

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.09.020

地表径流污染物在透水铺装系统中的迁移规律

张紫阳^{1,2}, 亓浩³, 张晓然^{1,2}, 白小娟², 谭朝洪², 李海燕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. 南京沃谱瑞环境研究院有限公司, 江苏 南京 210044; 3. 北京建筑大学 北京市可持续城市排水系统构建与风险控制工程技术研究中心, 北京 100044)

摘要: 针对北京市雨水径流特性,选取3种典型的透水铺装系统即水泥透水砖、砂基透水砖和页岩透水砖,以面层破损实验和柱实验方式研究透水铺装系统对常规径流污染物(COD、NH₄⁺-N、TN、TP)的去除效能和机制,探讨不同降雨重现期和透水铺装各床层的影响。结果表明,破损的面层材料经雨水浸泡后可能会出现污染物溶出现象,加剧径流污染。3种透水铺装系统出水中的径流污染物浓度变化趋势基本一致,随着运行时间的延长,大部分污染物的浓度先急剧降低随后出现不同程度的升高。水泥砖和砂基砖透水铺装系统对污染物的去除效能较为接近,均优于页岩砖透水铺装系统。3种透水铺装系统面层、基层下部以及底基层对COD和NH₄⁺-N的去除效果较好;系统各床层对TN的去除效果均较差,甚至出现TN析出现象,但对TP的去除效果均较好。当降雨重现期增加时,透水铺装系统对污染物的去除效果变差。

关键词: 透水铺装系统; 径流污染; 低影响开发; 面源污染

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)09-0123-10

Migration of Surface Runoff Pollutants in Permeable Pavement System

ZHANG Zi-yang^{1,2}, QI Hao³, ZHANG Xiao-ran^{1,2}, BAI Xiao-juan², TAN Chao-hong², LI Hai-yan¹

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Nanjing Water Purification Environment Institute Co. Ltd., Nanjing 210044, China; 3. Engineering Research Center of Sustainable Urban Sewage System Construction and Risk Control, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: According to the characteristics of rainfall runoff in Beijing, three typical permeable pavement systems, namely cement permeable brick, sand-based permeable brick and shale permeable brick, were selected to investigate the conventional runoff pollutants (COD, NH₄⁺-N, TN and TP) removal efficiency and removal mechanism of the permeable pavement system by surface damage experiment and column experiment, and the effects of different rainfall return periods and permeable pavement beds on runoff control were investigated. After the damaged surface material was soaked by rainwater, the

基金项目: 北京建筑大学金字塔人才培养工程项目(JDYC20200315); 北京建筑大学市属高校基本科研业务费专项资金资助项目(X20140); 北京市教育委员会科研计划项目(KM202110016009); 青年北京学者计划项目(024)

通信作者: 李海燕 E-mail: lihaiyan@bucea.edu.cn

pollutants might dissolve out and aggravated the runoff pollution. The variable trends of runoff pollutants concentration in the effluent from the three permeable pavement systems were basically the same. With the extension of operation time, most of the pollutants concentration firstly decreased sharply and then increased in different degrees. The pollutants removal efficiencies of the cement brick and sand-based brick permeable pavement systems were similar and superior to that of the shale brick permeable pavement system. The surface layer, the lower base layer and the bottom base layer of the three permeable pavement systems had a better COD and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal performance. The removal performance of TN in each bed of the system was poor, and even TN release phenomenon was observed. However, the removal performance of TP was good. When the rainfall return period increased, the pollutants removal performance of the permeable pavement system became worse.

Key words: permeable pavement system; runoff pollution; low impact development; non-point source pollution

透水铺装系统作为一种典型的单项海绵技术措施,因其较高的渗透速率,在缓解城市内涝、削减城市径流污染方面具有重要的作用^[1-2]。国内外学者针对透水铺装的水文水力性能做了大量的研究工作,如控制径流总量、削减径流峰值、延缓峰现时间、提高入渗效率等,但对透水铺装去除污染物的机制研究较少^[3-5]。鉴于此,笔者选择了3种常用的透水铺装系统(水泥透水砖、砂基透水砖、页岩透水砖),并结合北京市雨水径流污染物特性,以面层材料破损实验和柱实验相结合的方式,研究不同类型透水铺装系统对典型径流中的常规污染物的去除效能,分析污染物在透水铺装系统中的迁移转化规律,并探究不同降雨重现期对透水铺装去除污染物的影响,以期为径流污染物的去除和透水铺装系统的结构优化提供有效的参考和建议。

1 实验材料和方法

1.1 面层材料破损实验

面层材料是透水铺装系统的重要组成部分,一般具有多孔隙结构,这种结构有利于径流的快速下渗,但会使面层材料的稳定性和抗磨抗压能力变差,容易破损^[6]。尤其在人为干预的情况下(如行人、机动车等),面层材料的结构破坏速度会加剧,影响对径流污染物的去除效能。为模拟面层材料破损,将3种不同面层材料破碎为2~5 mm的颗粒,用去离子水清洗面层材料3次,并浸泡3 d,以去除颗粒表面附着的有机物等杂质,将颗粒物放置于烘箱中烘干(105 °C)后保存备用。采用X射线荧光(XRF)测定3种面层材料的特性和主要化学成分。

为研究破损面层材料对雨水径流中常规污染物的去除效能,将3种面层材料颗粒以10 g/L的投加量加入到模拟雨水径流中,在150 r/min下匀速搅拌,在不同时间点取样,经0.45 μm滤膜过滤后,测定水中残留的污染物浓度。选择COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN和TP四种典型的径流污染物,根据实际径流水质人工配制模拟雨水径流,其COD、TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别为420、12.2、1.22、4.49 mg/L。

1.2 柱实验

为研究透水铺装系统对径流污染物的去除效能和机制,在实验室搭建箱式透水铺装系统,并构建降雨系统模拟自然降雨。实验装置如图1所示。

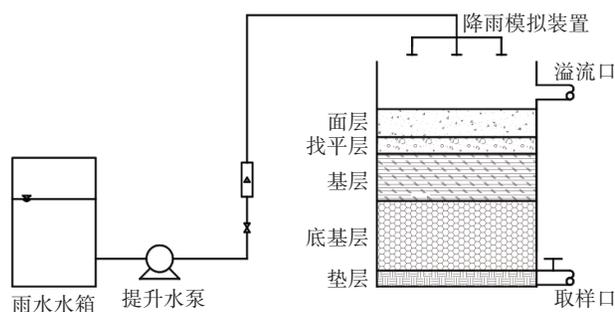


图1 动态实验装置

Fig.1 Dynamic experimental facility

配水箱由不透明PVC板制成,容积为60 L,模拟透水铺装的箱式主体为600 mm×300 mm×600 mm的长方体,由PVC板焊接而成。面层分别是水泥砖、砂基砖、页岩砖,找平层采用30 mm中砂;基层为150 mm级配砾石;底基层为200 mm级配碎石;垫层为50 mm中砂。透水铺装系统自上而下共设7个出

