

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.01.019

建筑垃圾再生骨料用于透水铺装去除重金属研究

曹汉鹏¹, 李海燕^{1,2,3}, 张轶慧⁴, 张紫阳^{1,2,3}, 白小娟^{1,2}

(1. 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; 2. 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; 3. 北京建筑大学城市雨水与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 4. 北京亦庄环境科技集团有限公司, 北京 100176)

摘要: 建筑垃圾产生量的持续攀升给城市环境带来了严重危害,因而迫切需要寻求针对建筑垃圾回收处理并再生利用的解决途径。建筑垃圾再生骨料作为一种低成本、大体量的再生材料,在水处理领域具有一定的应用潜力。选取再生砖骨料(RBA)与再生混凝土骨料(RCA)应用于透水铺装,通过搭建5种系统,分析在不同进水浓度、降雨重现期、雨前干燥期的条件下,其对径流中典型重金属 Zn^{2+} 和 Cu^{2+} 的去除效果和净化机制。结果表明,RCA在透水铺装系统中表现出更好的重金属去除效果,而RBA作为基层使用时去除效果较好。随着进水浓度、降雨重现期的增加,各透水铺装系统对 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 的去除率降低。而随着雨前干燥期的增加,各系统对 Zn^{2+} 和 Cu^{2+} 的去除率出现了小幅升高的现象。各系统对 Cu^{2+} 的去除率均最高,始终保持在80%以上。两种再生骨料在透水铺装系统中均展现出一定的应用价值与使用前景。

关键词: 建筑垃圾; 再生骨料; 透水铺装; 重金属

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)01-0126-08

Construction Waste Recycled Aggregate for Heavy Metals Removal in Permeable Pavement

CAO Han-peng¹, LI Hai-yan^{1,2,3}, ZHANG Yi-hui⁴, ZHANG Zi-yang^{1,2,3},
BAI Xiao-juan^{1,2}

(1. Beijing Energy Conservation & Sustainable Urban and Rural Development Provincial and Ministry Co-construction Collaboration Innovation Center, Beijing 100044, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Sustainable Urban Sewage System Construction and Risk Control, Beijing 100044, China; 3. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 4. Beijing Yizhuang Environmental Technology Group Co. Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: The continuous increase of construction waste has brought serious harm to the urban environment, so it is urgent to seek solutions for its recycling and reuse. As a low cost and large volume recycled material, construction waste recycled aggregate has certain application potential in the field of

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978032、52270086); 青年北京学者计划(NO.024); 北京市教委-市自然科学基金联合资助项目(21JH0024); 北京建筑大学金字塔人才工程-建大领军培养计划(JDLJ20200301)

通信作者: 李海燕 E-mail: lihaiyan@bucea.edu.cn; 白小娟 E-mail: baixiaojuan@bucea.edu.cn

water treatment. Recycled brick aggregate (RBA) and recycled concrete aggregate (RCA) were selected and used in the permeable pavement system. Five systems were built to analyze the removal efficiencies and purification mechanisms of Zn^{2+} and Cu^{2+} from runoff under different influent concentrations, rainfall return periods and antecedent dry periods. RCA showed better removal performances of heavy metals in the permeable pavement system, while RBA showed better removal performances when used as the subgrade. With the increase of influent concentration and rainfall return period, the removal rates of Zn^{2+} and Cu^{2+} by the permeable pavement system decreased. However, the removal rates of Zn^{2+} and Cu^{2+} increased slightly with the increase of the antecedent dry period. The removal rates of Cu^{2+} by all the systems were the highest, which were always above 80%. The two kinds of recycled aggregates showed certain application potential and prospect in the permeable pavement system.

Key words: construction waste; recycled aggregate; permeable pavement; heavy metal

随着我国城镇化建设的不断推进,大批旧建筑、旧设施被拆除或改造,导致建筑垃圾产生量高速增长。大量建筑垃圾被直接填埋,对土壤、水、大气环境均造成了严重危害。针对建筑垃圾造成的污染问题,国务院在2018年底印发的《“无废城市”建设试点工作方案》中明确提出建筑垃圾治理的任务要求,即依据建筑垃圾产生现状和发展趋势来合理规划布局,构建建筑垃圾转运调配、消纳处置和资源化利用设施全流程的处理体系。将建筑垃圾制成高质量的再生骨料是实现资源化利用的有效途径^[1],国内外研究人员针对再生骨料的制作、强化、环境污染风险等方面开展了大量研究。Yan等^[2]将亚麻纤维增强聚合物与再生混凝土骨料相结合,发现其显著提高了再生混凝土的极限强度和延性。周文娟等^[3]研究发现水泥掺量、再生骨料中混凝土颗粒含量的增加可提高无机混合料强度。崔聚等^[4]对建筑垃圾及其再生产品开展环境污染风险评价,发现再生产品的生态风险水平低于再生产品原材料。建筑垃圾再生骨料在功能特性与经济成本上均展现了较好的应用潜力。因此,解决建筑垃圾再生骨料的实际应用问题,对实现环境效益与经济效益的同步双赢具有重要意义。

