

黄聰, 李金, 沈晓荣, 等. 雨水渗透设施对屋面径流污染控制效果[J]. 净水技术, 2023, 42(3):151-157.

HUANG C, LI J, SHEN X R, et al. Effect of stormwater infiltration equipments on roof runoff pollution control[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(3):151-157.

## 雨水渗透设施对屋面径流污染控制效果

黄聰<sup>1</sup>, 李金<sup>1</sup>, 沈晓荣<sup>1</sup>, 孙浩铭<sup>2,\*</sup>, 卢雯霖<sup>2</sup>, 冯晓楠<sup>2</sup>

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江杭州 311100; 2. 华中科技大学环境科学与工程学院, 湖北武汉 430070)

**摘要** 通过研究优化雨水渗透设施的填料配比, 探究其对屋面雨水径流量以及径流污染的控制效果。结果表明, 当雨水渗透设施采用 30% 粗砂+60% 中粗砂+10% 细砂作为主填料, 搭配 30% 炼钢炉渣+70% 沸石的副填料时, 降雨强度取重现期为 2 a 时, 其削减径流峰值和延后洪峰时间的效果可分别达到 15% 和 220 s; 优化设计后的雨水渗透设施对 COD<sub>Cr</sub> 和 TN 的去除效果分别为 30%~40% 和 20%~25%, 对 TP、氨氮和 SS 的去除效果较好, 分别可达 85%~95%、90%~95% 和 85%~95%。

**关键词** 雨水渗透设施 炼钢炉渣 径流控制 填料配比 屋面雨水

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2023)03-0151-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.03.019

## Effect of Stormwater Infiltration Equipments on Roof Runoff Pollution Control

HUANG Cong<sup>1</sup>, LI Jin<sup>1</sup>, SHEN Xiaorong<sup>1</sup>, SUN Haoming<sup>2,\*</sup>, LU Wenlin<sup>2</sup>, FENG Xiaonan<sup>2</sup>

(1. PowerChina Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311100, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract** The control effects on roof stormwater runoff and runoff pollution was studied by optimizing the packing ratio of stormwater infiltration equipment. The results showed that when the rainfall return period was 2 a, the infiltration equipment could reduce the runoff peak by 15% and delay flood peak time for 220 s under the condition of 30% coarse sand, 60% medium coarse sand, 10% fine sand as main packing and 30% steelmaking slag, 70% zeolite as auxiliary packing. The removal efficiency of COD<sub>Cr</sub> and TN in the optimized stormwater infiltration equipment was 30%~40% and 20%~25%, respectively. The removal efficiency of TP, ammonia nitrogen and SS was more prominent, reaching 85%~95%, 90%~95% and 85%~95%, respectively.

**Keywords** stormwater infiltration equipment steelmaking slag runoff control packing materials ratio roof rainwater

屋面占城市不透水下垫面的比例较大, 它是承接大气干湿沉降的主要载体, 再加上屋面材料自身腐蚀产物<sup>[1]</sup>, 使得屋面径流成为一种潜在的面源污染<sup>[2-5]</sup>。低影响开发 (LID) 采用分散的小规模措施<sup>[6]</sup>从源头上对径流进行调控, 通过入渗、滞留等方法, 控制整个区域的外排量, 减少径流污染、削减洪峰, 达到保持城市化前后水文特征基本不变的目的<sup>[7]</sup>。雨水渗透设施作为 LID 设施的一种, 强化对

屋面径流量的控制和水质的净化, 有利于控制洪峰和削减污染, 保护水体水质安全。

国内外研究设计的雨水渗透设施采用的填料可分为天然材料、废弃材料以及人工材料 3 类。天然材料包括沸石、石英砂、木料等; 废弃材料包括煤灰渣、炉渣和蟹壳等, 其中炉渣有多种, 如炼钢炉渣、炼铜炉渣和炼铁炉渣等; 人工材料包括纤维膜、活性炭、氢氧化铁颗粒和零价铁等。由于废弃物资源化利用成为研究热点, 研究人员<sup>[8-11]</sup>对利用高炉渣去除废水中的污染进行探究, 发现其在吸附废水中常规污染物、金属离子或稀土元素方面存在可行性, 但将高炉渣作为雨水渗透设施填料进行关键参数优化的研究仍非常匮乏。本研究将优化雨水渗透设施填