水口,出水口高度以系统底部为基准,取样口1位于面层底部,高度为430 mm;取样口2位于找平层底部,高度为400 mm;取样口3位于基层,高度为350 mm;取样口4位于基层底部,高度为250 mm;取样口5位于底基层,高度为150 mm;取样口6位于底基层底部,高度为50 mm;取样口7位于垫层底部,高度为0 mm。

用平方降雨法模拟人工降雨,根据《城镇雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》(DB 11/T 969—2016),按照北京市暴雨强度公式计算设计降雨量,设计重现期取5 a,径流系数取0.9。雨水径流水质参照前述人工配制雨水径流水质。

1.3 降雨重现期对透水铺装控污效能的影响

降雨重现期分别选取2、3、5 a。流量计算方法与柱实验一致,每次实验降雨时长为2 h,汇水面积 F 采用装置平面尺寸(600 mm×300 mm),由此得到不同重现期下的径流流量。取样时间分别为10、20、40、60、80、100、120 min。

2 结果与分析

2.1 面层材料破损实验

2.1.1 面层材料XRF表征结果

采用XRF测定3种面层材料的主要化学成分,结果显示,水泥砖和砂基砖的主要化学成分类似,均为CaO、SiO₂和MgO,分别占其总质量的51.6%、24.4%、11.7%和47.9%、28.5%、15.4%,累计质量占比均超过了87%。而页岩砖的主要成分为SiO₂(61.6%)、Al₂O₃(18.8%)和Fe₂O₃(9.15%),CaO和MgO含量较少,仅为2.64%和1.60%。

2.1.2 破损面层材料对径流污染物的去除效果

破损面层材料对径流污染物的去除效果见图2。

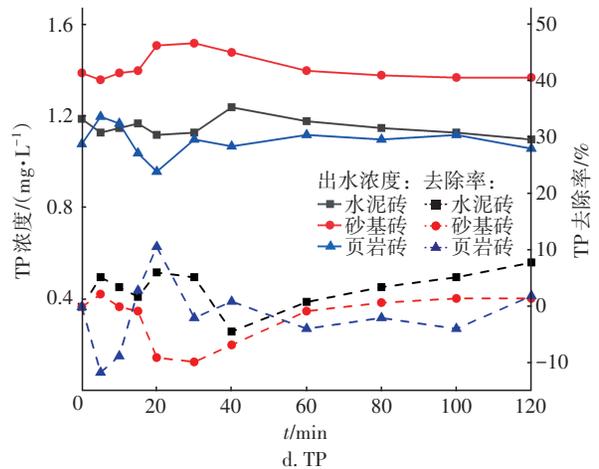
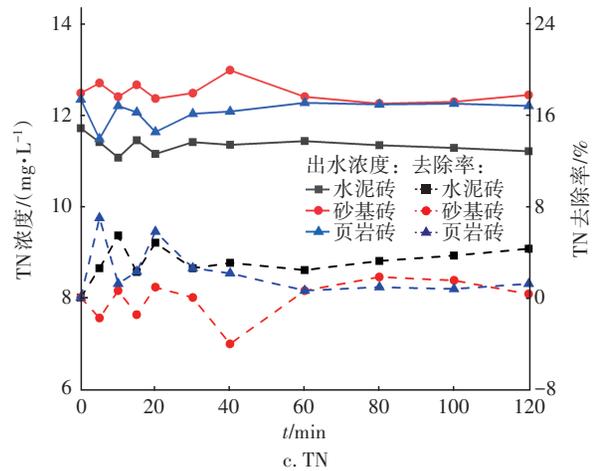
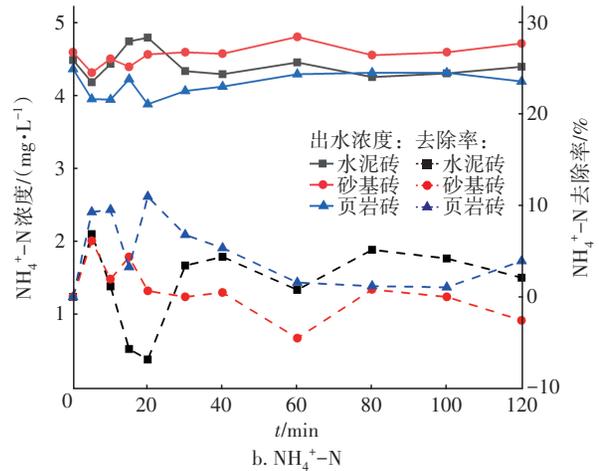
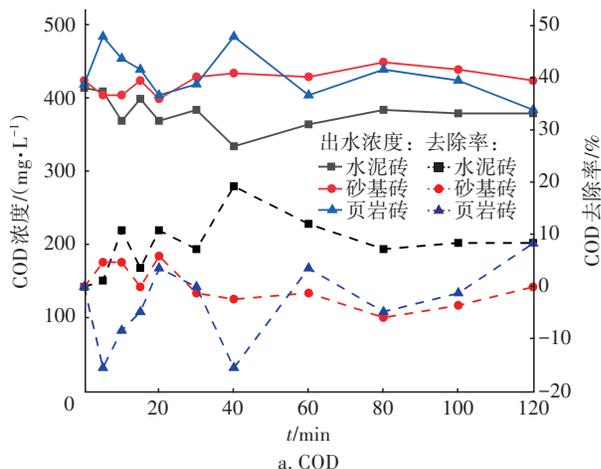


图2 破损面层材料对雨水径流污染物的去除效果
Fig.2 Removal effect of pollutants in rainwater runoff by damaged surface materials

从图2(a)可以看出,整个实验过程中COD浓度均呈剧烈波动趋势,去除效果较差。接触120 min后,水泥砖和页岩砖体系中的COD浓度从425 mg/L分别降到380和385 mg/L,去除率分别为8.43%和8.33%;而砂基砖体系中的COD浓度基本上没有变