透水铺装系统因其适用性广、施工方便的特点,在海绵城市建设中被广泛使用。传统透水铺装系统由透水面层、透水找平层、透水基层、透水垫层和土基层组成,其利用各结构层中渗滤材料的截留吸附作用,达到削减径流量以及净化雨水的目的,渗滤材料也因此成为了透水铺装系统的研究重点之一。Ostrom等^[5]利用膨胀页岩轻骨料、铝基水处

理残渣和车前草基黏结剂制作出了一种新型雨水处理介质并应用于透水路面基层,发现其可以有效降低雨水中溶解性磷和总金属浓度。王俊岭等^[6]对透水铺装基层骨料进行优选,发现沸石改性的基层对雨水径流典型污染物COD、TN、TP、 Cu^{2+} 均有较好的削减效果。赵远玲等^[7]通过对比构造透水砖和普通透水砖对雨水径流的促渗减排作用发现,构造透水砖对径流总量、峰值流量的控制效果要优于普通透水砖。鉴于透水铺装材料的研究目前多集中于水力特性分析以及径流中常规污染物的去除效果,因此笔者选择两种建筑垃圾再生骨料分别作为基层和垫层的介质应用于透水铺装系统,并分析了不同进水浓度、降雨重现期、雨前干燥期对径流中典型重金属 Zn^{2+} 和 Cu^{2+} 的去除效果和净化机制,旨在为建筑垃圾资源化提供新途径,进而为再生骨料的实际应用提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 实验材料

再生砖骨料(RBA)和再生混凝土骨料(RCA)均来自于北京某建筑垃圾处理公司。将两种再生粗骨料破碎后,依次使用2~5 mm的筛子进行筛分。然后使用纯水分别将过筛的两种再生细骨料彻底清洗,待再生细骨料表面的灰尘及其他杂质清洗干净后,将其置于105℃的烘箱中干燥至恒质量,最后取出两种再生细骨料置于真空干燥器中备用。

1.2 透水铺装装置

采用5个相同的直径为100 mm、高度为1 000 mm的实验柱A、B、C、D、E来模拟透水铺装系统。每个装置的结构从上至下依次为面层、找平层、基

层、垫层和土基层,各结构层的厚度分别为60、30、300、100和250 mm。为了考察建筑垃圾再生骨料作为透水铺装介质对典型重金属的去除效果,选取经1.1节步骤处理后的两种再生骨料作为透水铺装的基层或垫层。除基层与垫层外,5个实验柱中其余各结构层的材料与参数均相同,其中面层透水砖的渗透系数为0.041 cm/s。各实验柱均通过蠕动泵控制进水流量,采用顶部进水、底部出水的方式运行。5个实验柱的主要结构见表1。

表1 不同透水铺装实验柱结构

Tab.1 Experimental column structure with different permeable pavements

项 目	透水铺装实验柱				
	A	B	C	D	E
面层	透水砖	透水砖	透水砖	透水砖	透水砖
找平层	中砂	中砂	中砂	中砂	中砂
基层(粒径为10~20 mm)	碎石	RBA	碎石	RCA	碎石
垫层(粒径为0.5~1 mm)	粗砂	粗砂	RBA	粗砂	RCA
土基层	夯实土	夯实土	夯实土	夯实土	夯实土

1.3 实验方法

两种再生骨料对重金属吸附等温实验的初始重金属浓度均设为1、5、15、30、60、100、120 mg/L,将RBA和RCA以8 g/L的投加量分别加入到40 mL的塑料离心管中(称取两种再生骨料的质量均为0.32 g,溶液体积为40 mL)。然后将所有离心管置于恒温振荡器中,温度设置为25℃,以145 r/min的转速振荡,待吸附达到平衡后取上清液,经0.45 μm的微孔滤膜过滤后进行分析测试。

考察不同进水浓度(Zn^{2+} : 5、10、20 mg/L; Cu^{2+} : 2、4、8 mg/L),不同降雨重现期(0.5、1、2 a),不同雨前干燥期(2、4、10 d)的进水条件下几种透水铺装系统对重金属的吸附性能。实验进水采用 $Zn(NO_3)_2$ 和 $Cu(NO_3)_2$ 配制,并用1 mol/L的 HNO_3 和 $NaOH$ 调节进水pH至6~6.5。配水搅拌均匀后,由蠕动泵控制进入各系统中的流量。自系统开始出水的一刻采集水样,分别在0、10、20、30、40、50、60、80、100、120 min各取一次样品,收集的水样经0.45 μm滤膜过滤后测定重金属浓度。

1.4 分析方法

采用X射线荧光技术(XRF)测定基质的化学成

分;采用全自动物理吸附仪测定基质的比表面积与孔径分布;采用台式酸度计测定进出水pH;采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定水样中重金属浓度。

