

# 透水沥青路面对洁净水体和地表径流水质的影响

蒋 玮<sup>1</sup>, 沙爱民<sup>1</sup>, 肖晶晶<sup>2</sup>, 王振军<sup>3</sup>, 牛纪强<sup>3</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 3. 长安大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710061)

**摘 要:**透水沥青路面(permeable asphalt parement, PAP)具有减少地表径流,改善雨天行车安全等诸多优点,得到越来越多研究人员的关注。地表径流含有大量污染物,这些污染水体流经透水沥青路面后渗入土基,最终进入地下水中,因此渗入土基的水体质量需要检测。选取 16 项水质评价指标,利用透水沥青路面渗透装置进行试验,得了由 6.3 cm 多孔沥青混合料、30 cm 级配碎石、15 cm 砂垫层组成的透水沥青路面对洁净水体和地表径流污染水水质的影响,并相应地提出了路侧排水设施的设计思路。研究结果表明:自来水经透水沥青路面渗流后,初期渗流水样的各项污染指标均增大;渗流 60 min 后,除石油类污染物,渗流水样的各项污染物含量均小于入渗水体;地表径流经透水沥青路面渗流后,其中重金属的去除效果最好,石油类、动植物油类、BOD(生物需氧量)、COD(化学需氧量)、氨氮、总磷等营养盐的去除效果次之,而氯化物、总氮等无机阴离子和营养盐的去除效果不佳;随着水样采集时间的延长,水体中污染物含量都有不同程度的降低。

**关键词:**道路工程;透水沥青路面;地表径流;过滤;渗流试验

**中图分类号:**U414.1 **文献标志码:**A

## Effect of permeable asphalt pavement on quality of clean water and surface runoff

JIANG Wei<sup>1</sup>, SHA Ai-min<sup>1</sup>, XIAO Jing-jing<sup>2</sup>, WANG Zhen-jun<sup>3</sup>, NIU Ji-qiang<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

**Abstract:** Researchers are paying more attention to permeable asphalt pavement (PAP) due to its various advantages including of reducing surface runoff, as well as enhancing driving security in rainy days. Surface runoff contains a large number of pollutants. The contaminated water with large volume of pollutants can permeate into the subgrade through permeable asphalt pavement and finally pass into the underground water. Therefore, the quality of water permeating into the subgrade should be seriously detected. Infiltrate testing apparatus of PAP was used in present study to obtain the influence of PAP on clean water and surface run off, which consisted of a 6.3 cm thick PAC layer, a 30 cm-thick open-graded gravel layer and a 15 cm-thick natural sand

layer. Design idea of the roadside drainage facility was put forward for PAP structure. The results show that after the filtration through PAP, the pollutant concentrations of clean water increases at the sampling time of 0 min. The pollutions concentrations, except petroleum pollutants, are less than the initial clean water when the sampling time increases to 60 min. PAP has high removal efficiency on heavy metal pollutions, such as Cu, Zn, Pb and Cd. It can effectively remove petroleum animal & vegetable oil, BOD, COD,  $\text{NH}_4\text{-N}$  and TP as well. However, PAP is incompetent with the removal of  $\text{Cl}^-$  and TN. With the increase of collection time of samples, the contents for all pollutants in water decrease with different degrees. 5 tabs, 4 figs, 19 refs.

**Key words:** road engineering; permeable asphalt pavement; surface runoff; filtration; infiltration test

## 0 引 言

相对于传统的密实路面,透水沥青路面(permeable asphalt pavement, PAP)由于用多孔沥青混合料、级配碎石等大孔隙材料作为路面结构层,允许路表水进入路面内部并渗入路基土体,具有减少地表径流,补充地下水,调节大气湿度,并缓解城市热岛效应,能够降低车辆行驶噪声,增大抗滑性能,以及改善道路行驶安全性等优点<sup>[1]</sup>。因此,基于其显著的生态环保效益,透水沥青路面获得了广泛的关注和应用。