化。从图2(b)可以看出,3种破损面层材料体系中的 NH_4^+-N 浓度呈现一定的波动性,并在一定范围内保持稳定。接触120 min后,水泥砖、砂基砖和页岩砖体系中的 NH_4^+-N 浓度分别为4.40、4.72、4.20 mg/L,去除率分别为2.10%、-2.58%和3.92%。面层材料破损后与雨水径流的接触面积变大,易导致氮类污染物溶出。面层材料对 NH_4^+-N 的去除主要依靠吸附作用,当 NH_4^+-N 的释放速率大于吸附速率时就会导致浓度升高,引起浓度的波动。实验后期两种作用处于动态平衡状态, NH_4^+-N 浓度趋于稳定。从图2(c)可以看出,3种破损面层材料体系中的TN浓度整体在一定范围内呈波动状态。接触120 min后,水泥砖、页岩砖和砂基砖体系中的TN浓度分别由初始的11.7、12.3、12.5 mg/L变为11.2、12.2、12.4 mg/L。破损的砂基砖会导致径流TN浓度升高,与 NH_4^+-N 的变化幅度较为相似,说明破损面层材料对氮类污染物的去除作用有限,甚至会溶出新的污染物。从图2(d)可以看出,接触120 min后,水泥砖、砂基砖和页岩砖体系的TP浓度分别为1.10、1.37和1.06 mg/L,对应的去除率分别为7.87%、1.50%和1.94%。

另外,3种破损面层材料体系中的pH随接触时间的增加而增加,其中,水泥砖和砂基砖体系中的pH变化较为相似,均随着接触时间的增加先大幅度升高后逐渐平稳,接触20 min后,pH从6.20分别升高到7.36和7.43,之后增长幅度变缓,最终稳定在7.89和7.61;页岩砖体系中的pH随着接触时间的增加而缓慢增长,最终稳定在6.77。结合3种面层材料的XRF结果可知,水泥砖和砂基砖中均含有大量的CaO,其破损后使得部分CaO进入水中,生成碱性产物,导致径流的pH升高;而页岩砖的主要成分为 SiO_2 ,且碱性氧化物的含量较少,使得径流pH上升缓慢。虽然破损后的面层材料都会导致径流pH升高,但接触120 min后,pH仍稳定在6~9范围内。

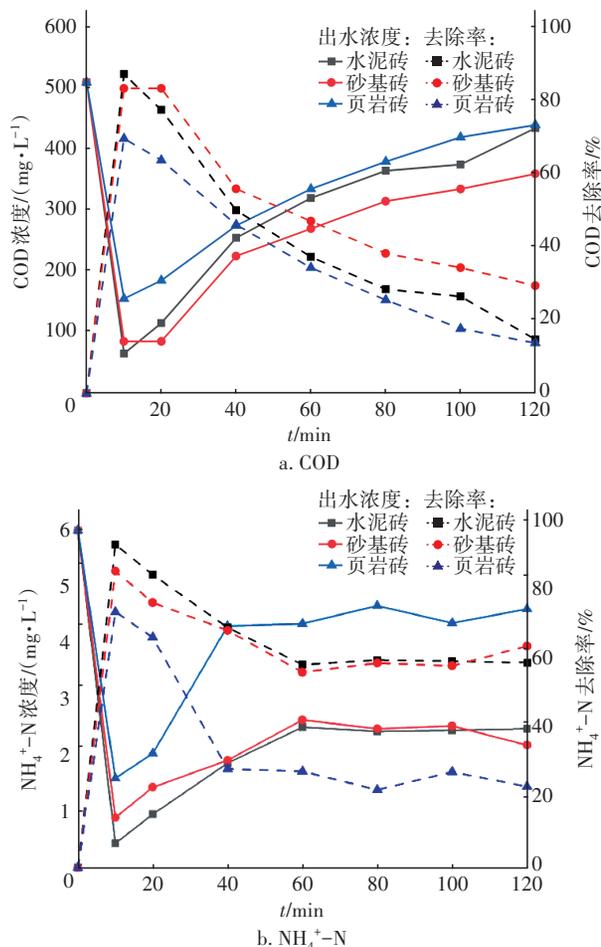
综上,面层材料对常规径流污染物的去除作用有限,如果面层材料破损,经雨水长时间浸泡后可能还会出现污染物溶出现象,加剧径流污染。

2.2 柱实验

2.2.1 不同透水铺装系统的除污效果

3种透水铺装系统对径流污染物的去除效能见图3。由图3(a)可知,3种系统的出水COD浓度变化基本一致,都呈先下降后升高的趋势。运行10

min时,与进水COD浓度(510 mg/L)相比,水泥砖、砂基砖和页岩砖系统出水COD浓度分别降到65.0、85.1和155 mg/L,此时对COD的去除效能最高,去除率分别为87.25%、83.33%和69.61%;之后,出水COD浓度显著升高,120 min时达到435、360和440 mg/L,此时去除率分别为14.7%、29.4%和13.7%。Mahmoud等人^[7]监测了美国德克萨斯州2年内的降雨事件,比较了透水路面和传统路面对径流量及径流水质的控制作用,发现透水路面比传统路面更能有效控制径流污染,与本研究结果相似。本研究由于运行时间较短,透水铺装系统对COD的去除主要依靠渗滤材料的吸附作用。运行初期,渗滤材料的吸附位点较多,吸附容量较大,因此出水COD浓度会显著降低;随着运行时间的延长,渗滤材料的吸附位点逐渐饱和,对COD的去除效果显著下降,导致出水浓度逐渐升高。3种系统的COD去除效果为:砂基砖>水泥砖>页岩砖。总体而言,当降雨时间较长或者径流污染较严重时,3种透水铺装系统对COD的去除效能较差。