采用Langmuir和Freundlich等温吸附模型拟合两种再生骨料对 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 的吸附,如下所示:

$$q_e = \frac{A_L \cdot q_m \cdot C_e}{1 + A_L \cdot C_e} \quad (1)$$

$$q_e = K_F \cdot C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

式中: q_e 为吸附平衡时吸附剂对污染物的吸附量,mg/g; q_m 为吸附剂的最大吸附量,mg/g; C_e 为吸附平衡时溶液中污染物浓度,mg/L; A_L 、 K_F 为与吸附能有关的常数; n 为与吸附剂的吸附强度有关的常数。

2 结果与分析

2.1 再生骨料的性质

RBA与RCA两种骨料的孔隙特征较为接近,RBA的比表面积为2.773 2 m²/g,稍大于RCA的2.682 5 m²/g;与之相反,RBA的孔体积与平均孔径分别为0.013 5 mL/g和19.472 1 nm,略小于RCA的0.013 7 mL/g和20.428 7 nm。总体来说,两种再生骨料在孔隙特征上并未表现出较大差异。

两种建筑垃圾再生骨料的化学成分见表2。可知,两种骨料的化学成分较为接近,最主要的组分均为SiO₂,RBA中Al₂O₃和Fe₂O₃的占比更高,而RCA则含有更多的CaO与MgO。由于吸附介质中的金属离子(如K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺)易通过离子交换反应吸附重金属,因此二者化学成分的差异会直接影响重金属的吸附效果。

表2 再生骨料的化学成分

Tab.2 Chemical composition of recycled aggregate

项 目	化学成分						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
RBA	63.84	17.94	4.76	4.71	2.46	2.97	2.04
RCA	52.29	13.42	3.61	17.01	5.96	3.01	2.90

2.2 再生骨料对重金属的静态等温吸附效能

表3为RBA和RCA对 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 的Langmuir和Freundlich吸附等温拟合后的数据。可知,Langmuir模型的拟合结果优于Freundlich模型,故可以认为两种再生骨料对 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 的吸附更倾向于单分子层吸附。RCA对 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 的饱和吸附量均稍高于

RBA。此外对于两种模型的吸附能常数 A_L 及 K_F 值, RCA 均大于 RBA,这表明 RCA 与 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 的结合力更强,因此可以更好地吸附两种重金属。另一方面,两种再生骨料对 Cu^{2+} 的吸附量均远超对 Zn^{2+} 的吸附量,其原因可能是 Cu^{2+} 在溶液中的一级水解常数(8.96)小于 Zn^{2+} 的一级水解常数(9.0),从而使再生骨料对 Cu^{2+} 有更强的吸附能力。

表 3 RBA 和 RCA 对 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 的吸附等温拟合结果
Tab.3 Fitting results of adsorption isotherms of Zn^{2+} and Cu^{2+} by RBA and RCA

项目		Langmuir 吸附等温方程			Freundlich 吸附等温方程		
		$q_m/(mg \cdot g^{-1})$	$A_L/(L \cdot mg^{-1})$	R^2	K_F	n	R^2
Zn^{2+}	RBA	2.10	0.09	0.97	0.40	3.03	0.94
	RCA	2.90	0.18	0.99	0.59	3.10	0.97
Cu^{2+}	RBA	13.06	0.04	0.97	0.94	1.97	0.93
	RCA	14.05	0.06	0.98	1.40	2.12	0.96

为验证吸附过程中的离子交换作用,对重金属浓度为 120 mg/L 条件下吸附前后的溶液中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 三种离子进行测定,发现 Fe^{3+} 浓度在吸附前后均未发生变化。而 RBA 对 Cu^{2+} 的吸附使溶液中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度分别提高至吸附前的 10.87 和 2.13

倍,对 Zn^{2+} 的吸附则使 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度分别提高至吸附前的 18.54 和 2.67 倍。与之类似,在 RCA 对重金属的吸附过程中, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 两种离子分别提高至吸附前的 9.70、1.25 倍以及 33.58、1.42 倍。由此结果可知, Fe^{3+} 未参与离子交换,而 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 在离子交换过程中起到了主要作用,且以 Ca^{2+} 更为显著。同时对比两种再生骨料离子的浓度变化结果可知,RCA 吸附实验中的 Ca^{2+} 浓度增加量明显高于 RBA,这应是由于其组分中更高比例的 CaO 提供了更多可离子交换的 Ca^{2+} ,这也进一步解释了 RCA 对重金属吸附量更大的原因。

2.3 不同条件对系统去除典型重金属的影响

2.3.1 系统出水 pH

表 4 为不同实验条件下各透水铺装系统的出水 pH。可知,在实验进水 pH 为 6~6.5 的条件下,填料更换为 RBA 的系统 B 和 C 出水 pH 较进水有所上升,与传统透水铺装系统 A 的出水 pH 相近。但使用了 RCA 的系统 D 和 E 的出水 pH 相较于进水和 A、B、C 系统均有明显的升高,RCA 中含有的强碱性水泥水化产物 $Ca(OH)_2$ 可能是导致出水 pH 提高的原因。pH 升高会导致胶体表面负电荷增加、形成金属阳离子的羟基态等,进而强化了重金属的去除^[8-9],这也与本实验的结果相对应。