地表径流中含有大量污染物,经透水沥青路面结构后渗入土基,并最终进入地下水中,这些污染物中的重金属和氮、磷等营养盐不易被分解,一旦进入地下水,很容易造成地下水的污染,且难以恢复,严重影响到区域的生活用水和生态环境<sup>[2-3]</sup>。因此,研究人员十分关注渗入土基的水体质量,特别是在有一定交通流量的城市道路中。Dietz 对目前的透水沥青路面研究进行了综述分析,认为透水沥青路面能够过滤地表径流中的污染物,改善道路周边的生态环境<sup>[4]</sup>;Sansalone 等指出,与普通沥青路面相比,透水沥青路面通过雨水入渗、存留、蒸发,能够减少路面的热效应,而且透水沥青路面对入渗水质具有净化效果<sup>[5]</sup>;Collins 等比较了多孔水泥混凝土、透水砖嵌块路面、混凝土网格透水路面和密实沥青路面 4 种路面的氮营养物去除效果,结果表明经透水路面渗流后,地表径流中的氨氮和总氮浓度显著低于密实沥青路面<sup>[6]</sup>;Fassman 等对比了透水砖块路面和密实沥青路面地表径流污染物的浓度,结果表明透水砖块路面地表径流中悬浮物(suspended solids, SS)、Zn、Cu 污染物的浓度显著低于密实沥青路

面<sup>[7]</sup>;解晓光等通过实验室调配水样,研究了不同空隙率的沥青混合料对污染水样中 COD(chemical oxygen demand)和 BOD(biochemical oxygen demand)的去除效率和力学性能,发现污染物去除率随空隙率的减小而增大,推荐适宜的空隙率为 20%左右<sup>[8-10]</sup>;崔珍珍对透水混凝土砖路面的雨水入渗及水质净化性能开展了研究,获取了透水混凝土砖路面对 SS、总磷(total phosphorus, TP)、COD 的去除率<sup>[11]</sup>。

综上,虽然国内外对透水沥青路面地表径流的过滤效果已开展了较多研究,但针对由多孔沥青混合料、级配碎石和砂垫层组成的透水沥青路面结构地表径流的过滤效果研究较少,而且已有研究中侧重分析的污染物类别相对有限,没有全面采集和分析水体中的污染物数据。为此,本文通过研发能够模拟透水沥青路面渗流的装置,收集天然地表径流进行试验,全面分析 16 项代表性污染物指标,系统地研究透水沥青路面对洁净水体的水质影响和对地表径流污染水体的净化效果。本文研究成果对于研究模拟透水沥青路面的地表径流过程,优化透水路面材料与结构设计具有显著意义。

## 1 污染物指标选取

城市路面径流中污染物的主要来源可以分为两部分:一部分是汽车与路面自身产生的污染物;另一部分是道路周边暴露环境表面的污染物,通过降雨冲淋流入地表径流。

汽车与路面产生的污染物主要来源于汽车尾气、轮胎、刹车垫、路表磨耗和机车油剂泄露等<sup>[12]</sup>。其中,镉盐和含锌添加剂存在于汽车轮胎和润滑油中,因此汽车轮胎磨损及润滑油燃烧是地表径流中

Zn 和 Cd 污染的主要来源<sup>[13]</sup>;镀锌汽车板的广泛使用所产生的大量含锌粉尘,是路面 Zn 污染的另一来源;刹车垫的磨损以及金属部位的磨耗是地表径流中 Cu、Pb、Cr 和 Cd 污染的重要来源<sup>[14]</sup>。此外,高温时沥青路面中的沥青渗出、组分的挥发会产生石油类污染物,冬季部分地区用于除冰雪的盐类会产生氯盐<sup>[15]</sup>。

道路周围环境在干燥气候条件下积累的大气沉降污染物在降雨过程中会被冲淋到路面地表径流中。其中建筑物顶面部分的防水材料、金属材料和排水管道会释放出 Cu、Pb、Zn 等重金属离子和石油类污染物;道路周边的落叶、鸟粪、花、花粉和化肥农药施用以及人类活动会产生有机质和氮磷营养物<sup>[16]</sup>。