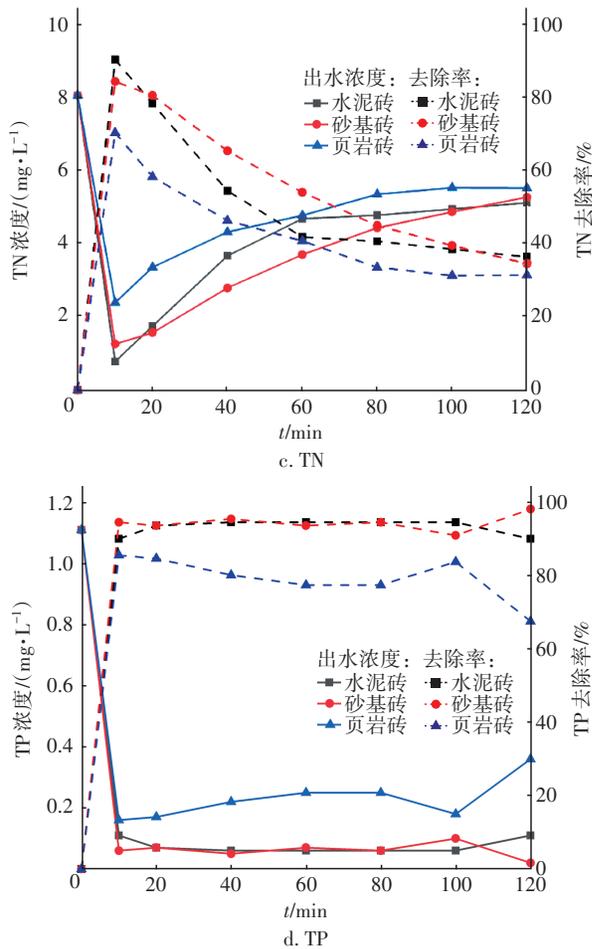


图3 不同透水铺装系统对径流污染物的去除效能

Fig.3 Removal efficiency of runoff pollutants by different permeable pavement systems

从图3(b)可以看出,3种系统的出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化趋势基本一致,都是先降低后升高。与进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度(6 mg/L)相比,运行10 min时,水泥砖、砂基砖和页岩砖系统的出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度降到最低,分别为0.430、0.890和1.59 mg/L,此时去除率分别为92.8%、85.2%和73.5%;之后,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度缓慢升高,在60 min时基本达到稳定,分别为2.50、2.63和4.34 mg/L,去除率分别为58.3%、56.2%和27.7%。对比3种系统,页岩砖系统出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度回升速度更快,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果相对较差,而水泥砖和砂基砖系统的出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度回升幅度较小。随着降雨时间的延长,3种透水铺装系统对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果变差,有研究表明,透水铺装的渗滤材料如中砂等表面通常带负电荷,容易去除携带正电荷的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,但随着运行时间的延长,这种去除能力逐渐变弱^[8]。综合来看,在进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$

浓度不变的情况下,3种透水铺装系统出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在前20 min可以满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的V类水体水质要求,但是20 min以后出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度超过了此标准,因此如果降雨持续时间较长,仅仅依靠透水铺装系统无法有效控制径流中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 。

从图3(c)可以看出,3种透水铺装系统的出水TN浓度变化趋势基本一致,均为先急剧下降而后逐渐回升。与进水TN浓度(8.05 mg/L)相比,运行10 min时,水泥砖、砂基砖、页岩砖3种系统的出水TN浓度降到最低,分别为0.780、1.26和2.39 mg/L,去除率达到了90.3%、84.3%和70.3%;之后,出水TN浓度逐渐回升并趋于稳定,运行120 min时,出水TN浓度分别为5.12、5.27和5.52 mg/L。综合来看,页岩砖系统对TN的去除效能较差,在整个实验期间,出水TN浓度均无法满足地表水V类水质要求;而水泥砖与砂基砖系统出水TN浓度在前20 min内可以达到此标准,但20 min后逐渐超出此标准。透水铺装系统对TN的去除通常依靠渗滤材料的吸附、离子交换、静电中和等作用,其中吸附是最主要的去除手段,在运行前期,介质表面有充足的吸附位点和吸附容量,因此对TN的去除效果较好,但是随着运行时间的延长,吸附接近饱和,对TN的去除作用逐渐降低。

从图3(d)可以看出,3种透水铺装系统对TP均有较好的去除效果,且出水TP浓度变化趋势基本一致,均为先急剧下降而后基本稳定。运行10 min时,水泥砖、砂基砖和页岩砖系统的出水TP浓度由进水的1.11 mg/L分别降至0.11、0.06和0.16 mg/L,去除率达到了90.1%、94.6%和85.6%;随后基本保持稳定的高去除率,最终3种系统对TP的去除率分别为90.1%、98.2%和67.6%。结合前述XRF表征实验,页岩砖面层材料的主要成分为 Al_2O_3 和 SiO_2 ,其较为稳定,难以与磷污染物发生反应而实现高效除磷,但多数时间内,页岩砖系统对TP的去除率也保持在80%左右,随着系统的运行,吸附作用趋于平衡,甚至可能会出现污染物溶出现象,造成TP去除率降低。有研究表明,径流中的可溶性磷能与砂质材料表面的金属盐类反应,生成不溶性盐沉淀,从而实现一定的除磷效果^[9]。综合来看,3种类型的透水铺装系统出水TP浓度均能达到地表水V类水质要求。

另外,水泥砖、砂基砖和页岩砖 3 种系统的出水 pH 分别为 7.48、7.27、7.66,与进水 pH(7.32)相比,整体变化较平稳,3 种透水铺装系统对雨水径流 pH 的影响并不显著。