表 4 系统出水 pH

Tab.4 pH of systems effluent

项目	条件	进水 pH	出水 pH				
			A	B	C	D	E
进水浓度	低	6.32	7.53 ± 0.05	7.40 ± 0.16	7.35 ± 0.09	9.88 ± 0.25	11.07 ± 0.49
	中	6.48	7.94 ± 0.11	7.93 ± 0.12	8.08 ± 0.08	9.23 ± 0.28	11.09 ± 0.12
	高	6.21	7.06 ± 0.09	7.29 ± 0.10	7.03 ± 0.04	9.19 ± 0.05	10.99 ± 0.24
降雨重现期/a	0.5	6.34	7.20 ± 0.51	7.25 ± 0.46	7.18 ± 0.19	9.06 ± 0.05	10.50 ± 0.32
	1	6.21	7.06 ± 0.09	7.24 ± 0.08	7.03 ± 0.04	9.19 ± 0.05	10.99 ± 0.24
	2	6.39	7.26 ± 0.19	7.38 ± 0.05	7.26 ± 0.05	9.44 ± 0.08	10.38 ± 0.15
雨前干燥期/d	2	6.21	7.06 ± 0.09	7.29 ± 0.10	7.03 ± 0.04	9.19 ± 0.05	10.99 ± 0.24
	4	6.42	7.21 ± 0.04	7.43 ± 0.09	7.48 ± 0.16	9.23 ± 0.07	11.15 ± 0.31
	10	6.47	7.27 ± 0.19	7.31 ± 0.14	7.24 ± 0.14	9.05 ± 0.18	9.99 ± 0.33

2.3.2 进水浓度对重金属去除效能的影响

在低、中、高三种不同进水浓度(Zn^{2+} : 5、10、20 mg/L; Cu^{2+} : 2、4、8 mg/L)的条件下,考察 A、B、C、D、E 五种类型的透水铺装系统对径流中 Zn^{2+} 和 Cu^{2+} 去除率随时间的变化,结果见图 1。

由图 1 可知,各透水铺装系统对 Zn^{2+} 和 Cu^{2+} 的最高去除率均出现在低进水浓度时。随着重金属浓

度的增加, Zn^{2+} 和 Cu^{2+} 的去除率均有不同程度的下降,说明各透水铺装系统对重金属的去除效果随水中重金属浓度的增加而减弱。由于重金属的去除主要通过离子交换和化学沉淀作用^[10],因此在低浓度条件下,系统中不同结构层的填料介质对 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 的吸附和沉淀作用能够得到充分发挥,但随着重金属浓度的增加,填料介质的部分吸附位点被沉

