

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.03.013

降雨特征对半透水道路径流系数的影响

王建龙^{1,2}, 彭柳苇¹, 张敬玉^{1,3}, 李凯¹, 王泽熙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, 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;

3. 中国城市建设研究院有限公司, 北京 100120)

摘要:通过单车道半透水道路物理模型试验,采用人工模拟降雨的方法,系统研究了降雨强度、降雨历时、雨峰系数和雨型对半透水道路径流系数的影响。结果表明:径流系数随着重现期的增大而增大,当重现期从0.5 a增加到20 a时,径流系数从0.093增加到0.377;径流系数随着降雨历时的增大而减小,随着雨峰系数的增大而增大;当重现期和降雨历时保持不变时,均匀雨型条件下的径流系数略大于芝加哥雨型条件下的径流系数;重现期对半透水道路径流系数的影响最大,雨峰系数和雨型对其影响较小。

关键词:径流系数;半透水道路;降雨特征;重现期;降雨强度

中图分类号:TV121⁺.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)03-0096-06

Influences of rainfall characteristics on runoff coefficient of semi-permeable roads // WANG Jianlong^{1,2}, PENG Liuwei¹, ZHANG Jingyu^{1,3}, LI Kai¹, WANG Zexi¹ (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; 3. China Urban Construction Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100120, China)

Abstract: The effects of rainfall intensity, rainfall duration, rainfall peak coefficient, and rainfall pattern on the runoff coefficient of semi-permeable roads were systematically investigated via physical model experiments with simulated rainfall events. The results show that runoff coefficient increases with rainfall return period, with the value increasing from 0.093 to 0.377 when the return period is varied from 0.5 a to 20 a; it also decreases with the increase of rainfall duration and increases with the increase of rainfall peak coefficient; the runoff coefficient under the condition of uniform rainfall pattern is slightly larger than that of Chicago rainfall pattern when rainfall return period and rainfall duration are kept in the same experimental condition. Rainfall return period has the most important influence on the runoff coefficient of semi-permeable roads, followed by rainfall peak coefficient and rainfall pattern.

Key words: runoff coefficient; semi-permeable road; rainfall characteristics; return period; rainfall intensity

径流系数是汇水面积上产生的径流量与降水量的比值,其合理取值对于确定城市防洪排涝设施、排水管网、低影响开发设施规模以及数学模型中参数取值具有重要意义^[1-2]。有研究表明,降雨特征对径流系数有重要影响^[3],降水量和降雨强度与径流系数呈正相关关系^[4-5];当雨型不变时,径流系数与坡度、降水量、降雨强度呈线性关系^[6],与降雨历时呈指数关系^[7]。张敬玉等^[8]研究发现,低重现期时

坡度对径流系数影响大,高重现期时坡度对径流系数影响小。Dunkerley^[9]研究表明,当总降水量和降雨历时相同时,后峰型降雨径流系数大于前峰型降雨径流系数。Philip等^[10-11]研究表明,土壤含水率和平均入渗率呈负相关的线性关系,随着土壤前期含水率的增加,同一时间非稳渗阶段的入渗率迅速降低,且趋于稳定入渗率的时间变短,因此,在场次总降水量不变的条件下,初期降雨强度越大,下渗雨

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC3001402);水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07103-002)