通常而言,路面径流中污染物的成分和含量同道路所在的位置、气候条件以及道路交通状况都有密切关系。

根据上述地表径流污染物的特征,本文选取 16 项测试指标用于全面评价水体质量:表征理化指标的 pH 值、浊度、SS;表征营养盐和有机污染的 COD、BOD、氨氮(NH<sub>4</sub>-N)、TN、TP、石油类(petroleum pollutants, PP)、动植物油(animal & vegetable oil, AVO)等;表征水体中重金属污染的 Cr<sup>6+</sup>、Cu、Zn、Pb、Cd,以及表征无机阴离子含量的 Cl<sup>-</sup>。

## 2 试验装置、材料与方案

### 2.1 试验装置

试验装置包括上部储水筒和下部填充路面材料的圆柱长管,如图 1 所示。其中,上部储水筒直径为 40 cm,高度为 50 cm,储水量约为 60 L;下部圆柱长管内径为 10 cm,高度为 52.5 cm,内部可填充不同结构层的路面结构材料,圆柱长管底部可以设置隔污透水土工布,圆柱长管顶部可以连接未脱模多孔沥青混合料(PAC)试件。该试验装置是通过各部件组合在一起的,可以多次重复使用。每次试验时,按照材料与结构组合向圆柱长管中填充相应厚度的试验材料。试验完成后,可以将圆柱长管中的材料取出。

上部储水筒通过设有阀门的软管连接到路面材料圆柱长管中,当阀门开启时,储水筒中的水通过软管进入。首先,通过带有试模的多孔沥青混合料,进而渗入圆柱长管中的路面材料;其次,在圆柱长管底部设有阀门,当阀门开启时,圆柱长管中的水可以从中渗流出来;最后,采用玻璃采样瓶收集经过不同

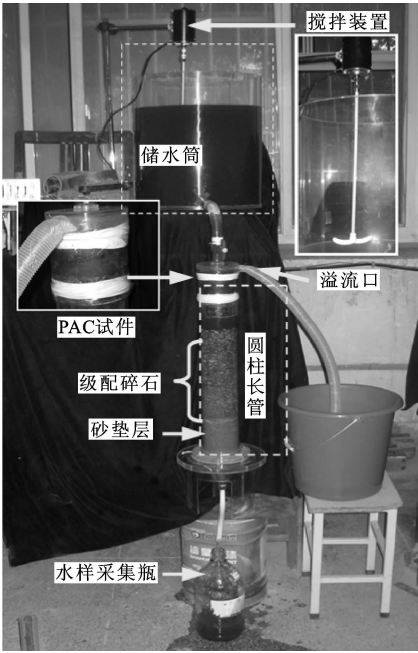


图 1 透水沥青路面渗流试验装置

Fig. 1 Infiltrate testing apparatus of permeable asphalt pavement  
结构层路面材料渗流出的水体,水样采样瓶的容积为 2 500 mL。

为了减少水头差造成的水压力对试验渗透过程的影响,在路面材料圆柱管顶部设有溢流口,能够保证试验过程中的水头保持不变。为了避免试验时水体污染物沉淀,在上部储水筒中配备了搅拌装置。

与马歇尔试模连接的顶部模块和圆柱长管均预留出与试模边缘互补的咬合槽,在组装时通过缠绕生胶带并粘贴胶带确保试模与顶部模块和圆柱长管连接位置密封不渗水。圆柱长管内部可以根据需要填充不同厚度的路面结构层材料。圆柱长管下部连接渗水口,并安装有阀门,试验时在渗水口收集经上部储水筒流经路面结构渗流出来的水体至水样采样瓶。

### 2.2 试验材料

试验采用 PAC-13 多孔沥青混合料,级配组成见下页表 1。采用体积法测得其空隙率为 20.1%。级配碎石采用辉绿岩集料,考虑到测试设备的尺寸,采用的集料最大粒径为 9.5 mm,其级配见下页表 2。级配碎石按照每层厚约 5 cm 分层填充在圆柱长管中,并用人工插捣和击实。圆柱管材料采用的是有机玻璃,受到材料强度的限制,无法按照实际的击实功进行压实,因此级配碎石的压实效果达不到实际的压实度,级配碎石堆积空隙率为 39%。砂为天然河砂,其细度模数为 2.316,含泥量为 0.64%,毛体积密度为 2.598 g/cm<sup>3</sup>,堆积空隙率为 41%。在

