

降雨强度对透水沥青混凝土净污能力影响研究

吴建兵¹, 陈子恺²

(1.无锡市市政建设咨询监理有限公司,江苏 无锡 214000; 2.扬州大学建筑科学与工程学院,江苏 扬州 225127)

摘要:为定量评估降雨强度对透水沥青混合料净化路面径流能力的影响,基于搭建的足尺道路路面平台设计了5种降雨强度下单、双层透水沥青混凝土的人工降雨模拟试验,测定了流经透水沥青混合料前后模拟径流雨水的代表性污染物浓度。结果表明:透水沥青混凝土能有效净化径流污染,且双层透水沥青混凝土的污染净化能力显著优于单层透水沥青混凝土,对悬浮物(SS)、总磷化合物(TP)、重金属锌(Zn)、重金属铅(Pb)、总氮化合物(TN)、化学需氧量(COD)的去除率分别达到80.25%、74.13%、70.30%、65.14%、63.75%、61.38%;随着降雨强度的增大,透水沥青混凝土对径流污染物的净化能力逐渐减弱,通过分析层数、降雨强度对透水沥青混凝土污染物净化率的影响,提出了层系数 α 和雨强折减系数 β ,可以通过人工降雨模拟试验结果推算一定降雨强度下实际透水沥青混凝土路面的污染物净化能力,为透水沥青混凝土路面的量化环境评价提供依据。

关键词:透水沥青混凝土;降雨强度;路面层数;足尺道路路面平台;人工降雨模拟试验

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2023)07-0214-06

0 引言

路面径流是造成沿线水系水质污染的重要原因之一,具有污染物组成多样、时空变异性大及治理困难等特点。1987年,Stotz等最早对路面径流污染物进行分类^[1],Deletic等人证明其主要包含悬浮物(suspended solids, SS)、化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)、总氮化合物(TN)、总磷化合物(TP)、氨氮类($\text{NH}_3\text{-N}$)、重金属铅(Pb)、锌(Zn)等^[2-3],是典型的非点状污染源^[4]。透水沥青混凝土作为路面径流原位处治的常用材料,在保证排水、抗滑、降噪等功能的同时,对路面径流污染治理起到关键作用,有助于实现我国海绵城市建设中“渗、滞、蓄、净、用、排”^[5-7]的理想功能。

章泽宇等人的研究表明,透水沥青混凝土能对裹附着不同污染物的悬浮物胶体进行截留和物理吸附,对于COD、TN、TP和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果较好^[8]。岳桢铨等研究了降雨强度对初期冲刷系数的影响^[9],安亚强等分析了降雨径流时间对污染物浓度的影响^[10]。但是在透水路面的实际使用过程中,多孔沥青混凝土对污染物的去除效果并非随组合方式、降雨参数简单叠加^[11-12],同时还会伴有孔隙堵塞的情况,这导致对透水沥青混凝土净化效果的评判存在较大

困难。目前国内外针对透水路面的净化研究集中在净化材料方面和路面层厚度方面^[13-14],或结合污染模型进行分析^[15],缺少在实测条件下对于降雨参数以及路面层组合方式的研究。

因此,现设计了足尺道路路面平台,还原室外真实污染及冲刷条件,弥补自然降雨带来的环境因素的多变以及对变量控制能力的不足。通过控制变量进行人工模拟降雨试验以测试污染物去除率,探究透水沥青混凝土对污染物的净化能力的影响因素。在此基础上考虑层系数、雨强折减系数的影响,研究出适用于各种降雨强度下的透水沥青混凝土污染净化能力的换算方法。

1 材料与试验方法

1.1 透水沥青混凝土

1.1.1 沥青

由于透水沥青混凝土的空隙率较大,为了保证其稳定性,配合比设计中需要加入具备高粘附性,良好裹附性的改性沥青。试验选用的TOUGHASPHALT高黏度改性沥青,产自上海城建日沥特种沥青有限公司,基本技术指标如表1所列,均符合相关规定。