[收稿日期] 2022-02-28

[作者简介] 黄聰(1966—), 男, 正高级工程师, 研究方向为海绵城市建设工程, E-mail: huang\_c@hdec.com。

[通信作者] 孙浩铭, 男, 硕士, 主要从事海绵城市建设工程, E-mail: shm2021@hust.edu.cn。

料,探究粗砂、沸石和炼钢炉渣配比,对屋面雨水径流量和水质控制效果进行探究,得出一种雨水渗透设施填料的最佳配比方案。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

雨水渗透设施采用圆柱形滤柱装置,如图 1 所示。装置从上到下依次为蓄水层、种植土壤层、主填料层(从上至下由细砂、中粗砂、粗砂组成)、副填料层(从上至下由沸石、炼钢炉渣组成)、排水层、种植土壤层与主填料层、主填料层与副填料层、副填料层与排水层间均用透水土工布(市场常见的无纺土工布)隔开,防止填料进入排水层造成堵塞,并且土工布对于污染控制有一定的作用。但由于其每层厚度只有 2 mm 左右,总厚度不超过 10 mm,对污染物的截留量较小,可不作考虑<sup>[12]</sup>,出水口与溢流口分别设于装置的底部与顶部。滤柱内径为 20 cm,总高为 130 cm。其中,蓄水层高为 15 cm;种植土层高为 10 cm,采用砂质土壤,具有透水性能好、渗水速度快的特点;选择砂作为主填料,高为 80 cm,沸石、炼钢炉渣为副填料位于砂主填料下层,高为 10 cm。在滤柱底部,为填充砾石的排水层,高为 15 cm。试验采用蠕动泵控制进水流量,模拟实际降雨。

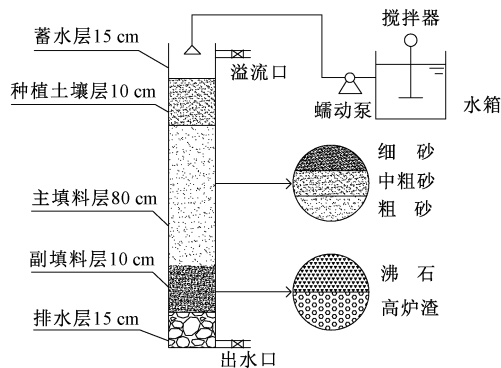


图 1 雨水渗透设施

Fig. 1 Storm Water Infiltration Equipment

### 1.2 填料配比设计

主填料层采用 6 种不同级配填充至滤柱中,具体级配如表 1 所示,其中粗砂粒径为 1~2 mm,中粗砂粒径为 0.5~1.0 mm,细砂粒径为 0.1~0.5 mm。每个滤柱中砂的高度为 800 mm,沸石、炼钢炉渣的高度共 100 mm。副填料层采用 3 种不同配比,具体配比方案如表 2 所示,沸石粒径为 3~5 mm,高炉渣粒径为 2~4 mm。表 1 中的填料百分比皆为体

积比。

表 1 主填料级配

Tab. 1 Coarse Sand Grading of Main Packings

级配分类	级配情况		
	粗砂	中粗砂	细砂
J1	70%	20%	10%
J2	70%	10%	20%
J3	50%	40%	10%
J4	50%	10%	40%
J5	30%	60%	10%
J6	30%	50%	20%