淀物覆盖,抑制了对重金属离子的吸附作用,导致高浓度条件下系统对重金属的去除率变低。另一

方面,高浓度条件下部分填料介质吸附饱和后可能在进水持续的冲刷下而出现重金属的解吸。

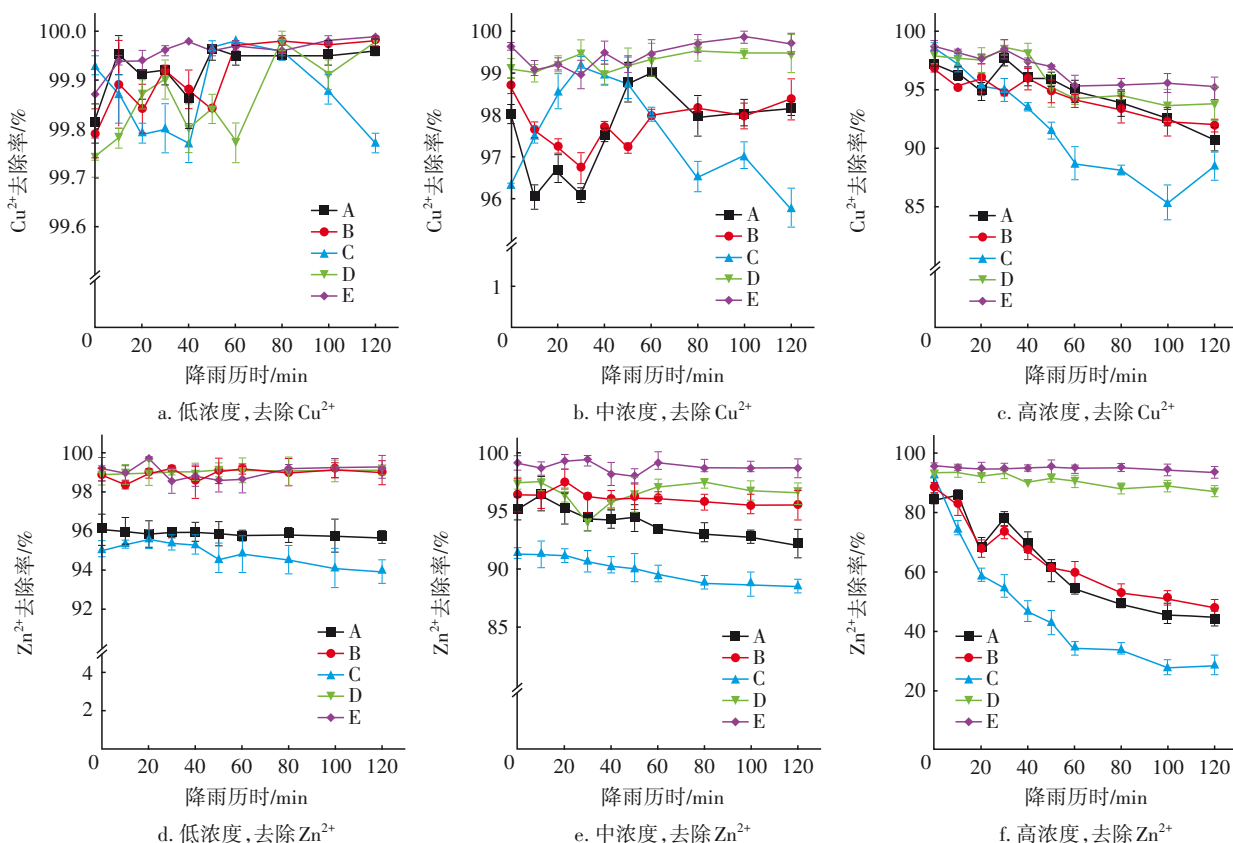


图1 不同进水浓度下透水铺装系统对 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 的去除率

Fig.1 Removal rates of Zn^{2+} and Cu^{2+} by permeable pavement systems at different influent concentrations

在相同进水浓度的条件下,各透水铺装系统对 Zn^{2+} 和 Cu^{2+} 的去除效果从优到劣的顺序为: $E>D>B>A>C$ 。可知,将建筑垃圾再生骨料应用于透水铺装基层后,系统对重金属的去除率得到提高。原因可能是相对于碎石,两种再生骨料有更加粗糙的介质表面和更大的比表面积,利于其吸附进水中的重金属;同时再生骨料更高的孔隙率也延长了进水在系统中的水力停留时间,有利于对重金属的去除。对比透水铺装系统A、D、E和表4可知,将基层的碎石或垫层的粗砂换成RCA后,系统对重金属的去除率明显提高。这是因为RCA中含有呈碱性的水泥水化产物,而在碱性的环境中有利于重金属的沉淀。但对于透水铺装系统,还应同时考虑过高的出水pH对土壤和地下水的影响^[11]。因此在实际工程中,建议将RCA作为系统基层填料使用,强化去除雨水径流中重金属的同时也避免过高pH带来的污染问题。对比两种重金属的吸附结果可以发现,各系统

对 Cu^{2+} 的去除效果均要优于 Zn^{2+} 。根据溶度积系数计算可知, Zn^{2+} 和 Cu^{2+} 完全沉淀时的pH分别为8.66和6.84,因而在相同pH的条件下, Cu^{2+} 优先形成沉淀被去除^[12];此外 Cu^{2+} 的水解常数小于 Zn^{2+} 的水解常数,使介质对 Cu^{2+} 有更好的吸附效果;最后 Cu^{2+} 的电负性($\chi=1.90$)比 Zn^{2+} 的电负性($\chi=1.65$)更强,在竞争吸附的情况下,填料介质对 Cu^{2+} 的静电吸引力更大,从而有更好的去除效果^[13]。

2.3.3 降雨重现期对重金属去除效能的影响

在0.5、1、2 a三种不同降雨重现期的条件下,分析五种类型透水铺装系统对径流中 Zn^{2+} 和 Cu^{2+} 的去除率变化趋势,结果见图2。可知,随着降雨重现期的增大,各透水铺装系统对 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 的去除效果均逐渐减弱。原因可能是在短降雨重现期的条件下,进水流量较小,水力停留时间较长,使得透水铺装系统的重金属吸附负荷较低。当降雨重现期增大时,一方面,进水流量也随之增大,水力停留时间缩

短,重金属离子被截留或形成络合物的反应不够充分;另一方面,在进水的强烈冲刷作用下,可能导致这部分不稳定的重金属离子或沉淀物发生解吸而被冲刷出系统,从而使出水重金属浓度升高^[12]。

在不同降雨重现期的条件下,填料替换为RCA的系统D、E对 Zn^{2+} 和 Cu^{2+} 的去除率均高于其他系统。这是因为系统D和E出水仍呈现较高的碱性,更有利于金属离子的沉淀与离子吸附作用^[14],其去除重金属效能优势更明显且随时间变化的趋势较小。将使用RBA的B、C系统与传统透水铺装系统A对照可以发现:重现期为0.5 a时,在前60 min降雨时间段内 Zn^{2+} 的去除效果顺序为 $C>A>B$;随着降