1.1.2 集料和填料

选用的粗、细集料均为硬质高抗磨耗的镇江产茅迪玄武岩,矿粉为镇江高资生产的石灰岩磨细粉,筛分及性能检测结果如表2、表3所列,各项技术指标均满足规范^[16-17]要求。

收稿日期:2022-09-02

作者简介:吴建兵(1974—),男,硕士,高级工程师,从事市政建设咨询监理工作。

表 1 TOUGHASPHALT 高粘度改性沥青基本技术指标一览表

技术指标	检测值	规范要求	测试方法
针入度,不小于 /0.1 mm	51	40	T 0604-2011
软化点,不小于 /℃	92.3	90	T 0606-2011
60℃动力黏度,不小于 /(Pa·s)	50 287	20 000	T 0620-2000
溶解度 /%	99.6	99	T 0607-2011
25℃弹性恢复,不小于 /%	98.1	95	T 0662-2000
TFOT 质量损失,不大于 /%	-0.164	± 0.6	T 0609-2011
残留物 针入度比,不小于 /%	83	65	T 0604-2011

表 2 集料密度试验结果一览表

集料类型	表观相对密度	毛体积相对密度
玄武岩集料		
1#	2.953	2.908
2#	2.962	2.902
3#	2.902	/
4#	2.704	/

表 3 矿料筛分结果一览表

筛孔集料	通过方孔筛的百分率 /%									
	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
1#	100.0	84.8	14.7	1.4	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
2#	100.0	100.0	98.9	14.6	2.5	2.0	1.9	1.9	1.9	1.8
3#	100.0	100.0	100.0	95.4	9.4	5.5	4.2	3.4	3.1	2.7
4#	100.0	100.0	100.0	99.5	83.9	58.3	33.2	13.1	7.8	4.2
矿粉	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100	92.20

根据规范要求,对该级配下的沥青混凝土进行路用性能试验,结果如表 5 所列。由表 5 可知该连通空隙率下的透水沥青混凝土能达到路用性能的规范指标^[19]。因此,所制备的透水沥青混凝土车辙板空隙率为 18.97%,用来铺筑足尺寸测试系统的路面部分。

表 5 PAC-13 透水沥青混凝土路用性能测试结果一览表

试件编号	马歇尔稳定度 /kN	流值 /mm	飞散损失 /%	动稳定度 / (次·mm ⁻¹)	冻融劈裂强度比 /%
PAC13	5.63	4.02	11.6	4 572	87.4
技术要求	≥5	2~4	<15	≥3 500	≥85

1.2 污染物配置

为了达到控制污染物总量的目的,所配置的径流水样为恒定浓度的化学试剂溶液,同时由于污染物浓度对路面的容纳能力有直接影响,故根据已有文献[20-21],按表 6 所列的化学试剂及掺量调配径流水样。

1.3 人工降雨模拟试验

室外人工降雨模拟系统由给水设备、压力装置、控制终端和喷淋装置四个部分协调运行,预置了小、

1.1.3 级配设计

根据空隙率要求^[18],PAC-13 沥青混凝土的级配曲线如图 1 所示,体积参数见表 4 所列。

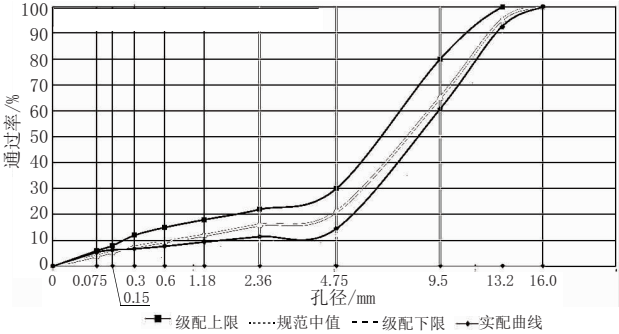


图 1 PAC13 目标配合比设计级配图

表 4 PAC13 体积参数测试结果一览表

试件名称	理论最大相对密度	毛体积密度 / (g·cm ⁻³)	空隙率 /%	连通空隙率 /%
PAC13	2.64	2.17	18.97	14.72

表 6 各化学试剂所需替代的目标浓度及掺量一览表

指标	SS	COD	TN	TP	Zn	Pb
目标浓度 / (mg·L ⁻¹)	400	650	6	1.5	3	0.7
试剂	沉积土	C ₆ H ₁₂ O ₆	NH ₄ Cl	KH ₂ PO ₄	Zn (NO ₃) ₂	Pb (NO ₃) ₂
配制 100L 的剂量 /g	308.256	69.798	1.656	3.621	8.624	0.67