表 1 多孔沥青混合料级配(沥青含量 4.6%)

Tab.1 Gradation of porous asphalt mixture (asphalt content is 4.6%)

筛孔尺寸/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率/%	100.0	90.1	61.3	23.4	14.8	12.7	10.8	8.3	7.0	5.0

表 2 级配碎石级配组成

Tab.2 Gradation of open-graded gravel for testing

筛孔尺寸/mm	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率/%	100.0	40.5	27.1	16.9	10.8	4.4	2.2	0.8

砂垫层底部设置 1 层 120 g/m<sup>2</sup> 的土工布,渗透系数为 110×10<sup>3</sup> mm/s。

2.3 试验方案

试验的透水沥青路面结构为 6.3 cm 的多孔沥青混合料,30 cm 的级配碎石,15 cm 的砂垫层,以及在砂垫层底部的土工布。首先采用自来水进行试验,通过对渗入路面前后水体水质的指标测试,分析洁净水体经过透水沥青路面结构渗流后污染物的变化。其中自来水水样记为 W1;经透水沥青路面渗流后,收集最初(0 min)从渗出口流出的水样记为 W2;渗流试验持续 60 min 后,再次从渗流口收集水样记为 W3。

采用收集的地表径流进行试验,比较经透水沥青路面渗流后污染物含量的变化。地表径流采集时间为 2014 年 8 月 6 日,采集位置为西安市南二环、文艺路和育才路 3 处路面。由于本次降雨前近半个月无降雨,且持续高温天气,因此本次降雨收集的地表径流污染物含量相对较高。试验时,收集的地表径流水样记为 R1;经透水沥青路面渗流后,收集最初(0 min)从渗出口流出的水样记为 R2;渗流试验持续 20 min 和 70 min 时收集的渗出水样分别记为 R3 和 R4。表 3 为试验收集的水样。

表 3 试验收集的水样

Tab.3 Collected water samples of test

编号	水样说明
W1	自来水
W2	自来水经透水沥青路面结构初始(0 min)渗流的水样
W3	渗流试验 60 min 后收集的渗流自来水水样
R1	地表径流水样
R2	地表径流经透水沥青路面结构初始(0 min)渗流的水样
R3	渗流试验 20 min 后收集的渗流地表径流水样
R4	渗流试验 70 min 后收集的渗流地表径流水样

试验时间主要是根据储水桶容量持续的渗流时间确定。为了避免后期水体的加入改变水质,试验前储水桶中的水是一次注入的,体积大约为 60 L,持续渗流时间约为 1 h。当采用地表径流污水时,部分细颗粒污染物的堵塞导致结构层后期的渗流速

度减慢,因此持续时间有所增长。实际路面渗水时间与降雨历时相关,但一般而言,降雨初期地表径流中所含的污染物最多,经过约 1 h 的雨水冲洗后,地表径流污染物含量会显著减少。综合考虑上述因素,洁净水体试验持续时间为 60 min,地表径流污水试验持续时间为 70 min。

3 洁净水体的渗流试验结果

首先采用自来水进行试验,渗入透水沥青路面前后水体水质的指标测试结果见表 4。

表 4 自来水流经透水沥青路面前后水样的污染物含量

Tab.4 Pollutants concentration of running water before and after infiltrating in PAP

检测指标	W1	W2	W3
pH 值	7.94	7.82	7.80
浊度(NTU)	ND 1	3	ND 1
SS/(mg·L <sup>-1</sup> )	13	52	10
COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	17	30	13
BOD/(mg·L <sup>-1</sup> )	8.53	10.40	7.64
氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.060	0.264	0.055
TN/(mg·L <sup>-1</sup> )	2.55	3.42	2.44
TP/(mg·L <sup>-1</sup> )	ND 0.01	0.011	ND 0.01
PP/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.23	0.61	0.49
AVO/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.36	0.61	0.37
Cu/(mg·L <sup>-1</sup> )	ND 0.05	ND 0.05	ND 0.05
Zn/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.14	ND 0.05	ND 0.05
Pb/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.001 22	0.003 40	ND 0.001
Cd/(mg·L <sup>-1</sup> )	ND 0.000 1	ND 0.000 1	ND 0.000 1
Cr <sup>6+</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	ND 0.004	ND 0.004	ND 0.004
Cl <sup>-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	10.8	12.7	10.9