作者简介:王建龙(1978—),男,教授,博士,主要从事城市雨水控制利用研究。E-mail:wjl-xt@163.com

量越多,径流系数越小。孔花^[12]的研究表明径流系数与降水量呈线性关系,且随着降水量的增加而增加;径流系数与降雨历时呈指数关系,且随着降雨历时延长逐渐增大,最后趋于稳定;雨峰系数越大,径流系数越大。冯玉启等^[13]的研究表明雨型对径流系数的峰值和均值具有重要影响。许翼等^[14]对回填土草坪径流系数的研究表明径流系数随着降水量的增加而增加,在恒定降雨强度下,降雨历时延长导致径流系数的增长率降低。下垫面类型对径流系数也具有重要影响^[15-16],王坤^[17]通过人工模拟降雨装置,研究了不透水沥青和水泥混凝土路面在不同降雨条件下径流系数的动态变化规律,结果表明沥青路面和水泥混凝土路面径流系数随降雨历时、降雨强度和降水量等变化而变化。冯玉启等^[13]研究发现半透水道径流系数随降雨强度的变化存在一个敏感区间,在低降雨强度敏感区间外,径流系数值很小,而在敏感区间内,径流系数随降雨强度迅速增加,其增长率先增后减,最后趋于稳定。张爱江等^[18-19]通过研究路面的渗透能力发现,透水路面的径流系数小于传统不透水路面,透水路面径流量平均降低91%以上。武晟^[20]采用模拟降雨的方法,对屋面、不透水砖、水泥路面、透水砖及草地的径流系数进行了实验研究,结果表明,透水性好下垫面径流系数受重现期和降雨历时影响较小,在相同降雨条件下,径流系数从小到大的弱透水性下垫面依次为水泥路面、屋面、不透水砖。目前关于径流系数的研究主要围绕不透水下垫面和透水沥青、透水砖、绿地等透水下垫面以及降雨参数对径流系数的影响,而对半透水道径流系数的研究较少。

在雨水排水相关规范中,一般规定径流系数按照下垫面类型取值,且规范通常只给出不同类型下垫面的取值范围,工程设计时取值存在一定主观性,导致计算结果误差较大。在CJJ/T 190—2012《透水沥青路面技术规程》中将透水沥青路面结构分为I型、II型、III型3种类型,但关于不同结构类型透水沥青路面的径流系数在该标准中并没有明确给出。JTG/T D33—2012《公路排水设计规范》规定透水沥青路面径流系数取0.60~0.80,该标准中虽然给出了透水沥青路面径流系数取值范围,但并未明确不同类型铺装结构应该如何取值。针对上述问题,本文选择实际工程中市政道路透水沥青路面广泛采用的半透水路(I型结构)为研究对象,系统研究了降雨参数对径流系数的影响。

1 研究方法

1.1 试验装置

人工模拟降雨装置净高为15 m,有效降雨面积为300 m²,雨滴直径为1.5~5.0 mm,降雨均匀度大于0.9,降雨强度范围为6~240 mm/h,人工模拟降雨采用自动控制系统,试验期间降雨强度的误差不超过5%。

试验装置采用1:1单车道物理模型,系统图和剖面图如图1所示,横坡和纵坡坡度均为1%,路面尺寸为18 m×4 m,雨水口尺寸为750 mm×450 mm,图中 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 和 Q_4 分别为路面径流量、纵向渗流量、横向渗流量和雨水口入流量。试验道路按照CJJ/T 190—2012《透水沥青路面技术规程》铺设,道路面层材质为OGFC-12型,铺装结构采用透水沥青I型排水方式。通过循环泵将路面径流和纵向渗流输送到道路上游的配水箱(尺寸为0.3 m×4 m×0.3 m),然后通过V型堰均匀排入道路,模拟上游来水(客水)。