中、大三种降雨模式,具体降雨强度可在控制终端通过开度和雨强进行调节。人工降雨模拟的详细组成如图 2 所示。

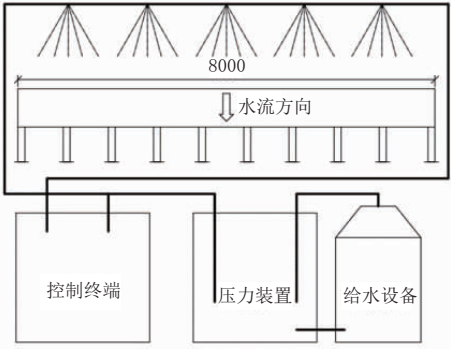


图 2 人工降雨模拟系统组成示意图

控制终端包括总控箱、数据收集器以及雨量计,能够及时监控水压、开度、雨强等数据,自动绘制人工降雨的实时响应曲线,进而根据逼近式反馈调控,改变流量和水压,直至达到模拟降雨需求值。该系统便于就地评价降雨效果。人工雨水在总控箱的控制下,经水泵加压抽取,通过稳压装置稳定水压,流动到顶部管道后由喷头释放。雨滴的大小由通径为 2.45 mm、2.05 mm、1.20 mm 的喷头决定。人工模拟降雨区域的湿润面积是 5 m×8 m。三种喷头不仅能单独工作,喷出小强度降雨,还可以相互叠加,从而模拟较大强度的降雨。喷头组采用同等间隔布置,间距以降雨均匀度最大为布置原则。降雨强度的大小由流量阀与压力调节仪器的参数共同设定,并由雨量计捕捉降雨强度的实际信号,雨滴则由喷头的组合决定。表 7 为详细的降雨参数表。

表 7 人工模拟降雨参数表

降雨面积 / m ²	降雨高度 / m	强度范围 / (mm·h ⁻¹)	下滴速度 / (m·s ⁻¹)	调节精度 / (mm·h ⁻¹)	均匀度 / %
40	5	1 ~ 280	0.1 ~ 6.0	0.01	82

1.4 路面集成平台

铺设透水沥青混凝土的路面集成平台均为不锈钢槽焊接,设有宽度为 3.75 m,深度为 0.2 m 的行车道,为了模拟真实路面径流条件,行车道设有 2% 的横坡。行车道末端设有排水口,人工模拟的降水经路面渗漏汇集到排水口,流入下方水槽中以供检测。具体尺寸如图 3 所示。

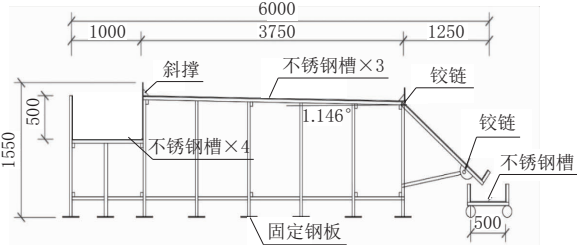


图 3 路面集成平台示意图(单位:mm)

1.5 降雨均匀与重现性

对设定的 20 ~150 mm/h,以 30 mm/h 的强度递增的五场不同强度的降雨分别进行分布均匀性和重现性判定。五场降雨各持续 10 min、8 min、5 min、3 min、1 min,然后由湿润范围内均匀摆放的 15 个量筒阵列测量每个测点的水量,并根据公式(1)计算降雨的均匀性 $U(\%)$ 。