雨历时的增加,最终对 Zn^{2+} 的去除效果顺序为 $B>A>C$;在重现期为2 a时也出现了类似的现象。这说明以RBA作为垫层的系统C,在短时间内对重金属 Zn^{2+} 的控制效果较好,但不适合长历时的降雨条件。出现这种现象的原因可能是与粗砂相比,细小的RBA在初期对重金属的吸附、沉淀、螯合作用较好,但随着降雨持续冲刷,RBA表面不断进行吸附累积导致能够与重金属螯合、吸附、沉淀的位点以及可供交换的离子数量均不断减少。此外,由于重金属与RBA吸附的结合力低于粗砂,RBA在水流作用下发生解吸也可能是长时间降雨条件下重金属去除效果变差的原因之一。

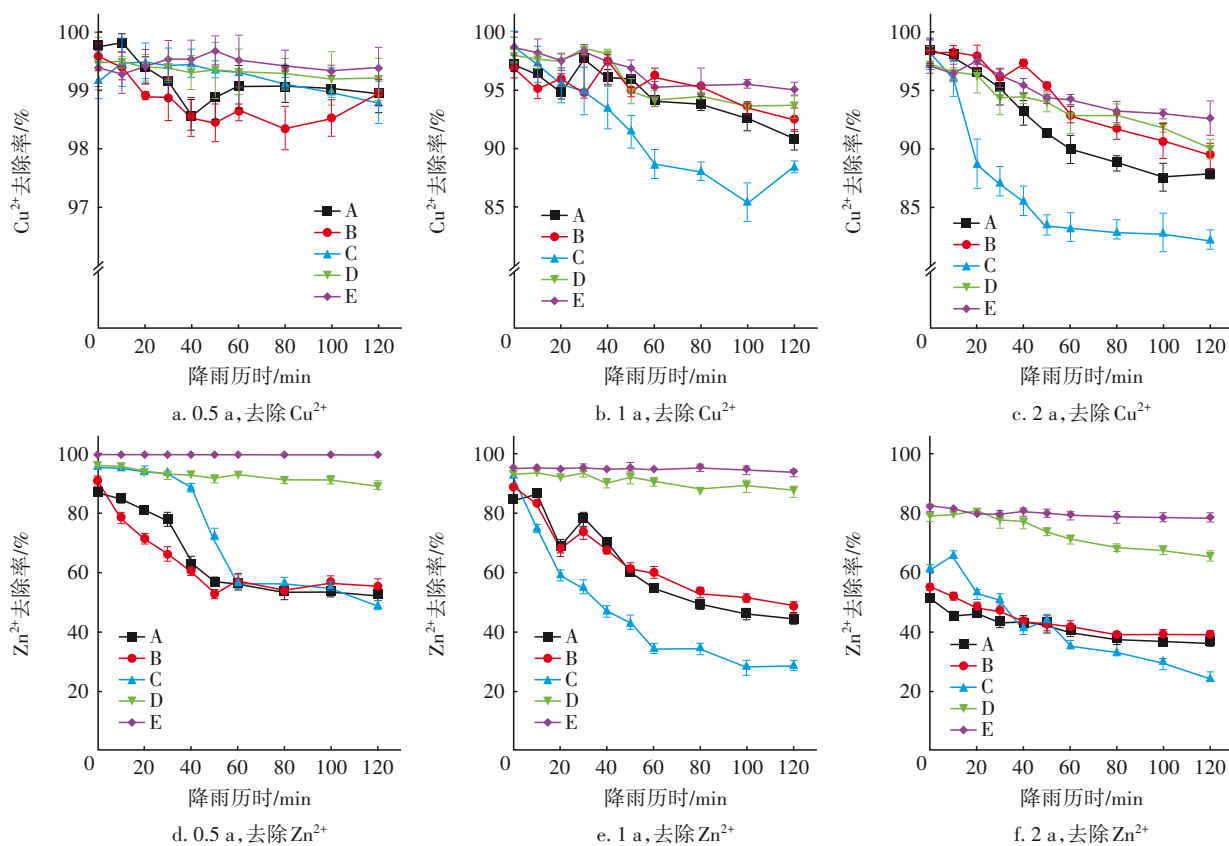


图2 不同降雨重现期下透水铺装系统对 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 的去除率

Fig.2 Removal rates of Zn^{2+} and Cu^{2+} by permeable pavement systems at different rainfall return periods

2.3.4 雨前干燥期对重金属去除效能的影响

在2、4、10 d三种不同雨前干燥期的条件下,研究A、B、C、D、E五种类型透水铺装系统对径流中 Zn^{2+} 和 Cu^{2+} 的去除性能,结果见图3。

由图3可知,与前两个条件实验结果类似,将RCA填充到透水铺装系统的D、E对重金属的去除仍占优势。随着雨前干燥期的增加,各系统对 Zn^{2+}

和 Cu^{2+} 的去除率出现小幅度升高。这可能是因为干燥期越长,系统内部环境变得愈加干燥,已被填料介质吸附的胶体物质或污染物与填料之间的吸附力减弱,导致脱落现象的发生,从而增加了新的吸附位点。但这种物理吸附作用并不被认为是去除重金属的主要方式,因此只对各系统产生了较小影响,去除率得到了小幅提高。当雨前干燥期为2 d