2.2.2 系统中不同床层的除污效果

透水铺装系统的不同床层对径流污染物的去除效果如图 4 所示。

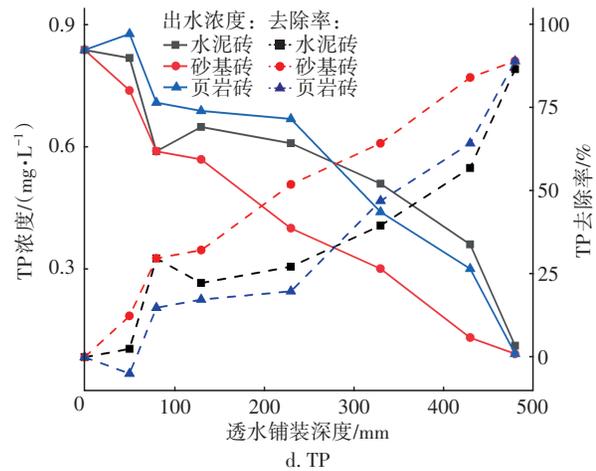
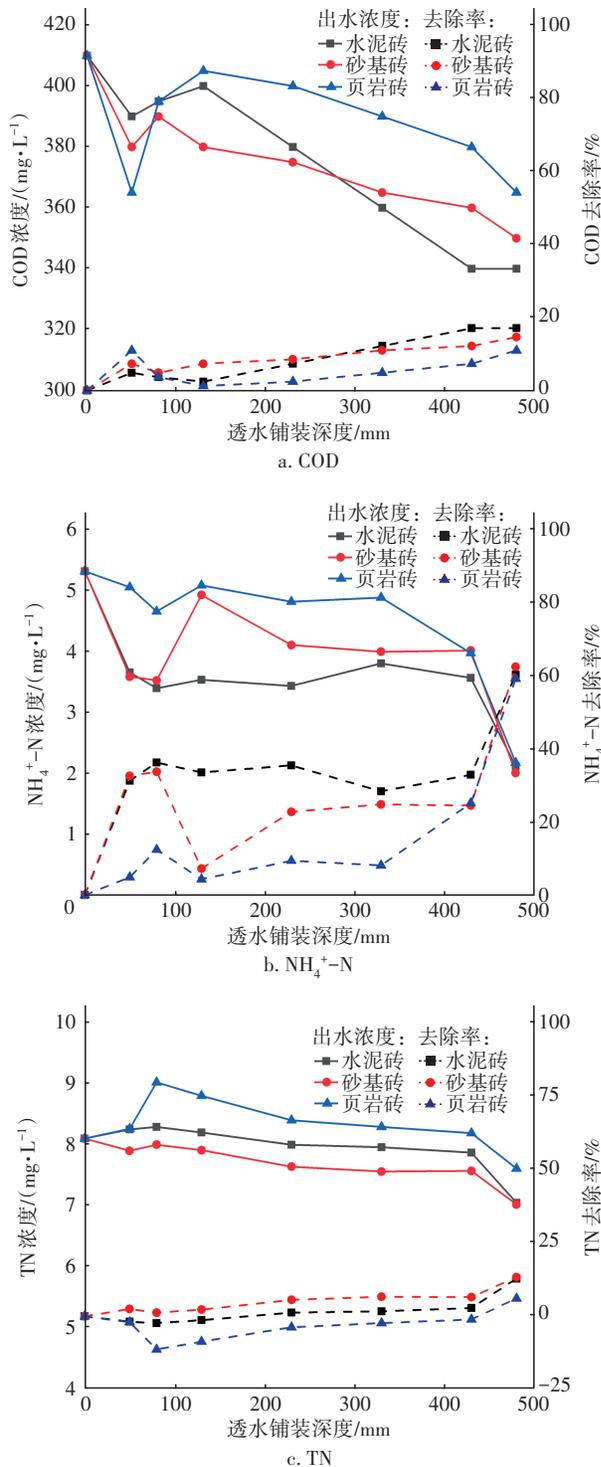


图 4 透水铺装系统的不同床层对径流污染物的去除效果

Fig.4 Removal effect of runoff pollutants by different beds of permeable pavement system

从图 4(a)可以看出,透水铺装系统的面层、基层的下部和底基层对 COD 有良好的去除效果。径流经过水泥砖、砂基砖和页岩砖透面层净化后,COD 由进水的 410 mg/L 分别降为 390、380 和 365 mg/L。结合各层的厚度和材料来看,面层材料有较多的孔隙结构,能够有效截留和吸附污染物;基层与底基层采用砾石材料且厚度较大,因此流程较长,保证了一定的停留时间,从而实现了一定的除污效果。

从图 4(b)可以看出,透水铺装对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除主要依靠面层和垫层,基层和底基层对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果不明显。有研究表明,面层材料主要通过吸附作用去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 。而垫层中的中砂不仅可以通过吸附去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,还可以通过离子交换去除^[9]。与中砂相比,中部床层的砾石材料颗粒较大,比表面积相对较小,且无明显的电荷吸附能力,因此对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果不明显。从图 4(c)可以看出,透水铺装系统各结构层对 TN 的去除效果均较差,去除率最高的是垫层,其余层甚至出现析出现象。Liu 等人^[10]通过模拟实验发现,增加透水铺装的砾石层厚度时,透水铺装对 TN 的去除效果有较大的提升,去除率提高 10% 左右。

从图 4(d)可以看出,透水铺装各结构层对 TP 的控制效果较为均衡,各结构层均具有一定的除磷效果。不同的是,水泥砖和砂基砖面层具有一定的除磷效果,而页岩砖面层出现了 TP 的溶出。一般来说,透水铺装系统主要通过吸附、沉淀和微生物降解等作用去除 TP,其中,面层材料主要通过吸附和沉淀作用去除 TP;基层和底基层中的砾石含有的大

量 Ca^{2+} , 与雨水径流中的 PO_4^{3-} 生成 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 沉淀从而去除 TP; 垫层则主要通过吸附以及微生物降解作用实现除磷效果^[11]。

在透水铺装系统中, 各床层对雨水径流 pH 的影响程度不尽相同, 但整体变化幅度不大, pH 变化范围为 7.58~7.94。在 3 种系统的面层中, pH 均呈下降趋势, 其中水泥砖面层材料的 pH 下降最明显。由于基层、底基层、垫层采用的砾石和中砂均为中性材料, 因此不会引起 pH 的明显变化。

2.3 降雨重现期对透水铺装除污效能的影响

2.3.1 对 COD 去除效果的影响

不同降雨重现期下透水铺装系统对 COD 的去除效果如图 5 所示。可以看出, 在不同降雨重现期下, 3 种透水铺装系统的出水 COD 浓度变化趋势基本一致, 均为先急剧下降而后逐渐回升。运行 10 min 后, 不同重现期 (5、3、2 a) 条件下的 3 种系统对 COD 的去除效果最佳, 其中, 水泥砖系统出水 COD 浓度由进水的 510、465、495 mg/L 分别降为 65.1、30.2、60.0 mg/L, 去除率分别达到了 94.7%、93.6%、87.9%; 砂基砖系统出水 COD 浓度降为 85.2、150、120 mg/L, 去除率分别为 90.4%、67.7%、75.6%; 页岩砖系统出水 COD 浓度降为 155、195、210 mg/L, 去除率为 75.53%、58.06%、57.57%。可见, 重现期对不同透水铺装系统去除 COD 有一定影响。整体来看, 在较小的重现期下, 径流中污染物负荷较低, 各床层渗滤材料能够充分与污染物接触从而能进行有效吸附, 当重现期增大时, 流量随之增大, 中砂、砾石等无法进行稳定的吸附和降解, 甚至还有可能将系统内部吸附截留的污染物冲刷出来, 导致出水 COD 浓度上升。