表 2 副填料配比方案

Tab. 2 Proportioning Scheme of the Secondary Packings

方案	沸石:高炉渣
1	70%:30%
2	50%:50%
3	30%:70%

### 1.3 模拟进水水量

装置滤柱直径为 20 cm,滤柱表面积为 0.031 4 m<sup>2</sup>。假设雨水渗透装置只接纳直接降雨量以及屋面径流量,直接降雨接纳面积为装置自身面积,服务面积为自身装置面积的 15 倍,即接纳屋面雨水径流面积为 0.417 m<sup>2</sup>。试验降雨量设计考虑两类工况:第一类工况选取不同年径流总量控制率对应的设计降雨量;第二类工况选取不同重现期所对应的设计降雨量。在海绵城市建设考核指标中,大部分地区的年径流总量控制率要求都在 70% 以上,本次试验拟选择年径流总量控制率为 75%、85% 以及重现期为 2、30 a,分别对应降雨强度为 21.3、30.9、46.65、86.40 mm/h,分别对应进水量为 8.70、12.62、19.17、35.51 L。进水方式按照芝加哥雨型,单次试验进水时间为 60 min,通过调整蠕动泵控制每分钟进水量,整个过程均符合芝加哥雨型,更符合实际工程情况。

### 1.4 模拟进水水质

根据对浙江宁波地区屋面径流水质的分析<sup>[13]</sup>,本研究设计了低浓度、高浓度两种不同的屋面径流污染物浓度,采用相应药品配制模拟降雨及屋面径流雨水。COD<sub>Cr</sub> 采用邻苯二甲酸氢钾配制,氨氮采用氯化铵配制,TN 采用氯化铵与硝酸钾配制,TP 采用磷酸二氢钾配制,SS 采用道路浮土,经研磨后过

200 目的筛网,再经烘干称量后加入水中配制。进水污染物质量浓度如表 3 所示。

表 3 进水污染物质量浓度

Tab. 3 Contaminant Mass Concentration of Influent

项目	COD <sub>Cr</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	TP/(mg·L <sup>-1</sup> )	TN/(mg·L <sup>-1</sup> )	氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	SS/(mg·L <sup>-1</sup> )
直接降雨	25	0.1	2.5	1	/
屋面径流	高浓度	100	10	4	150
	低浓度	50	0.2	5	100

### 1.5 采样与检测方法

在装置出流后每 1 min 记录一次出水量,并且每 10 min 采集出水样品。测定指标包括 COD<sub>Cr</sub>、氨氮、TN、TP 和 SS。检测方法采用国家标准测试方法。

雨水渗透设施对降雨径流污染控制采用的是污染物总量削减率进行评价,实际降雨采样数据为离散点,出水并非整体收集。因此,对污染物浓度采用事件平均浓度(EMC)表示,相关计算方法如式(1)~式(3)。洪峰峰值削减率、洪峰延后时间如式(4)~式(5)。

$$C_{EMC_{in}} = \frac{M_{in}}{V_{in}} \approx \frac{\sum C_{inj} V_{inj}}{V_{in}} \quad (1)$$

$$C_{EMC_{out}} = \frac{M_{out}}{V_{out}} \approx \frac{\sum C_{outj} V_{outj}}{V_{out}} \quad (2)$$

$$R_L = \frac{C_{EMC_{in}} \times V_{in} - EMC_{out} \times V_{out}}{C_{EMC_{in}} \times V_{in}} \times 100\% \quad (3)$$

其中: $M_{in}$ ——进水污染物总质量浓度,mg/L;  
 $M_{out}$ ——出水污染物总质量浓度,mg/L;  
 $V_{out}$ ——出水总径流量,m<sup>3</sup>;  
 $V_{in}$ ——进水总径流量,m<sup>3</sup>;  
 $C_{EMC_{in}}$ ——进水平均质量浓度,mg/L;  
 $C_{EMC_{out}}$ ——出水平均质量浓度,mg/L;  
 $C_{inj}$ ——采样间隔段内进水的污染物质量浓度,mg/L;  
 $V_{inj}$ ——采样间隔段内进水的径流量,m<sup>3</sup>;  
 $C_{outj}$ ——采样间隔段内出水的污染物质量浓度,mg/L;  
 $V_{outj}$ ——采样间隔段内出水的径流量,m<sup>3</sup>;  
 $R_L$ ——污染物总量削减率。

$$X = \frac{P-C}{P} \times 100\% \quad (4)$$

其中: $X$ ——洪峰峰值削减率;