$$U=1-\frac{\sum |H_i-\bar{H}|}{n\bar{H}} \tag{1}$$

式中: H_i 为测点 i 的降雨量,mm; $\bar{H}$ 为湿润区域的平

均降雨量,mm; n 为测点数量。五种降雨强度下的降雨均匀性计算结果如图 4 所示。

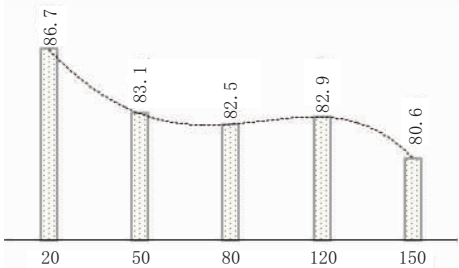


图 4 不同强度人工模拟降雨的均匀性计算结果曲线图(单位:%)

在模拟范围内,随着降雨强度的增大,降雨均匀性降低,但依旧符合天然降雨的规律(天然降雨的均匀性^[22]一般大于 80%),能够满足试验要求。

1.6 污染物含量测试方法

路面径流污染物分为悬浮物和溶解物,本文依据文献^[23-25],按表 8 分别对透水沥青混凝土净化后的各种污染物浓度进行检测。

表 8 路面径流水样测试方法一览表

测试项目	测试方法	参考标准
SS	《重量法》	GB/T11901-89
COD	《重铬酸盐法》	GB/T11914-89
TN	《过硫酸钾氧化紫外分光光度法》	HJ 636-2012
TP	《钼酸铵分光光度法》	GB 11893-89
Pb	《原子吸收分光光度法》	GB 7475-87
Zn	《原子吸收分光光度法》	GB 7475-87

2 试验结果与分析

2.1 降雨强度与路面层数对净化效果的影响

图 5 为根据污染物浓度绘制的去除率随雨强变化曲线图。分析图 5 中数据可知,单层透水沥青混凝土对污染物的去除率在 29.30%~71.80%之间,双层的去除率在 41.23%~80.25%之间,受污染物种类影响较大。在任意降雨强度下双层透水沥青混凝土对所有污染物的净化效果都比单层好。随着降雨强度的增大,多数污染物的去除率大致呈下降趋势,悬浮物(SS)浓度的下降速度最快,说明其去除率受降雨强度的影响最大;而 TP 和 Zn 的下降速度趋于平缓,代表降雨参数的改变对透水沥青混凝土吸附该类污染物的能力影响较小。TN 反而有上升趋势,这表明增加的雨水有助于其溶解。对于污染物去除率曲线出现的拐点而言,代表雨水的冲刷能力提高,缩短了污染物在路面层的接触时间,从而降低了透水沥青混凝土的容纳能力,进而降低污染净化能力。分析单层透水沥青混凝土的污染物下降曲线可发现,SS 和