注:ND 为未检出;ND 后的数值为检出极限。

根据试验结果,3 种水样中未检出 Cr<sup>6+</sup>、Cu、Cd。在余下的 13 项检测指标中,水样 W2 的污染物含量一般高于水样 W1,其原因是填筑于圆柱长管中的砂和级配碎石含有粉尘、杂质,而砂一般从河床开采,夹杂了部分动植物残留有机质。相对洁净的水体经过路面渗流后会带走路面材料中的部分粉尘、杂质等污染物,造成水体中污染物含量的增大。

经过透水路面渗流 60 min 后采集的水样 W3 中,仅石油类含量高于自来水水样 A1(动植物油含量与 A1 基本持平),其余污染物含量均低于自来水水样 A1。其原因在于采用的多孔沥青混合料为新成型

试件,石油组分分散于水体或吸附于悬浮颗粒上,而造成水样 W2、W3 中石油类污染物含量较高。

### 4 地表径流的渗流试验结果

采用收集的地表径流进行试验,渗入透水沥青路面前后水体水质的指标测试结果见表 5。

地表径流污水与经透水沥青路面结构初始渗流水样的污染物对比如图 2 所示。可以看出,经过透水沥青路面渗流 0 min 收集的水样中,地表径流中的部分污染物浓度有明显的降低。其中石油、Cu、Zn 和 Pb 的污染物浓度为未检出;浊度、SS、COD、BOD、AVO 和 Cd 等浓度分别为初始地表径流浓度的 25.6%、14.0%、48.5%、50.9%、57.5%和 45.7%;氨氮、TN、TP、Cr<sup>6+</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 等污染物浓度变化不大。

收集的地表径流污水和经过透水沥青路面结构渗流 70 min 后水样的污染物对比如图 3 所示。可以看出,经过一定时间的透水沥青路面渗流后,地表径流中的污染物浓度显著降低。其中 Cu、Zn、Pb 和 PP 浓度均未检出;浊度、SS、COD、BOD、AVO 和 Cd 浓度分别仅为初始值的 12.8%、9.8%、42.5%、42.6%、34.7%、43%、

表 5 地表径流经透水沥青路面结构前后水样的污染物含量  
Tab. 5 Pollutants concentration of surface runoff before and after infiltrating in PAP

检测指标	R1	R2	R3	R4
pH 值	7. 17	7. 18	7. 14	7. 18
浊度(NTU)	9 750	2 500	1 900	1 250
SS/(mg · L <sup>-1</sup> )	785	110	96	77
COD/(mg · L <sup>-1</sup> )	532	258	235	226
BOD/(mg · L <sup>-1</sup> )	218. 0	111. 0	95. 7	92. 8
氨氮/(mg · L <sup>-1</sup> )	0. 929	0. 960	0. 611	0. 602
TN/(mg · L <sup>-1</sup> )	10. 3	10. 0	10. 7	10. 6
TP/(mg · L <sup>-1</sup> )	0. 390	0. 371	0. 307	0. 271
PP/(mg · L <sup>-1</sup> )	0. 87	ND 0. 04	ND 0. 04	ND 0. 04
AVO/(mg · L <sup>-1</sup> )	6. 69	3. 86	3. 13	2. 32
Cu/(mg · L <sup>-1</sup> )	0. 06	ND 0. 05	ND 0. 05	ND 0. 05
Zn/(mg · L <sup>-1</sup> )	0. 46	ND 0. 05	ND 0. 05	ND 0. 05
Pb/(mg · L <sup>-1</sup> )	0. 042 7	ND 0. 001	ND 0. 001	ND 0. 001
Cd/(mg · L <sup>-1</sup> )	0. 002 19	0. 001 00	0. 000 65	0. 000 38
Cr <sup>6+</sup> /(mg · L <sup>-1</sup> )	0. 036	0. 035	0. 029	0. 020
Cl <sup>-</sup> /(mg · L <sup>-1</sup> )	37. 7	38. 2	36. 2	35. 2