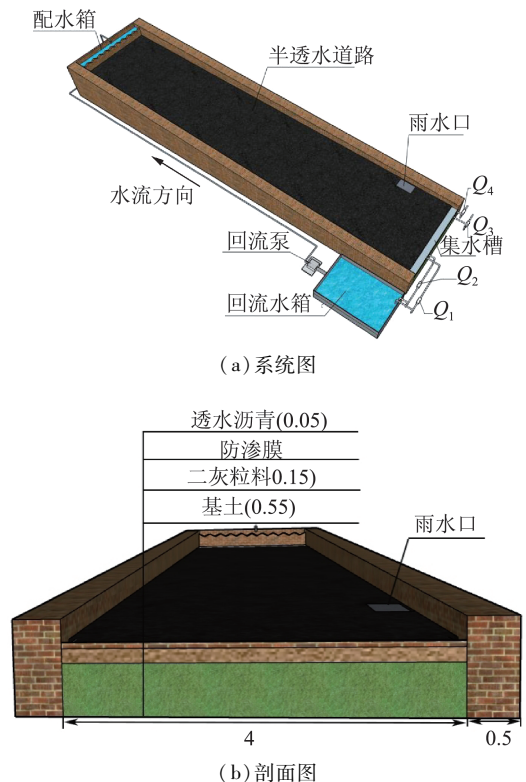


图1 试验装置(单位:m)

Fig.1 Experimental system (unit: m)

试验仪器设备和参数:人工模拟降雨系统(1套)降雨强度范围为6~240 mm/h;超声波流量计(4台)流量测量范围为0.2~16 m³/h;翻斗式雨量计(4台)降雨强度测量范围为6~240 mm/h;数据采集器(4台)采集时间间隔为1 s;激光水准仪(2台)安平精度为±0.3°,往返误差为1 mm/km;水泵(1

台)最大流量 Q_{\max} 为 60 L/min,最高扬程 H 为 4 m。

1.2 试验方法

1.2.1 流量监测

流量监测包括路面径流量、纵向渗流量、横向渗流量、雨水口入流量,其中,纵向渗流量和横向渗流量之和为路面总渗透量。在道路路面层末端设有双层集水槽,分别收集路面径流和纵向渗流;在道路雨水口一侧透水面层下面埋设钢槽,钢槽上方为铁丝网,防止沥青材料进入钢槽内,钢槽末端连接管道,收集面层横向渗流;在雨水口最低处安装管道,收集进入雨水口的径流。在降雨初期和末期,路面产流较小,流量计误差较大,采用人工取样测量流量,其余时刻采用超声波流量计(型号为 DCT1158)测量流量。

1.2.2 降雨参数

试验期间选择的降雨重现期为 0.5 a、1 a、3 a、5 a、10 a 和 20 a,降雨历时为 30 min、60 min 和 120 min,北京市根据降雨时空分布特征划分为 2 个降雨分区,试验采用北京市Ⅲ区的暴雨强度公式(式(1))计算暴雨强度,雨型采用芝加哥雨型。

$$q = \begin{cases} \frac{2\,001(1 + 0.811\lg P)}{(t + 8)^{0.711}} & P \leq 10 \text{ a} \\ \frac{1\,378(1 + 1.047\lg P)}{(t + 8)^{0.642}} & P > 10 \text{ a} \end{cases} \quad (1)$$

式中: q 为暴雨强度, $L/(s \cdot \text{hm}^2)$; P 为设计降雨重现期, a; t 为降雨历时, min。

根据芝加哥雨型过程线对降雨进行分配,得到不同重现期、不同历时、不同雨峰系数 r 的设计降雨过程线,如图 2 所示。

1.2.3 径流系数

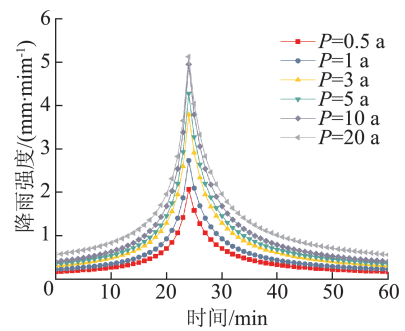
径流系数计算公式为

$$\varphi = \frac{R}{k} = \frac{Q_1 + Q_4}{k_1} \quad (2)$$

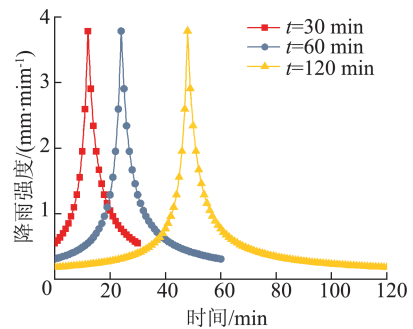
式中: φ 为径流系数; R 为径流深度, mm; k 为降雨深度, mm; k_1 为场次总降水量, m^3 。