$P$ ——单次降雨峰值,L/s;

$C$ ——单次降雨产流量峰值,L/s。

$$Y = T_p - T_c \quad (5)$$

其中: $Y$ ——洪峰延后时间,s;

$T_p$ ——单次降雨产流量峰值时间,s;

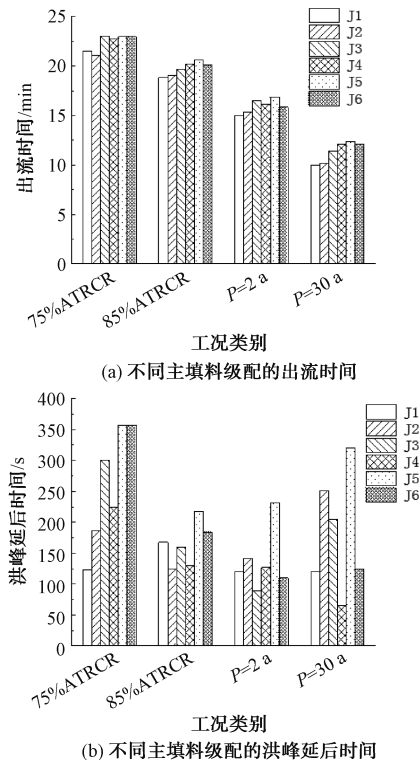
$T_c$ ——单次降雨峰值时间,s。

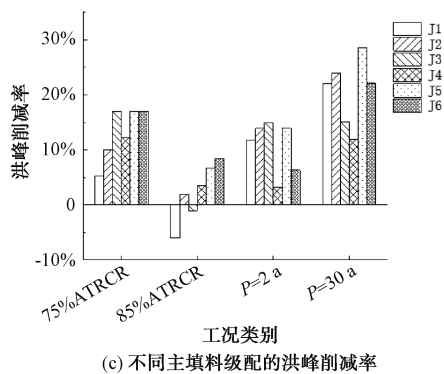
## 2 结果与讨论

### 2.1 主填料级配对雨水径流量控制效果分析

不同降雨工况下,降雨历时为 60 min,各级配主填料的出流时间、洪峰延后时间和洪峰峰值削减率变化,如图 2 所示。

由图 2 可知,级配 J5 的雨水径流量控制效果最好,相应最好的水量控制指标:产流时间为 22.95 min,洪峰延后时间为 357 s,洪峰峰值削减率





注: ATRCR 为径流总量控制率,  $P$  为重现期, 下同。  
图 2 不同降雨工况下各级配主填料对雨水径流量的控制变化

Fig. 2 Control Changes of Graded Main Packings on Rainwater Runoff under Different Rainfall Conditions