浓度分别仅为初始值的 13%、10%、42%、43%、

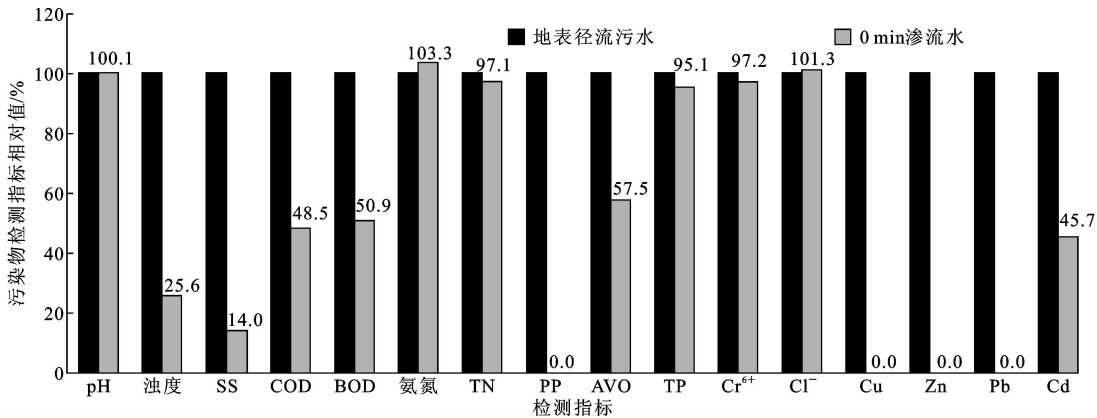


图 2 地表径流经透水沥青路面结构前后水样的污染物含量(0 min)  
Fig. 2 Pollutants concentration of surface runoff before and after infiltrating in PAP (0 min)

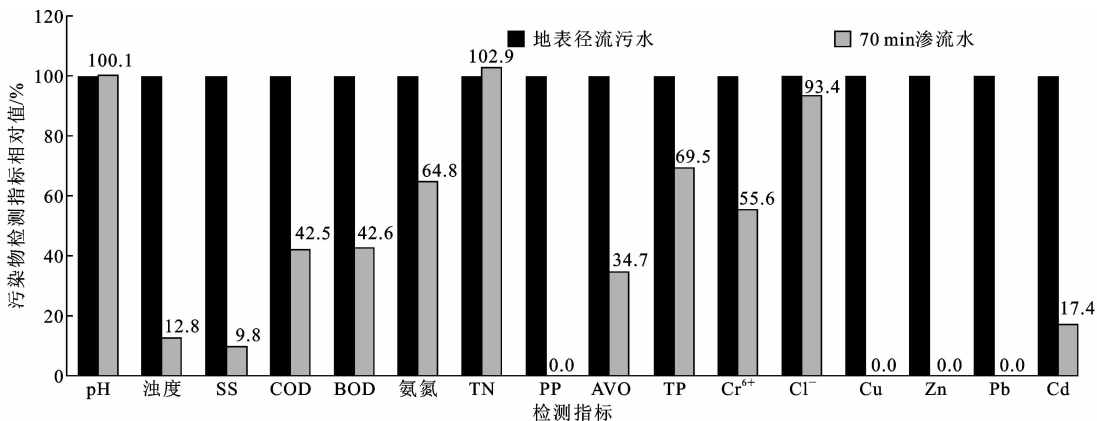


图 3 地表径流经透水沥青路面结构前后水样的污染物含量(70 min)  
Fig. 3 Pollutants concentration of surface runoff before and after infiltrating in PAP (70 min)

35%和17%;氨氮、TP和 $\text{Cr}^{6+}$ 污染物浓度也有明显降低,分别为初始值的65%、69%和56%;仅有TP和 $\text{Cl}^-$ 这2种污染物指标浓度变化不大。