1.3 试验工况

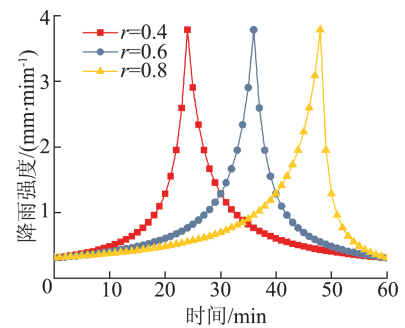
为验证试验过程中测量设备监测精度和运行的稳定性以及试验平台运行的稳定性,对不同工况试验结果进行了水量平衡误差分析。水量平衡误差为场次总降水量和监测流量的差值与场次总降水量的比值。不同试验工况下水量平衡误差分析的最小值、最大值和平均值见表 1。从表中可知,试验期间误差变化范围为 1.73% ~ 12.67%,表明降雨装置、监测设备和道路平台运行较稳定,可以满足试验要求。



(a) 不同重现期 ($t = 60 \text{ min}, r = 0.4$)



(b) 不同历时 ($P = 3 \text{ a}, r = 0.4$)



(c) 不同雨峰系数 ($P = 3 \text{ a}, t = 60 \text{ min}$)

图 2 降雨过程线

Fig. 2 Rainfall hydrographs

表 1 水量平衡误差分析

Table 1 Error analysis of water balance

雨型	降雨参数	误差/%		
		最小值	最大值	平均值
芝加哥雨型	$0.5 \text{ a} \leq P \leq 20 \text{ a}$	12.67	2.48	7.26
	$30 \text{ min} \leq t \leq 120 \text{ min}$	11.23	5.44	8.92
	$0.4 \leq r \leq 0.8$	11.71	8.21	10.00
均匀雨型	$0.5 \text{ a} \leq P \leq 10 \text{ a}$	11.44	1.73	6.37

2 结果与讨论

2.1 降雨重现期对径流系数的影响

芝加哥雨型条件下,降雨历时为 60 min、雨峰系数为 0.4 时,不同重现期条件下径流系数变化特征如图 3 所示。由图 3 可知,随着重现期的增加,半透水道路径流系数逐渐增大,路面径流量和纵向渗流量增长缓慢,横向渗流量和雨水口入流量增长较快。重现期从 0.5 a 增加到 20 a,径流系数从 0.093 增加

到 0.377, 当 $0.5 \text{ a} \leq P < 1 \text{ a}$ 时, 径流系数增长速率最快; 重现期从 0.5 a 增加到 20 a, 雨水口入流量和横向渗流量分别增加了 1.353 m^3 和 1.842 m^3 , 雨水口入流量占场次总降水量的比例从 10% 增加到 38%, 横向渗流量占场次总降水量的比例从 80% 减小到 51%。从试验结果看, 当 $0.5 \text{ a} \leq P < 1 \text{ a}$ 、 $1 \text{ a} \leq P < 10 \text{ a}$ 时, 半透水道路的径流系数分别为 0.093 ~ 0.197、0.197 ~ 0.347; 当 $10 \text{ a} \leq P \leq 20 \text{ a}$ 时, 半透水道路的径流系数接近 0.40。因此, 随着降雨强度的增大, 雨水口和侧向渗透排水设施的效率都在提高, 在透水铺装效果评估时, 应充分考虑重现期的影响, 同时要结合透水铺装的结构特点来综合分析。与 JTG/T D33—2012《公路排水设计规范》规定的透水沥青路面径流系数(0.60 ~ 0.80)相比, 径流系数试验结果偏低, 主要与道路结构相关。本试验采用 CJJ/T 190—2012《透水沥青路面技术规程》给出的 I 型结构, 假设横向渗流全部通过路缘石底部透水水泥混凝土自然下渗, 因此未计入径流系数的计算。