时,填充了RBA的系统B对 Zn^{2+} 和 Cu^{2+} 的去除率均高于传统透水铺装系统A。但随着干燥期的增加,系统B对 Cu^{2+} 的去除效果与系统A相比不再如去除

Zn^{2+} 时占优势,系统A对 Cu^{2+} 的去除率反而优于系统B。这一结果说明在较长的雨前干燥期条件下,碎石比废砖更有利于恢复系统对 Cu^{2+} 的吸附能力。

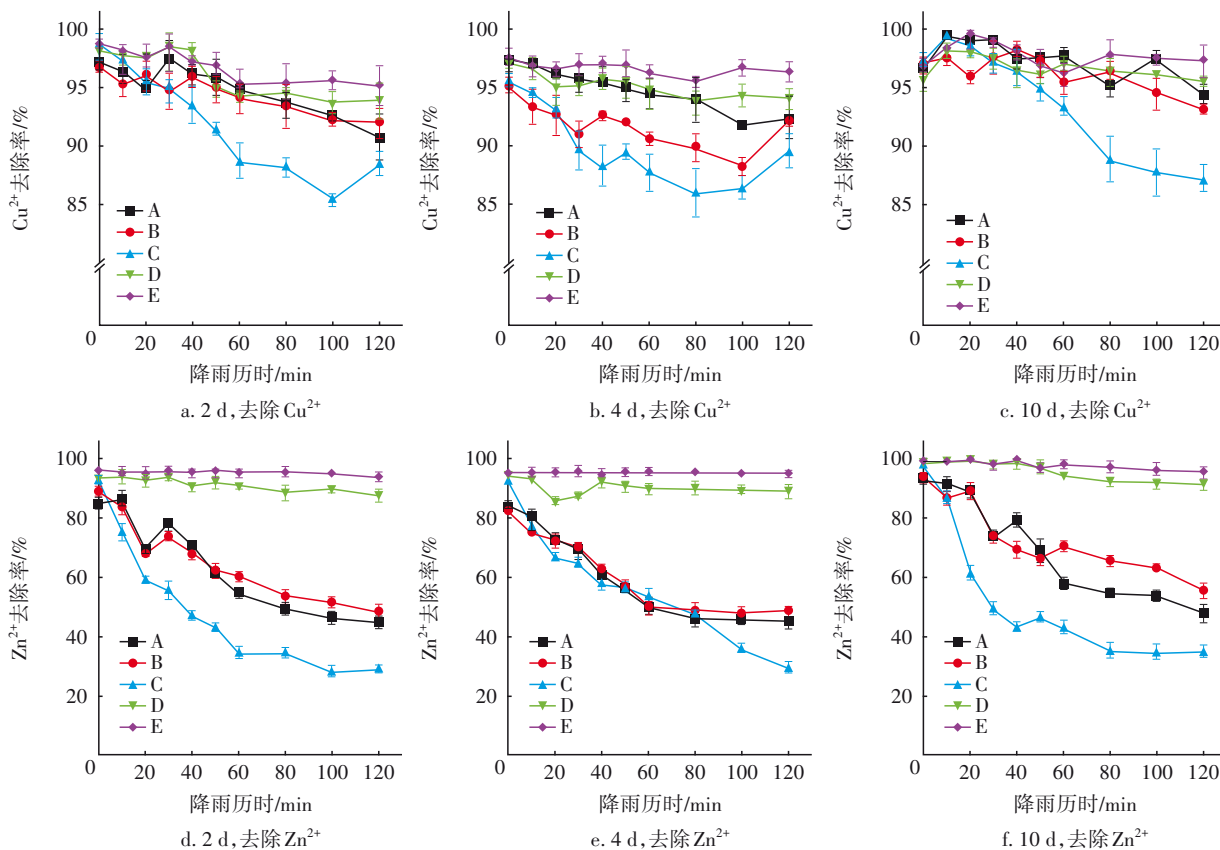


图3 不同雨前干燥期下透水铺装系统对 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 的去除率

Fig.3 Removal rates of Zn^{2+} and Cu^{2+} by permeable pavement systems at different antecedent dry periods

3 结论

① RCA和RBA均具有较大的比表面积与丰富的孔隙结构,这使两者对典型重金属均有较好的吸附效果。静态吸附实验表明两种材料对 Zn^{2+} 和 Cu^{2+} 的吸附符合Langmuir模型,为单分子层吸附。RCA对 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 的平衡吸附量均大于RBA,且与重金属的结合力更强。

② 随进水浓度、降雨重现期的增加,各透水铺装系统对重金属的去除率逐渐降低;而较长的雨前干燥期使各系统的重金属去除率得到了小幅提高。

③ 在相同环境条件下,使用两种再生骨料的系统对 Cu^{2+} 的去除率均明显优于 Zn^{2+} ,且去除效果更不易受环境条件变化影响。

④ RCA作为基层或垫层的透水铺装系统对 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 的去除效果优于其他系统,且在实验过程

