降雨重现期在 3 a 及以下或降雨历时小于 30 min 时可在 0.00~0.22 取值,降雨重现期在 10 a 及以上且降雨历时大于 60 min 时可在 0.34~0.37 取值。

### 参考文献:

[1] 唐宁远,车伍,潘国庆.城市雨洪控制利用的雨水径流系数分析[J].中国给水排水,2009,25(22):4-8. (TANG Ningyuan, CHE Wu, PAN Guoqing. Runoff coefficient analysis for urban stormwater and flood control and utilization[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(22):4-8. (in Chinese))

- [ 2 ] 陈彦熹,李旭东,刘建华,等. 建筑小区海绵城市流量径流系数计算模型研究[J]. 给水排水,2018,44(12):77-81. (CHEN Yanxi, LI Xudong, LIU Jianhua, et al. Study on discharge runoff coefficient calculation model of sponge city site[J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(12):77-81. (in Chinese))
- [ 3 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑与小区雨水控制及利用工程技术规范:GB 50400—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [ 4 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南:低影响开发雨水系统构建(试行)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [ 5 ] 北京市规划和自然资源委员会,北京市市场监督管理局. 海绵城市雨水控制与利用工程设计规范:DB11/685—2021[S]. 北京:北京市规划和自然资源委员会,2021.
- [ 6 ] 中华人民共和国交通运输部. 公路排水设计规范:JTG/T D33—2012[S]. 北京:人民交通出版社,2013.
- [ 7 ] CHEN Wang, ZHENG Mulian, GAO Qian, et al. Simulation of surface runoff control effect by permeable pavement[J]. Water Science and Technology, 2021, 83(4):948-960.
- [ 8 ] ZHU Haoran, YU Mingming, ZHU Junqing, et al. Simulation study on effect of permeable pavement on reducing flood risk of urban runoff [J]. International Journal of Transportation Science and Technology, 2019, 8(4):373-382.
- [ 9 ] 麦叶鹏,黄国如,解河海,等. 基于 Hydrus-1D 模型的 LID 措施雨水径流控制效应研究[J]. 水利学报,2022, 53(7):811-822. (MAI Yepeng, HUANG Guoru, XIE Hehai, et al. Study on rainwater runoff control effect of LID measures based on Hydrus-1D [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(7):811-822. (in Chinese))
- [ 10 ] HERNÁNDEZ-CRESPO C, FERNÁNDEZ-GONZALVO M, MARTÍN M, et al. Influence of rainfall intensity and pollution build-up levels on water quality and quantity response of permeable pavements[J]. Science of the Total Environment, 2019, 684:303-313.
- [ 11 ] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程技术标准:JTG B01—2014[S]. 北京:人民交通出版社,2015.
- [ 12 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 室外排水设计标准:GB 50014—2021[S]. 北京:中国计划出版社,2021.
- [ 13 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 透水沥青路面技术规程:CJJ/T 190—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [ 14 ] 吴允红. 渗排型透水铺装径流控制效能及其堵塞维护试验研究[D]. 北京:北京建筑大学,2022.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] 杜晓丽,郑泽东,尹子杰,等. 透水砖堵塞程度对径流颗粒冲刷规律的影响[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))
- [ 17 ] 张郁媛,宫永伟,张贤巍,等. 基于监测和模拟的简单式绿色屋顶径流系数取值范围分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(1):14-25. (ZHANG Yuyuan, GONG Yongwei, ZHANG Xianwei, et al. Monitoring and simulation-based analysis on runoff coefficient value-taking range of extensive green roof [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(1):14-25. (in Chinese))
- [ 18 ] YANG Wenyu, LI Dan, SUN Ting, et al. Saturation-excess and infiltration-excess runoff on green roofs[J]. Ecological Engineering, 2015, 74:327-336.
- [ 19 ] 李婷,宋新山,丁相毅,等. 海绵体透水铺装水动力过程初步研究[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(6):1220-1230. (LI Ting, SONG Xinshan, DING Xiangyi, et al. Preliminary research on hydrodynamic process of sponge permeable pavement [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(6):1220-1230. (in Chinese))
- [ 20 ] 杨海,姜月华,周权平,等. 太湖流域平原水文试验区降雨产流过程特征研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(6):506-514. (YANG Hai, JIANG Yuehua, ZHOU Quanping, et al. Study on characteristics of rainfall-runoff generation processes at a plain experimental area in Taihu Lake Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(6):506-514. (in Chinese))
- [ 21 ] 吴允红,李俊奇,林聪,等. 渗排型透水铺装下渗出流控制效能场地试验研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(11):126-132. (WU Yunhong, LI Junqi, LIN Cong, et al. Field test of bottom outflow control efficiency in permeable pavement with underdrainage [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(11):126-132. (in Chinese))

(收稿日期:2024-07-14 编辑:徐娟)