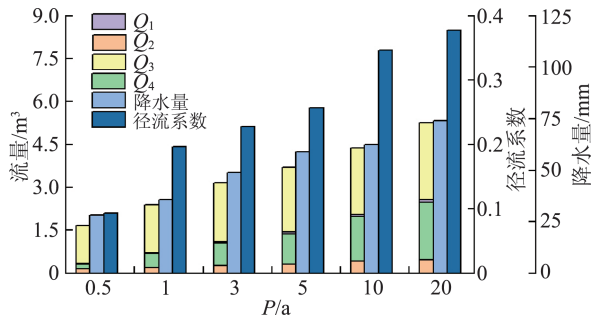


图3 芝加哥雨型不同重现期下径流系数变化
Fig.3 Runoff coefficient under different return periods of Chicago rainfall pattern

2.2 降雨历时对径流系数的影响

芝加哥雨型条件下, 重现期为 3 a、雨峰系数为 0.4 时, 不同降雨历时径流系数变化特征如图 4 所示。由图 4 可知, 随着降雨历时的增加, 径流系数逐渐减小, 但雨水口入流量、横向渗流量、路面径流量和纵向渗流量均逐渐增加, 其中, 横向渗流量和道路雨水口入流量增幅较大, 当降雨历时由 30 min 增加到 120 min 时, 增幅分别为 55.8% 和 59.1%。当降雨历时为 30 min、60 min 和 120 min 时, 径流系数依次为 0.234、0.227 和 0.198; 对应于降雨历时增幅区间 30 ~ 60 min 和 60 ~ 120 min, 径流系数分别减少了 0.007 和 0.029, 即重现期一定时, 短历时降雨的径流系数大于长历时降雨的径流系数, 主要是由于随着降雨历时增加, 降雨强度增长速率减小, 渗流量随之增加, 但随着降雨历时增加, 总降水量也增加, 因此, 降雨历时对半透水道路径流系数总体影响较小。上述研究结果可为实际工程中径流系数取值提供参考。

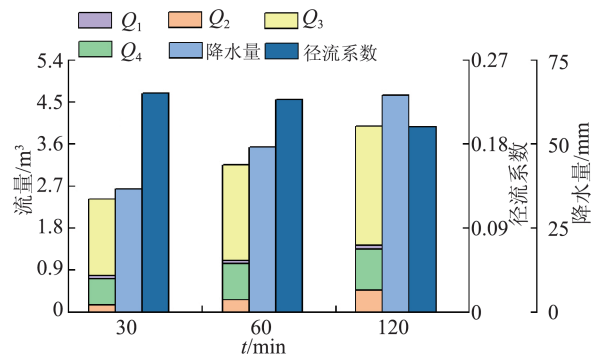


图4 芝加哥雨型不同降雨历时下径流系数变化
Fig.4 Runoff coefficient under different rainfall durations of Chicago rainfall pattern

2.3 雨峰系数对径流系数的影响

芝加哥雨型条件下, 降雨历时为 60 min、重现期为 3 a 时, 不同雨峰系数条件下径流系数变化特征如图 5 所示。由图 5 可知, 随着雨峰系数的增大(降雨峰值的延后), 径流系数逐渐增大, 雨水口入流量、横向渗流量、路面径流量和纵向渗流量变化不明显, 当雨峰系数从 0.4(前峰)增加到 0.8(后峰)时, 径流系数由 0.227 增加到 0.253。降雨初期, 半透水道路的含水率较低, 单位时间内下渗量较大, 降雨峰值越早出现, 越有利于雨水下渗。如果降雨峰值出现较迟, 此时半透水道路的含水率较高, 下渗速率降低, 单位时间内下渗量减少, 径流系数增加。结果表明, 雨峰系数对径流系数具有一定的影响, 雨峰系数越大, 径流系数越大。因此, 在实际工程设计时, 径流系数的取值应根据雨峰系数的大小, 取径流系数参考值上限或下限。