中去除效果更稳定;RBA作为基层材料同样有利于对重金属的去除,但作为垫层使用时其重金属去除率低于传统透水铺装系统。

⑤ RCA应用于基层和垫层中均出现系统出水pH显著升高的问题,对自然水体或土壤环境会产生一定的影响。因此为了充分发挥RCA对重金属优秀的吸附能力、推广再生骨料的应用,应针对性探究RCA在透水铺装系统的铺填方式对出水pH的影响,如将RCA铺装至基层,并以更高厚度的垫土层中和、缓冲出水的碱性。或从铺装材料的角度出发,开发能与再生骨料混合使用、具有调节碱度功能的新型铺装材料等也是可开展的研究方向。

参考文献:

- [1] WANG B, YAN L, FU Q, et al. A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate

- concrete [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 171(5): 105565.
- [2] YAN B, HUANG L, YAN L, *et al.* Behavior of flax FRP tube encased recycled aggregate concrete with clay brick aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2017, 136: 265–276.
- [3] 周文娟, 张志伟, 徐玉波. 建筑垃圾再生骨料无机混合料的力学及抗冻性能[J]. 材料导报, 2020, 34(z1): 234–236.
- ZHOU Wenjuan, ZHANG Zhiwei, XU Yubo. Mechanical and frost resistance of inorganic binder stabilized construction waste recycled aggregate [J]. Materials Reports, 2020, 34(z1): 234–236 (in Chinese).
- [4] 崔桢, 任福民, 胡舒馨, 等. 商丘市建筑垃圾及其再生产品环境污染风险评价[J]. 环境工程, 2022, 40(8): 191–196, 149.
- CUI Can, REN Fumin, HU Shuxin, *et al.* Environmental contamination risk analysis of construction waste and its recycled products in Shangqiu [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(8): 191–196, 149 (in Chinese).
- [5] OSTROM T K, DAVIS A P. Evaluation of an enhanced treatment media and permeable pavement base to remove stormwater nitrogen, phosphorus, and metals under simulated rainfall [J]. Water Research, 2019, 166: 115071.
- [6] 王俊岭, 聂练桃, 王雪明, 等. 透水铺装改性基层对典型径流污染物动态除污实验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(34): 347–352.
- WANG Junling, NIE Liantao, WANG Xueming, *et al.* Experimental investigation on dynamic adsorption of typical runoff pollutants on modified permeable pavement base layer [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(34): 347–352 (in Chinese).
- [7] 赵远玲, 王建龙, 李璐菡, 等. 不同类型透水砖对雨水径流流量的控制效果[J]. 环境工程学报, 2020, 14(3): 835–841.
- ZHAO Yuanling, WANG Jianlong, LI Luhan, *et al.* Effect of different types of permeable brick on the stormwater runoff quantity control [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(3): 835–841 (in Chinese).
- [8] 乔冬梅, 庞鸿宾, 齐学斌, 等. pH值对重金属Pb²⁺吸附特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(6): 23–28.
- QIAO Dongmei, PANG Hongbin, QI Xuebin, *et al.* Effect of pH level on adsorption characteristics of Pb²⁺ [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(6): 23–28 (in Chinese).
- [9] MIRANDA L S, AYOKO G A, EGODAWATTA P, *et al.* Adsorption-desorption behavior of heavy metals in aquatic environments: influence of sediment, water and metal ionic properties [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 421: 126743.
- [10] JIN Y, LIU Z, HAN L, *et al.* Synthesis of coal-analcime composite from coal gangue and its adsorption performance on heavy metal ions [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 423: 127027.
- [11] LIN Z Z, CHEN H M, YANG H. Risk of contamination of infiltrated water and underground soil by heavy metals within a ceramic permeable brick paving system [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(18): 22795–22805.
- [12] 乔明晨. 建筑废砖对径流雨水中污染物的控污效能研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2018.
- QIAO Mingchen. Study on the Runoff Pollution Control by Waste Bricks [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2018 (in Chinese).
- [13] 易文涛. 沸石填料人工湿地去除雨水径流重金属污染的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- YI Wentao. Research on Heavy Metal Removal from Stormwater Runoff in Constructed Wetlands with Media of Zeolite [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015 (in Chinese).
- [14] 梁艳, 卢燕南, 唐艳葵, 等. 多组分重金属复合体系在高岭土中的吸附差异[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2021, 46(1): 173–181.
- LIANG Yan, LU Yannan, TANG Yankui, *et al.* Adsorption of heavy metals in multimetal systems on kaolinite clay [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2021, 46(1): 173–181 (in Chinese).

作者简介:曹汉鹏(1997–),男,天津人,硕士研究生,主要研究方向为城市水环境科学与系统工程。

E-mail: caohp2022@163.com

收稿日期:2022-09-22

修回日期:2022-11-13

(编辑:沈靖怡)