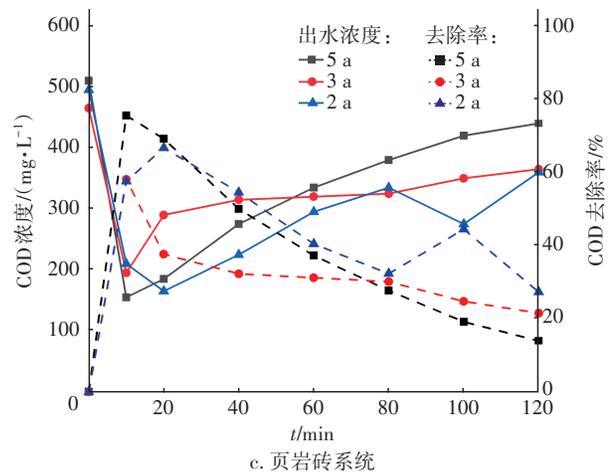
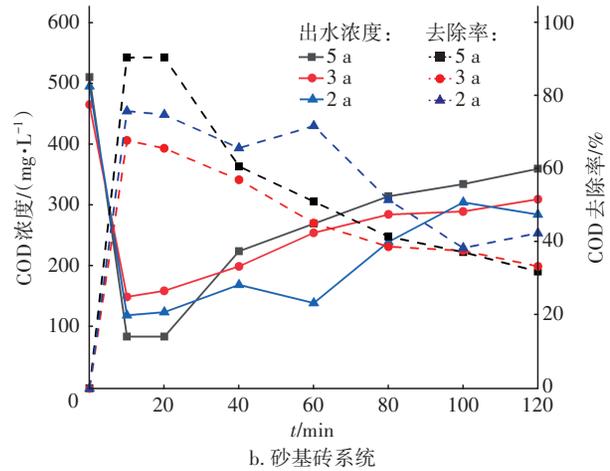
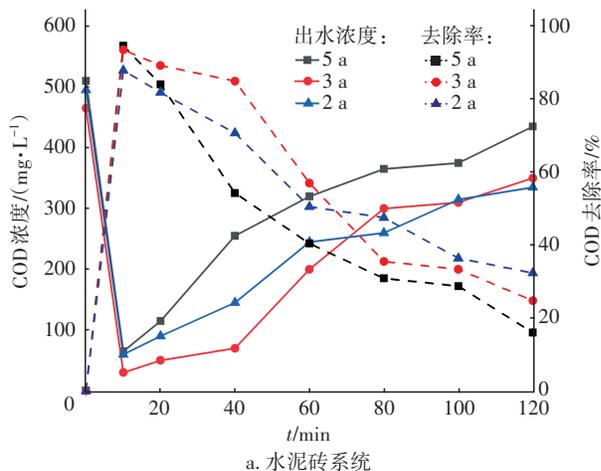


图5 降雨重现期对透水铺装系统 COD 去除效果的影响

Fig.5 Effect of rainfall return period on COD removal in permeable pavement system

2.3.2 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果的影响

不同降雨重现期下透水铺装系统对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果见图 6。3 种系统的出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均为先急剧下降、之后有一定回升、最后趋于稳定。运行 10 min 后, 不同重现期 (5、3、2 a) 下 3 种系统对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果最佳, 水泥砖系统出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度由进水的 6.00、6.42、6.07 mg/L 分别降为 0.43、0.91、0.46 mg/L, 去除率分别为 92.8%、86.0%、92.4%, 砂基砖系统的去除率分别为 85.2%、90.1%、94.7%, 页岩砖系统的去除率分别为 73.5%、91.6%、76.2%。运行 120 min 后, 5、3、2 a 重现期下水泥砖系统的出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别为 2.47、2.54、2.2 mg/L, 去除率分别为 58.8%、60.4%、63.8%, 砂基砖系统的去除率分别为 63.8%、70.9%、73.6%, 页岩砖系统的去除率为 23.4%、28.7%、30.7%。重现期对 3 种系统去除

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 效能的影响程度为:页岩砖>砂基砖>水泥砖。透水铺装系统对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除主要依靠化学吸附作用,重现期增大会提高下渗流速,缩短停留时间,部分 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 可能未及时进行化学吸附而随出流排出系统。

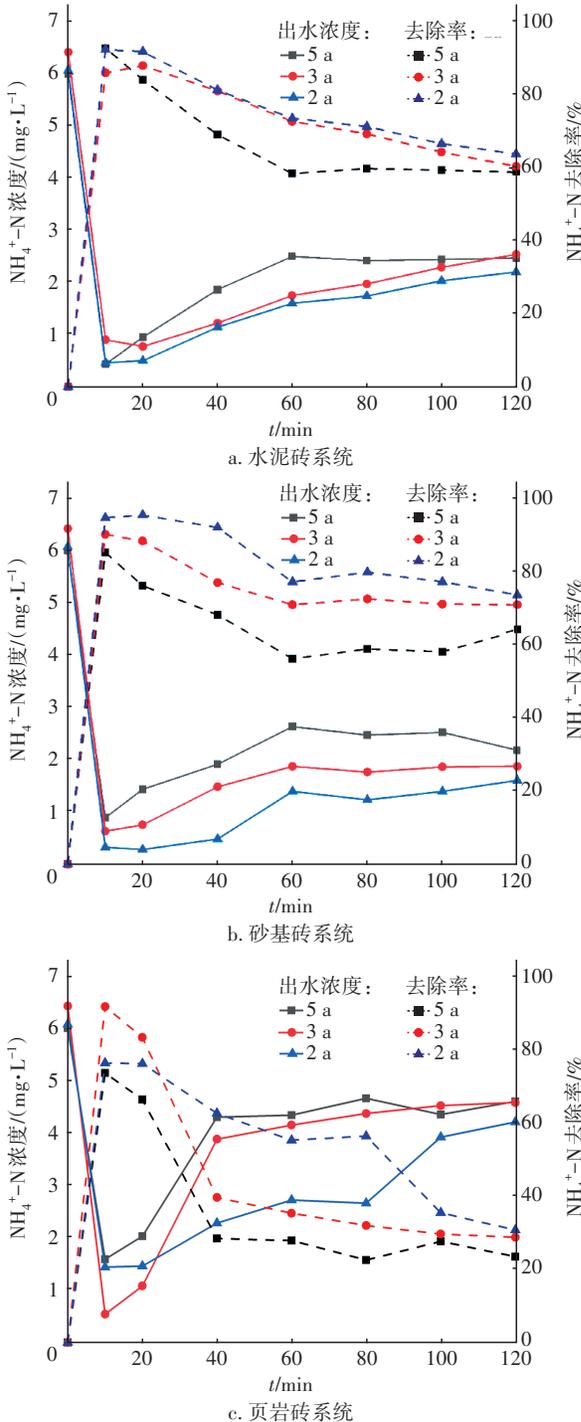


图 6 降雨重现期对透水铺装系统 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果的影响
 Fig.6 Effect of rainfall return periods on $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal in permeable pavement system