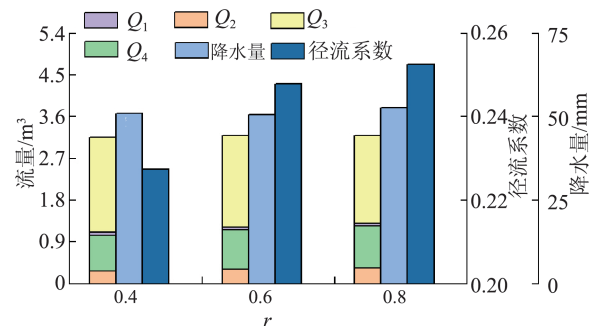


图5 芝加哥雨型不同雨峰系数下径流系数变化
Fig.5 Runoff coefficient under different rainfall peak coefficients of Chicago rainfall pattern

2.4 雨型对径流系数的影响

降雨历时为 60 min 时, 均匀雨型不同重现期条件下径流系数变化特征如图 6 所示。与图 3 相比, 芝加哥雨型和均匀雨型相同重现期条件下的半透水道路雨水口入流量、横向渗流量、路面径流量和纵向渗流量变化相近, 说明雨型对入渗量、径流量的影响较小。当重现期分别为 0.5 a、1 a、3 a 和 10 a 时, 芝加哥雨型条件下的径流系数分别为 0.093、0.197、

0.227和0.347,均匀雨型条件下的径流系数分别为0.103、0.215、0.237和0.360,可见两种雨型的径流系数均随重现期的增加而增加,且均匀雨型的径流系数略大于芝加哥雨型的径流系数。胡振龙^[15]对均匀雨型条件下透水铺装的径流系数进行了研究,结果表明,当坡度为5%、降雨强度为40.8 mm/h、降雨历时为60 min时,径流系数为0.208,与本文试验得到 P 为1 a时的径流系数0.215的值相近。由此可见,在降雨强度为40 mm/h的均匀雨型下,半透水道路的径流系数约为0.21。由试验结果可知,雨型对径流系数有一定的影响,因此,在实际工程设计和模型参数选取时应考虑雨型不同带来的影响。

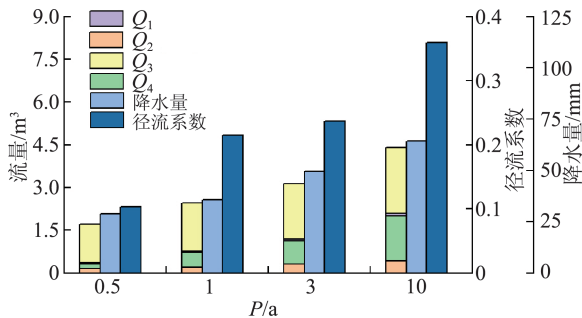


图6 均匀雨型不同重现期下径流系数变化

Fig. 6 Runoff coefficient under different return periods of uniform rainfall pattern

3 结论

a. 半透水道路径流系数随着重现期的增大而增大,当重现期为0.5~20 a、降雨历时为60 min、雨峰系数为0.4时,径流系数为0.093~0.377,因此,径流系数取值时,应充分考虑重现期的影响和不同透水铺装结构特点。

b. 半透水道路径流系数随着降雨历时的增大而减小,当重现期为3 a、雨峰系数为0.4、降雨历时为30~120 min时,径流系数为0.234~0.198;径流系数随着雨峰系数的增大而增大。

c. 为提高实际工程设计计算和模型模拟精度,径流系数的取值应结合当地的实际情况,考虑雨峰系数和雨型的影响。当雨峰系数较小或在均匀雨型条件下,径流系数应取参考值变化范围的下限,当雨峰系数较大或在芝加哥雨型条件下,径流系数应取参考值变化范围的上限。