透水沥青路面去除地表径流中污染物的机理主要是通过孔隙截留和物理吸附作用<sup>[17]</sup>。对于粒径大于 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 的SS,以及主要以吸附态吸附在悬浮物胶体上的Cu、Zn、Pb和Cd等重金属的去除效果最好;由于在地表径流试验中采用的多孔沥青混合料为自来水冲淋后且放置了一段时间的试件,表面易溶解挥发的石油组分较少,因此没有造成试验结果中PP污染物浓度的增加;多孔材料本身对油类污染物具有良好的物理吸附作用,因此对石油类、动植物油类有机污染物的去除效果也较好;透水沥青路面对BOD、COD、氨氮、TP等营养盐的过滤净化效果次之;而对 $\text{Cl}^-$ 、TN等无机阴离子和营养盐的过滤效果不佳,这是因为 $\text{Cl}^-$ 易溶于水,即使与水中的金属离子发生反应,生成的氯盐也不容易产生沉淀<sup>[18]</sup>。

随着水样采集时间的延长,水体中污染物含量都有不同程度的降低。原因是:一方面路面结构材料中自身含有的污染物在渗流初期会随着水流的冲刷作用去除;另一方面随着水样采集时间的延长,路面结构中截留的部分无机物、微生物和腐殖质可以增加结构对某些污染物的去除能力<sup>[19]</sup>。截留在路面材料中的污染物最终可以通过透水路面专用功能恢复车进行冲洗去除。

本文试验采用的透水沥青路面为全透式结构,雨水直接渗入路基,因此对路基土的水稳定性要求高,一般用于交通量相对较小,路基土质为砂性土的公园、景区、住宅区、校园、广场和停车场等道路结构中。当路基土的渗透系数较小时,可以配套建设相应的路侧排水设施,例如在路基顶面两侧铺筑排水管,排除未及时渗入路基的雨水,避免雨水长时间积留在路面结构中,排水系统设计如图4所示。

## 5 结 语

(1)研发了由上部储水筒存储地表径流雨水,下部圆柱长管填充透水路面材料的室内模拟透水沥青路面结构渗流装置,该装置通过室内收集路面结构渗出水样,可以分析地表径流渗入透水沥青路面后污染物浓度的变化规律。同时该装置也可用于测试其他材料的过滤效果及渗透速率。

(2)洁净水体经透水沥青路面渗流后,由于路面结构材料自身含有的污染物,初期渗流出的水样污

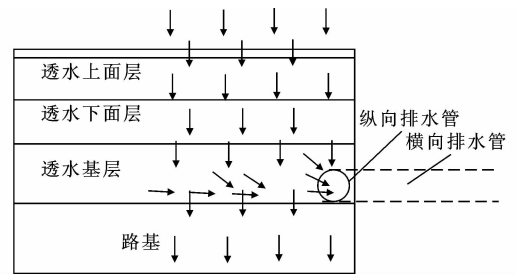


图4 排水系统设计图示(半幅道路横断面)

Fig.4 Schematic of drainage system design

(cross section of half range road)

染物含量相对较高,经过一段时间的渗流后,除石油类污染物外,渗流水样的各项污染物含量均小于入渗水体。

(3)透水沥青路面结构对重金属污染物的过滤效果最好,对石油类、动植物油类有机污染物的过滤效果较好,对BOD、COD、氨氮、TP等营养盐的过滤效果次之,而对 $\text{Cl}^-$ 、TN等无机阴离子和营养盐没有显著的过滤效果。随着水样采集时间的延长,水体中污染物含量都有不同程度的降低。

(4)透水沥青路面去除雨水中污染物的机理主要是通过截留和物理吸附作用。截留在路面材料中的污染物可以采用透水路面专用功能恢复车清洗去除。

(5)后续可进一步开展不同材料和厚度的透水沥青路面对地表径流水质的影响研究,以及室内与现场试验的相关性等研究。

## 参考文献:

### References:

- [1] 蒋 玮,沙爱民,肖晶晶,等. 透水沥青路面的储水-渗透模型与效能[J]. 同济大学学报:自然科学版,2013,41(1):72-77.  
JIANG Wei, SHA Ai-min, XIAO Jing-jing, et al. Water storage-infiltration model for permeable asphalt pavement and its efficiency[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(1): 72-77.
- [2] REVITT D M, LUNDY L, COULON F, et al. The sources, impact and management of car park runoff pollution: a review[J]. Journal of Environmental Management, 2014, 146: 552-567.
- [3] ZHAO Y Y, PEI Y S. Risk evaluation of groundwater pollution by pesticides in China: a short review[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 13: 1739-1747.
- [4] DIETZ M E. Low impact development practices: a review of current research and recommendations for fu-