2.3.3 对 TN 去除效果的影响

不同降雨重现期下透水铺装系统对 TN 的去除效果如图 7 所示。

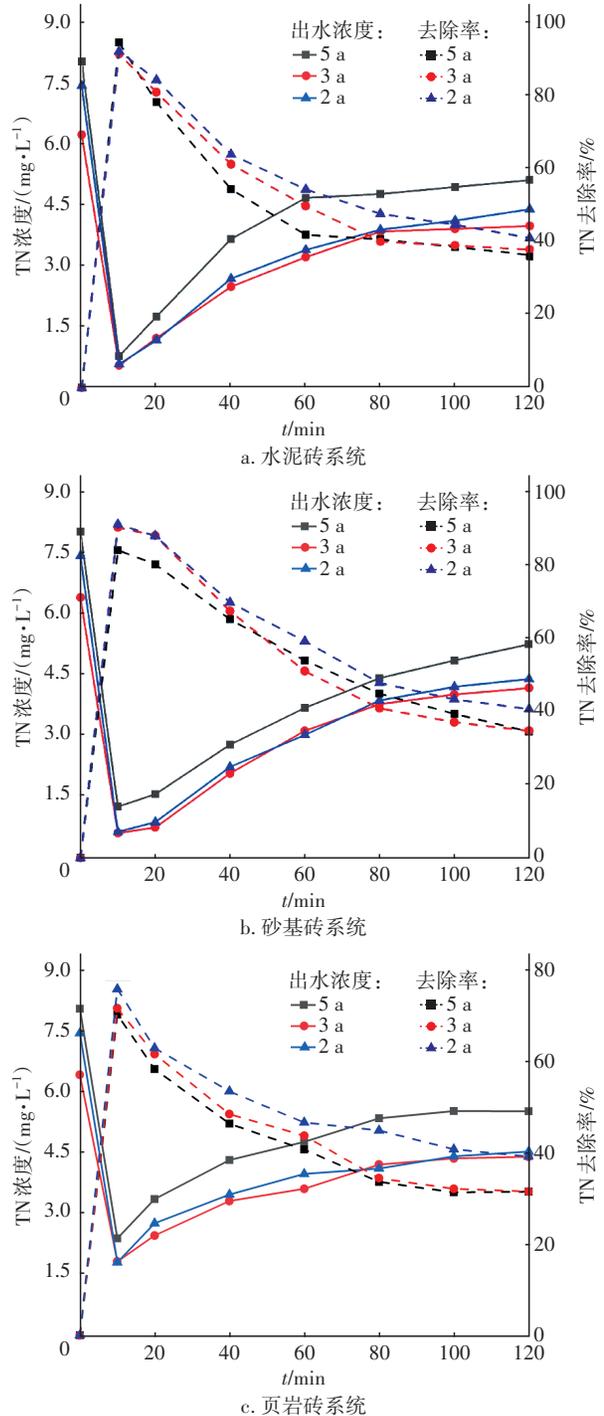


图 7 降雨重现期对透水铺装系统 TN 去除效果的影响
 Fig.7 Effect of rainfall return period on TN removal in permeable pavement system

从图 7 可以看出,在不同重现期下 3 种透水铺装系统的出水 TN 浓度变化趋势基本一致,均为先

急剧下降然后逐渐回升。运行10 min后,在不同的重现期(5、3、2 a)下,3种系统对TN的去除效果最佳,其中,水泥砖系统出水TN浓度由进水的8.05、6.24、7.45 mg/L分别降为0.78、0.55、0.58 mg/L,去除率分别达到了90.3%、91.5%、92.2%,砂基砖系统的去除率分别为84.3%、90.6%、91.4%,页岩砖系统的去除率分别为70.3%、71.6%、75.9%。当系统运行时间较短时(10 min),不同重现期对径流中TN的去除效果影响较小,但随着系统运行时间的延长,降雨重现期增加会影响透水铺装系统对径流TN的去除,表现为3种系统在2 a与3 a重现期下的TN去除效果较为接近且优于5 a重现期下的TN去除效果。运行120 min后,在5、3、2 a重现期下水泥砖系统的TN去除率分别为36.4%、37.9%、41.0%,砂基砖系统的去除率分别为34.5%、34.8%、40.8%,页岩砖系统的去除率分别为31.4%、31.5%、39.2%。Liu等人^[10]也发现在较小的降雨强度下TN的去除效果更好,可能的原因除了与前述污染物的情况类似外,氮类污染物进行反硝化需要一定的厌氧环境,在较大的降雨重现期条件下,径流流速增加,使得水体中的溶解氧浓度增加,这不利于氮类污染物的去除。

2.3.4 对TP去除效果的影响

不同降雨重现期下透水铺装系统对TP的去除效果如图8所示。可以看出,在不同重现期下,3种透水铺装系统的出水TP浓度变化趋势基本一致,均为先急剧下降然后在一定范围内保持稳定。运行10 min后,在5、3、2 a重现期下水泥砖系统的出水TP浓度由进水的1.11 mg/L分别降为0.11、0.03、0.06 mg/L,去除率分别达到了90.5%、97.5%、94.6%,砂基砖系统的去除率分别为94.2%、97.9%、97.6%,页岩砖系统的去除率分别为85.6%、88.8%、90.1%。重现期对3种系统的除磷效果影响不大,系统运行120 min后,在5、3、2 a重现期下水泥砖系统的出水TP浓度分别为0.02、0.02、0.03 mg/L,去除率分别为98.0%、97.9%、97.6%,砂基砖系统的去除率分别为90.1%、94.8%、96.1%,页岩砖系统的去除率分别为67.7%、77.8%、84.1%。王俊岭等人^[12]研究了透水铺装系统常用材料对径流污染物的吸附性能,认为磷的吸附原理为物理黏附和化学吸附,材料的聚合羟基阳离子接触磷时生成磷酸盐沉积物,从而实现除磷。