参考文献:

[1] 严熙世,刘遂庆. 给水排水管网系统[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007:227-237
 [2] 夏军,石卫,王强,等. 海绵城市建设中若干水文学问题的研讨[J]. 水资源保护,2017,33(1):1-8. (XIA Jun, SHI Wei, WANG Qiang, et al. Discussion of several hydrological

issues regarding sponge city construction [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1):1-8. (in Chinese))

[3] 王俊岭,宋健,魏胜,等. 透水混凝土路面对径流量削减试验[J]. 环境工程,2016,34(3):22-26. (WANG Junling, SONG Jian, WEI Sheng, et al. Experimental study on the runoff reduction by the pervious concrete pavement[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(3):22-26. (in Chinese))
 [4] 邹磊,夏军,张印,等. 海河流域降水时空演变特征及其驱动力分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(1):53-60. (ZOU Lei, XIA Jun, ZHANG Yin, et al. Spatial-temporal change characteristics and driving forces of precipitation in the Haihe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1):53-60. (in Chinese))
 [5] WANG Y, YOU W, FAN J, et al. Effects of subsequent rainfall events with different intensities on runoff and erosion in a coarse soil [J]. Catena, 2018, 170:100-107.
 [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] 李森. 不同降雨强度下海绵城市道路径流规律研究[D]. 青岛:山东科技大学,2019.
 [8] 张敬玉,王建龙,涂楠楠,等. 坡度对低影响开发道路水文参数的影响[J]. 环境工程, 2019, 37(12):98-103. (ZHANG Jingyu, WANG Jianlong, TU Nannan, et al. Influence of slope on hydrological of low impact development roads [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(12):98-103. (in Chinese))
 [9] DUNKERLEY D. An approach to analysing plot scale infiltration and runoff responses to rainfall of fluctuating intensity [J]. Hydrological Processes, 2017, 31(1):191-206.
 [10] PHILIP J R. The theory of infiltration; 5. the influence of the initial moisture content [J]. Soil Science, 1957, 84(4):329-340.
 [11] BODMAN G B, COLMAN E A. Moisture and energy conditions during downward entry of water into soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1944, 8:116-122.
 [12] 孔花. 山地城市绿地和水泥道路径流系数的研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
 [13] 冯玉启,王文海,李俊奇,等. 透水道路径流系数试验研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(5):27-35. (FENG Yuqi, WANG Wenhai, LI Junqi, et al. Experimental research of the runoff coefficient about permeable road [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(5):27-35. (in Chinese))
 [14] 许翼,徐向舟,于通顺,等. 强降雨条件下城市回填土草坪径流系数的影响因子分析[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6):82-87. (XU Yi, XU Xiangzhou, YU Tongshun, et al.

- Factor analysis of runoff coefficient subjected to heavy rainfall on urban lawns with backfill soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(6): 82-87. (in Chinese))
- [15] 胡振龙. 山地城市典型下垫面径流系数研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [16] 刘俊, 尹洋洋, 沙晓军, 等. 下垫面要素变化对径流影响的多元统计分析[J]. *水资源保护*, 2016, 32(2): 41-44. (LIU Jun, YIN Yangyang, SHA Xiaojun, et al. Multivariate statistical analysis of influence of underlying surface change on runoff [J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32(2): 41-44. (in Chinese))
- [17] 王坤. 浙青路面和水泥混凝土路面在不同降雨情景下动态径流系数试验研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2017.
- [18] 张爱江. 北京城镇透水性步道结构型式与相关性能研究[D]. 北京: 北京市市政工程研究院, 2007.
- [19] DRAKE J, BRADFORD A, VAN SETERS T. Hydrology performance of three partial-infiltration permeable pavements in a cold climate over low permeability soil [J]. *American Society of Civil Engineers*, 2014, 19(9): 04014016.
- [20] 武晨. 西安市降雨特性分析和城市下垫面产汇流特性试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2004.
- (收稿日期: 2021-07-22 编辑: 施业)