- ture directions[J]. *Ecological Chemistry and Engineering*, 2015, 221(4): 351-363.
- [5] SANSALONE J, KUANG X, RANIERI V. Permeable pavement as a hydraulic and filtration interface for urban drainage[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2008, 134(5): 666-674.
- [6] COLLINS K A, HUNT W F, HATHAWAY J M. Side-by-side comparison of nitrogen species removal for four types of permeable pavement and standard asphalt in eastern north Carolina [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2010, 15(6): 512-521.
- [7] FASSMAN E A, BLACKBOURN S D. Road runoff water-quality mitigation by permeable modular concrete pavers[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2011, 137(11): 720-729.
- [8] 解晓光, 王 龙, 张 鑫. 不同空隙结构沥青混合料生态效能的研究[J]. *公路交通科技*, 2015, 32(3): 20-25, 45.  
XIE Xiao-guang, WANG Long, ZHANG Xin. Research on ecological efficiency of asphalt mixture with different porosities [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2015, 32(3): 20-25, 45.
- [9] 解晓光, 王 龙, 徐勇鹏. 不同空隙结构沥青混合料对路面径流污染的控制效能[J]. *武汉理工大学学报: 交通科学与工程版*, 2014, 38(1): 51-54.  
XIE Xiao-guang, WANG Long, XU Yong-peng. Controlling efficiency of runoff pollutant by porous asphalt[J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering*, 2014, 38(1): 51-54.
- [10] 解晓光, 王 龙. 基于减少路表径流污染的多孔沥青混合料设计[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2013, 41(10): 1502-1506.  
XIE Xiao-guang, WANG Long. Porous asphalt design based on decreasing runoff pollutant [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2013, 41(10): 1502-1506.
- [11] 崔珍珍. 透水路面结构层雨水入渗与水质净化性能及机理研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- CUI Zhen-zhen. Study on performance and mechanisms of stormwater infiltration and water purification of permeable pavement layers [D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [12] DONG T T T, LEE B K. Characteristics, toxicity, and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in road dust of Ulsan, Korea[J]. *Chemosphere*, 2009, 74(9): 1245-1253.
- [13] CAMPONELLI K M, CASEY R E, SNODGRASS J W, et al. Impacts of weathered tire debris on the development of *Rana sylvatica* larvae[J]. *Chemosphere*, 2009, 74(5): 717-722.
- [14] 郭广慧, 雷 梅, 陈同斌, 等. 交通活动对公路两侧土壤和灰尘中重金属含量的影响 [J]. *环境科学学报*, 2008, 28(10): 1937-1945.  
GUO Guang-hui, LEI Mei, CHEN Tong-bin, et al. Effect of road traffic on heavy metals in road dusts and roadside soils[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(10): 1937-1945.
- [15] COLLINS S J, RUSSELL R W. Toxicity of road salt to nova scotia amphibians[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(1): 320-324.
- [16] 张 蕾, 周启星. 城市地表径流污染来源的分类与特征[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(11): 2272-2279.  
ZHANG Lei, ZHOU Qi-xing. Research advances on source classification and characteristics of contaminative urban surface runoff [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(11): 2272-2279.
- [17] ECKLEY C S, BRANFIREUN B. Mercury mobilization in urban stormwater runoff[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 403(1-3): 164-177.
- [18] JIANG W, SHA A M, XIAO J J, et al. Experimental study on materials composition design and mixture performance of water-retentive asphalt concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 111: 128-138.
- [19] SANSALONE J, ZHENG T. In situ partial exfiltration of rainfall runoff. II: particle separation[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2004, 130(9): 1008-1020.