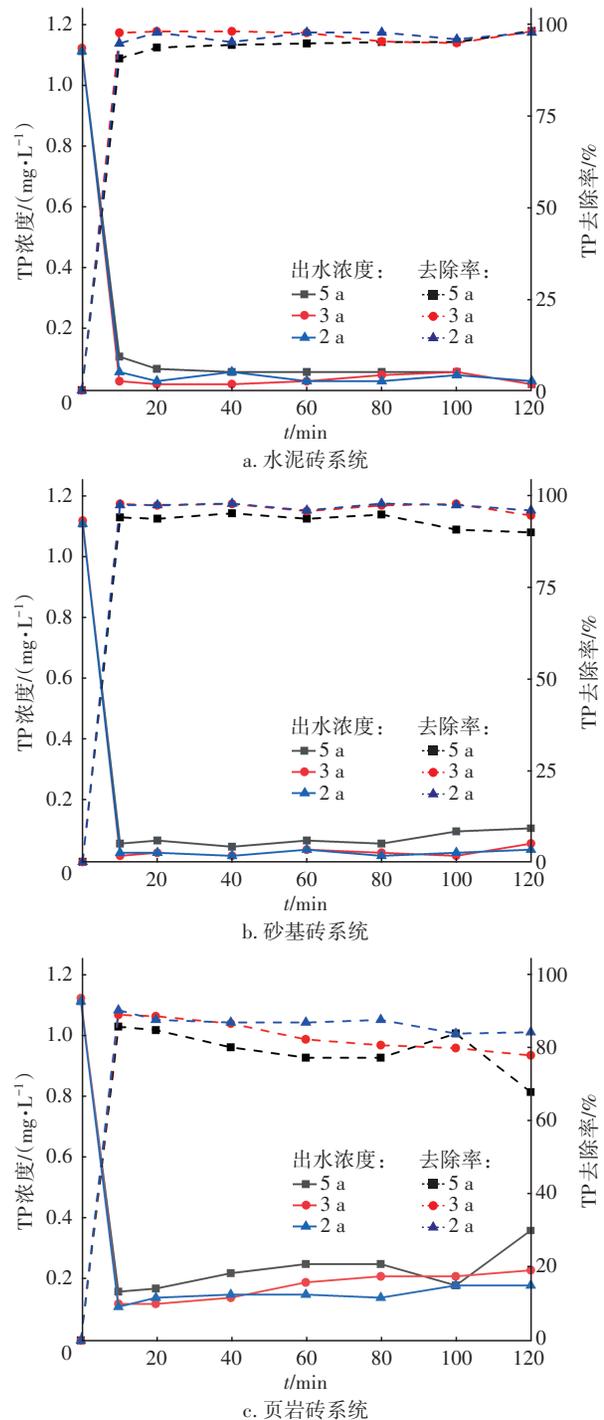


图8 降雨重现期对透水铺装系统TP去除效果的影响

Fig.8 Effect of rainfall return period on TP removal in permeable pavement system

3 结论

① 透水铺装面层材料破损后对径流污染物的去除效果较差,并且可能会析出污染物,因此需要对透水铺装尤其是面层材料及时进行维护。

② 3种透水铺装系统中径流污染物的出水浓

度均呈现出先急剧下降随后回升的变化趋势,水泥砖和砂基砖系统的除污效能优于页岩砖系统。

③ 透水铺装系统的不同床层对径流污染物的去除效能不同,例如,面层、基层下部和底基层对COD和TN的去除效果较好,面层和垫层对 NH_4^+-N 的去除效果较为明显。各床层对TN的去除效能较差,甚至出现TN析出的现象。

④ 降雨重现期对3种透水铺装系统去除污染物的影响有所不同,随着重现期的增加,透水铺装系统对污染物的去除效果会变差。

参考文献:

- [1] 车伍,赵杨,李俊奇,等. 海绵城市建设指南解读之基本概念与综合目标[J]. 中国给水排水, 2015, 31(8): 1-5.
CHE Wu, ZHAO Yang, LI Junqi, *et al.* Explanation of *Sponge City Development Technical Guide*: basic concepts and comprehensive goals [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(8): 1-5 (in Chinese).
- [2] HENSEN B, LANGE J, JACKISCH N, *et al.* Entry of biocides and their transformation products into groundwater via urban stormwater infiltration systems [J]. *Water Research*, 2018, 144: 413-423.
- [3] 解铭,杨智,周杨军,等. 上海临港新城道路改造海绵城市设计方案[J]. 中国给水排水, 2020, 36(20): 137-142.
XIE Ming, YANG Zhi, ZHOU Yangjun, *et al.* Sponge city design scheme of road reconstruction in Shanghai Lingang New-city District [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(20): 137-142 (in Chinese).
- [4] BRASWELL A S, WINSTON R J, HUNT W F. Hydrologic and water quality performance of permeable pavement with internal water storage over a clay soil in Durham, North Carolina [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 224: 277-287.
- [5] LIU J, YAN H X, LIAO Z Y, *et al.* Laboratory analysis on the surface runoff pollution reduction performance of permeable pavements [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 691: 1-8.
- [6] 韩暖. 基于海绵城市理念下的透水砖及铺装设计[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
HAN Nuan. Design of Permeable Bricks and Pavement Based on the Concept of Sponge City [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017 (in Chinese).
- [7] MAHMOUD A, ALAM T, SANCHEZ A, *et al.* Stormwater runoff quality and quantity from permeable and traditional pavements in semiarid South Texas [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2020, 146(6): 15.
- [8] 李秀英,陈志和,孔萌,等. 水环境变化下泥沙颗粒的界面作用特征研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2011, 50(4): 139-143.
LI Xiuying, CHEN Zhihe, KONG Meng, *et al.* Study of interfacial interaction properties of sediment particles with the change in water environments [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2011, 50(4): 139-143 (in Chinese).
- [9] 王俊岭,秦全城,张玉玉,等. 河砂对径流污染物吸附效果试验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(9): 86-92.
WANG Junling, QIN Quancheng, ZHANG Yuyu, *et al.* Experiment on the river sand for the adsorption effect of runoff contaminants [J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(9): 86-92 (in Chinese).
- [10] LIU W, FENG Q, CHEN W P, *et al.* Stormwater runoff and pollution retention performances of permeable pavements and the effects of structural factors [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27: 30831-30843.
- [11] NIU Z G, LV Z W, ZHANG Y, *et al.* Stormwater infiltration and surface runoff pollution reduction performance of permeable pavement layers [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23: 2576-2587.
- [12] 王俊岭,刘栓,张玉玉,等. 透水混凝土铺装常用材料对径流污染物的吸附性能试验研究[J]. 混凝土, 2016(10): 143-147, 151.
WANG Junling, LIU Shuan, ZHANG Yuyu, *et al.* Experiment on adsorptive capacity of permeable concrete pavement materials for runoff pollutants [J]. *Concrete*, 2016(10): 143-147, 151 (in Chinese).

作者简介:张紫阳(1985-),男,山西侯马人,博士,副教授,研究方向为径流雨水中污染物的迁移转化等。

E-mail: ziyangzhang@126.com

收稿日期:2021-01-19

修回日期:2021-02-05

(编辑:刘贵春)