(上接第 42 页)

- [23] 宋策, 周孝德, 辛向文. 龙羊峡水库水温结构演变及其对下游河道水温影响 [J]. *水科学进展*, 2011, 22(3): 421-428. (SONG Ce, ZHOU Xiaode, XIN Xiangwen. Water temperature dynamics of Longyangxia Reservoir and its influence on downstream water temperature [J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(3): 421-428. (in Chinese))
- [24] HE T, DENG Y, TUO Y, et al. Impact of the dam construction on the downstream thermal conditions of the Yangtze River [J]. *International Journal of Environmental Research & Public Health*, 2020, 17(8): 2973.
- [25] 刘流, 刘德富, 肖尚斌, 等. 水温分层对三峡水库香溪水库湾春季水华的影响 [J]. *环境科学*, 2012, 33(9): 3046-3050. (LIU Liu, LIU Defu, XIAO Shangbin, et al. Effects of thermal stratification on spring blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2012, 33(9): 3046-3050. (in Chinese))
- [26] 刘德富, 杨正健, 纪道斌, 等. 三峡水库支流水华机理及其调控技术研究进展 [J]. *水利学报*, 2016, 47(3): 443-454. (LIU Defu, YANG Zhengjian, JI Daobin, et al. A review on the mechanism and its controlling methods of the algal blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(3): 443-454. (in Chinese))
- [27] 黄亚男, 纪道斌, 沈君坤, 等. 汛期香溪水库湾倒灌异重流变化及其成因分析 [J]. *水力发电学报*, 2018, 37(5): 80-92. (HUANG Yanan, JI Daobin, SHEN Junkun, et al. Variations of stratified density currents in Xiangxi Bay in flood season and cause analysis [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 37(5): 80-92. (in Chinese))
- [28] MA J, LIU D, WELLS S A, et al. Modeling density currents in a typical tributary of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Ecological Modelling*, 2015, 296: 113-125.
- [29] LONG L, JI D, YANG Z, et al. Density-driven water circulation in a typical tributary of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *River Research and Applications*, 2019, 35(7).
- [30] 彭期冬, 廖文根, 李翀, 等. 三峡工程蓄水以来对长江中游四大家鱼自然繁殖影响研究 [J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2012, 44(增刊 2): 228-232. (PENG Qidong, LIAO Wengen, LI Chong, et al. Impacts of four major Chinese carps' natural reproduction in the middle reaches of Changjiang River by Three Gorges Project since the impoundment [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2012, 44(Sup2): 228-232. (in Chinese))
- [31] HUANG Zhenli, WANG Luhai. Yangtze dams increasingly threaten the survival of the Chinese sturgeon [J]. *Current Biology: CB*, 2018, 28(22): 3640.
- [32] 焦文婧. 三峡工程对长江中华鲟种群动态的影响分析 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- [33] 吴金明, 王成友, 张书环, 等. 从连续到偶发: 中华鲟在葛洲坝下发生小规模自然繁殖 [J]. *中国水产科学*, 2017, 24(3): 425-431. (WU Jinmin, WANG Chengyou, ZHANG Shuhuan, et al. From continuous to occasional: small-scale natural reproduction of Chinese sturgeon occurred in the Gezhouba spawning ground [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(3): 425-431. (in Chinese))
- [34] 王煜, 李金峰, 翟振男. 优化中华鲟产卵场水动力环境的梯级水库联合调度研究 [J]. *水利水电科技进展*, 2020, 40(1): 56-63. (WANG Yu, LI Jinfeng, ZHAI Zhenan. Research on joint operation of cascade reservoirs to optimize hydrodynamic environment for Chinese sturgeon spawning ground [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2020, 40(1): 56-63. (in Chinese))
- (收稿日期: 2021-08-20 编辑: 俞云利)