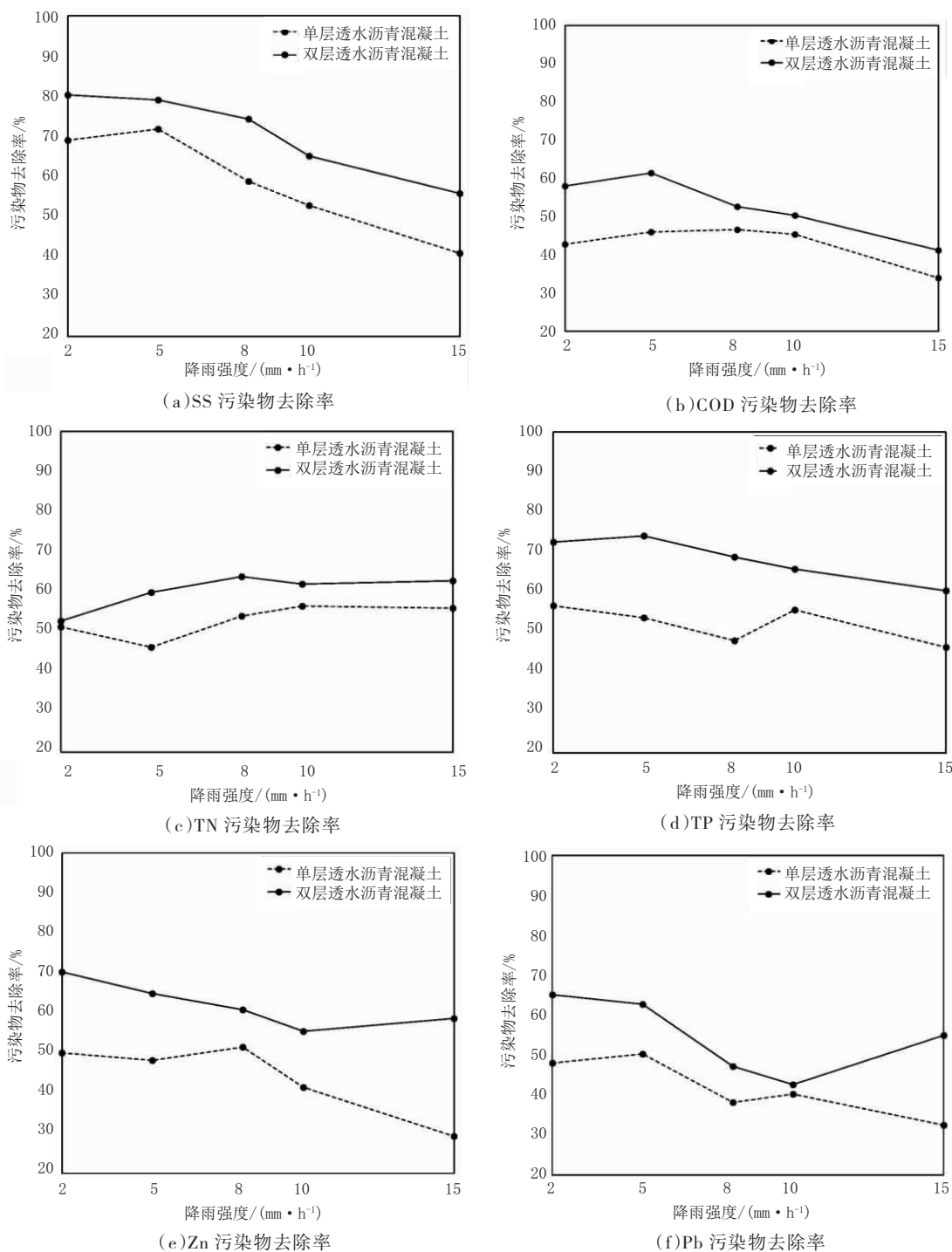


图 5 污染物去除率随降雨强度变化曲线图

COD 的去除率随雨强的变化是同步的,这意味着 COD 裹附于 SS 中,随 SS 一同被净化。

在路面层数上,双层透水沥青混凝土对污染物的净化效果更加显著。但是单层和双层透水沥青混凝土的净化效果并非简单的线性关系,且与降雨强度以及污染物种类均有联系。在较低的降雨强度下(2 mm/h、5 mm/h),净化效果的影响区分较小,较大的变化发生在 8 mm/h、10 mm/h 和 15 mm/h 高强度降雨模式下。重金属锌受透水沥青混凝土层数的变

化影响较大。为了定量评估降雨强度和路面层数对透水沥青混凝土净化效能的影响,分别引入层系数 α 和雨强折减系数 β 的概念。

2.2 层系数 α

按最大降雨强度对空隙率为 18.97% 的双层透水沥青混凝土车辙板进行室外模拟降雨试验。取样的数据表明,各种污染物的去除率均大于单层透水沥青混凝土,但未表现出随降雨强度同步变化。按表 9 计算层系数 α ,可知受透水沥青混凝土层数影响较大

的是重金属污染物(Pb,Zn),而化学需氧量和总氮污染物受层数变化的影响较小。

表9 足尺道路路面平台污染物浓度调整层系数表
(降雨强度15 mm/h)

	SS	COD	TN	TP	Pb	Zn	层系数
单层透水 沥青混凝土	237	429	2.649	0.805	0.473	2.121	-
双层透水 沥青混凝土	177	382	2.237	0.594	0.315	1.239	-
层系数 α	0.75	0.89	0.84	0.74	0.67	0.58	0.75

2.3 雨强折减系数 β

按最大降雨强度15 mm/h的净化效果进行归一化处理,计算降雨强度改变的条件下,单层透水沥青混凝土对不同污染物的净化水平的折减,结果如表10所列。可知悬浮物(SS)的折减系数变化最有规律;化学需氧量(COD)几乎不变;雨强增大反而有助于总氮化合物(TN)的净化;而重金属Pb、Zn折减系数只有在中等雨强下才有变化。

表10 单层透水沥青混凝土降雨强度折减系数表

符号	降雨强度折减系数					
	SS	COD	TN	TP	Pb	Zn
β_2	0.5	0.9	1.1	0.8	0.8	0.7
β_5	0.5	0.8	1.2	0.9	0.7	0.7
β_8	0.7	0.8	1	1	0.9	0.7
β_{10}	0.8	0.8	1	0.8	0.9	0.8
β_{15}	1	1	1	1	1	1

通过此表,可以由线性内插法获得任意降雨强度的折减系数,计算过程如公式(2)~(4)所示:

$$C_{15}^1 = C = \frac{1}{k} (C_m^1 + C_n^1) \quad (2)$$

$$C_{15}^2 = \alpha \times C_{15}^1 \quad (3)$$

$$C_i^2 = \frac{\beta_m + \beta_n}{2} \times C_{15}^2 \quad (4)$$

式中: C_i 为室外模拟降雨量为1 mm/h时*i*层透水沥青混凝土净化后的径流污染浓度矩阵; k 为线性内插系数; m 和 n 分别表示接近1的真实降雨量; α 为层系数; β 为雨强折减系数。

以9 mm/h下降雨强度为例,相近条件下污染物冲淋结果向量 C :

$$C = \frac{1}{2} (C_8^1 + C_{10}^1) = [177, 351, 2.693, 0.426, 1.606]$$

按公式(3)、(4)计算得到室外15 mm/h模拟降雨下单/双层透水沥青混凝土污染物浓度 C_{15}^1/C_{15}^2 :

$$C_{15}^2 = \alpha \times C_{15}^1 = [133, 263, 2.020, 0.542, 0.319, 1.205]$$

按公式5计算得到双层透水沥青混凝土在9 mm/h时的真实残留浓度 C_9^2 :

$$C_9^2 = \frac{\beta_8 + \beta_{10}}{2} \times C_{15}^2 = [100, 210, 2.020, 0.488, 0.287, 0.904]$$

该计算简便易行,可得到实际降雨状态下双层透水沥青混凝土的污染净化效能。

3 结 语

针对透水沥青混凝土对道路径流污染物的净化能力,设计了足尺道路路面平台和人工降雨模拟试验,控制污染物浓度恒定,分析了降雨强度和透水沥青混凝土层数对净化效果的影响,得出以下结论:

(1)相同条件下透水沥青混凝土对不同污染物的净化效果存在差异性,随着降雨强度的增大,雨水的冲刷能力提高,透水沥青混凝土的径流净化能力降低,除总氮污染物(TN)外的其余各种污染物的浓度大致呈现上升趋势,且在高强度下变化更明显。

(2)双层透水沥青混凝土有更明显的径流污染净化效果,但与单层透水沥青混凝土的区分并非简单的线性关系,且与降雨强度以及污染物种类均有联系,重金属锌(Zn)受透水沥青混凝土层数的变化影响较大。

(3)结合相同降雨强度下单/双层透水沥青混凝土的层系数 α 以及雨强折减系数 β ,可以换算出任意降雨强度下的双层透水沥青混凝土净化效果。

(4)透水沥青路面在经历径流污染净化后,污染物最终仍留存在透水沥青路面的空隙中,仍无法彻底去除污染物,如何保持净化效果值得工程与研究人员在后续研究中深入思考。我们正在积极思考解决这一问题,这也是我们后续研究的一个方向。

参考文献:

- [1] Stotz G. Investigations of the properties of the surface water runoff from federal highways in the FRG[J]. Science of the Total Environment, 1987, 59: 329-337.
- [2] 吴正光,王修焱,卢佩霞,等.硅藻土透水混凝土水质净化效果研究[J].硅酸盐通报,2015,34(12):3586-3591.
- [3] Deletic A, Orr D W. Pollution buildup on road surfaces [J]. Journal of Environmental Engineering, 2005, 131(1): 49-59.
- [4] 郭文景,张志勇,闻学政,等.长江下游居民区降水地表径流的污染特征[J].环境科学,2021,42(7): 3304-3315.
- [5] 刘雪敏.透水混凝土技术在城市道路中的应用—评《海绵城市透水混凝土应用技术》[J].混凝土与水泥制品,2020(5): 104-105.
- [6] 莫琳,俞孔坚.构建城市绿色海绵—生态雨洪调蓄系统规划研究[J].城市发展研究,2012,19(5): 130-134.

- [7] Igor C M V, Enedir G, Liseane P T. Life cycle energy assessment and economic feasibility of stormwater harvested from pervious pavements [J]. Water Research, 2020, 170.
- [8] 章泽宇, 骆辉, 荆肇乾. 透水沥青路面净化雨水径流的研究进展[J]. 应用化工, 2019, 48(7): 1710-1714, 1719.
- [9] 岳楨铎, 李一平, 周玉璇, 等. 南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析[J]. 环境科学, 2022(1): 1-14.
- [10] 安亚强, 孙三祥, 王国锋. 弱透水性下垫面降雨径流污染物输移特性[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1): 133-139.
- [11] Yang Q X et al. The influence of rainfall intensity and duration on sediment pathways and subsequent clogging in permeable pavements[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 246: 730-736.
- [12] 蒋玮, 袁东东, 肖晶晶, 等. 多孔路面材料与厚度对地表径流的净化效能[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2017, 38(2): 230-235.
- [13] Martins V C, Ghisi E, Thives L P. Life cycle energy assessment and economic feasibility of stormwater harvested from pervious pavements[J]. Water Research, 2020, 170: 115322.
- [14] 曾哲, 刘星, 罗蓉, 等. 空隙率对透水沥青混合料路用性能的影响[J]. 中外公路, 2019, 39(6): 220-224.
- [15] 李思思, 张亮, 刘宏斌, 等. 基于径流路径的分布式面源污染模型(STEM-NPS)研发与应用进展[J]. 生态学报, 2022(6): 1-12.
- [16] 透水沥青路面技术规程: CJJ/T 190-2012[S]. Technical specifications for permeable asphalt pavement: CJJ/T 190-2012. [S]. (in Chinese).
- [17] 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40-2004. [S]. Technical specifications for construction of highway asphalt pavements: JTG F40-2004[S]. (in Chinese).
- [18] 王子枫, 董元帅, 侯芸. 玄武岩纤维透水沥青混凝土力学性能试验研究[J]. 公路, 2020, 65(8): 323-327.
- [19] 肖鑫, 张肖宁. 排水沥青路面排水能力分析 & 目标空隙率确定[J]. 中外公路, 2016, 36(1): 49-53.
- [20] LUCKE T, NICHOLS P W B. The pollution removal and stormwater reduction performance of street-side bio-retention basins after ten years in operation[J]. Science of the Total Environment, 2015, 536: 784-792.
- [21] 姜鉴恒. 透水沥青路面在北京地区径流削减与水质净化效果研究[D]. 北京交通大学, 2020.
- [22] 倪际梁, 何进, 李洪文, 等. 便携式人工模拟降雨装置的设计与率定[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 78-84.
- [23] 侯培强, 任玉芬, 王效科, 等. 北京市城市降雨径流水质评价研究[J]. 环境科学, 2012, 1(33): 71-75.
- [24] Shelley P E, Gaboury D R. Estimation of Pollution from Highway Runoff—Initial Results[J]. Urban Runoff Quality, 2015: 459-473.
- [25] 徐行军, 秦红星, 卓维松. 透水混凝土路面雨水径流的影响研究[J]. 公路工程, 2019, 44(6): 135-139.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴, 为您提供平台, 携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com