为 28.5%; 对比 J5 与 J1, 当粗砂占比较高时, 填料孔隙率增加, 雨水下渗速率快, 对雨水径流量的控制能力减弱, 产流时间最大减少了 140 s, 洪峰延后时间最大减少了 234 s, 洪峰峰值削减率最大降低了 12.7%。对比 J2 与 J4, 当减少粗砂占比, 提高细砂占比时, 在中小降雨强度条件下, 装置对雨水径流量的控制效果变化较小, 在高强度降雨条件下, J4 对雨水径流量的控制效果明显下降, 洪峰延后时间最大减少了 186 s, 洪峰峰值削减率最大降低了 11.9%。说明在高强度降雨条件下, 提高细砂占比并不能提高装置对径流量的控制能力, 原因是当降雨强度较大时, 径流量快速聚集在装置表面形成积水, 不能及时下渗, 装置对雨水径流量的控制效果下降。对比 J3 与 J4, 当减少粗砂占比后, 提高中粗砂占比对雨水径流量的控制效果较提高细砂占比更优。洪峰延后时间最大增加了 139 s, 洪峰峰值削减率最大提高了 11.8%。这是由于中粗砂在整个主填料的中间层, 相对细砂, 中粗砂孔隙率更大, 对雨水的积蓄效果更好, 相对于粗砂, 孔隙率较小, 对雨水的滞留效果更好, 对雨水径流量的控制效果比较好。综上, 从实际工程出发, 当产流开始时间较晚, 洪峰延后时间较晚, 洪峰峰值削减率较高时, 对雨水径流量控制效果更好, 所以 J1 ~ J6 级配中, J5 的效果最好, 即粗砂高为 24 cm, 中粗砂高为 48 cm, 细砂高为 8 cm。

## 2.2 雨水渗透设施对雨水控制效果分析

经 2.1 小节分析后选出 J5 作为主填料级配方案, 搭配副填料方案 1、2、3 分别组成装置 A、B、C,

对比分析 3 个装置对雨水径流量和雨水径流污染物的控制效果。进水水量的工况与 1.3 小节一致, 进水水质工况与 1.4 小节一致, 分别由 4 种水量和 2 种水质组合成共 8 种工况进行试验。

### 2.2.1 雨水渗透设施对雨水径流量控制的效果分析

雨水渗透设施对雨水径流量控制效果如图 3 所示。水量指标主要从流出时间、洪峰延后时间、洪峰削减率 3 方面评价。由图 3 可知, 污染物浓度的变化对装置的雨水径流量控制效果影响较小; 降雨强度的变化对装置雨水径流量的控制效果有较大的影响, 其中年径流总量控制率为 85% 降雨工况下, 其洪峰延后时间为 201 s, 洪峰峰值削减率为 5.7%, 与重现期为 30 a 降雨工况对比下, 前者比后者在洪峰延后时间减少了 117 s, 洪峰峰值削减率降低了 31.9%。结果表明, 在中小降雨强度下, 装置对雨水径流量的控制能力随着降雨强度的增加而减弱; 在高降雨强度下, 装置对雨水径流量的控制能力随着降雨强度的增加而增加。原因可能是在中小降雨强度下不产生溢流时, 控制能力随着径流量增加时会减弱, 而当降雨强度过大时, 会产生溢流, 随着径流量的增加, 造成进入装置的径流量也在增加, 控制能力也会增加。但不同装置对雨水径流控制效果差别不大, 对比 2.1 小节中 J5 的结果, 说明主填料与副填料共同对雨水径流量的控制效果与单独主填料的效果无明显差别, 说明装置对雨水径流量的控制主要受主填料影响, 副填料对其影响较小。

### 2.2.2 雨水渗透设施对雨水径流污染物控制效果分析

雨水渗透设施装置在不同降雨强度和不同污染物浓度下对雨水径流污染物的控制效果如图 4 所示, 其中 L 代表低浓度进水, H 代表高浓度进水。

雨水渗透设施对  $\text{COD}_c$ 、TN、和氨氮 3 种污染物的总量削减率总体呈现随着径流量的增加, 总量削减率有所降低。原因是随着径流量的增加, 雨水下渗速率增加, 与填料的接触时间减少, 污染物总量削减率降低。由于填料的吸附能力是一定的, 随着径流污染物浓度的增加, 污染总量削减率在降低。但装置在高浓度进水时对 SS 的总量削减率比低浓度进水更高, 高浓度进水时, SS 的总量削减率在 95% 以上, 而低浓度进水时, SS 的总量削减率在 85% ~

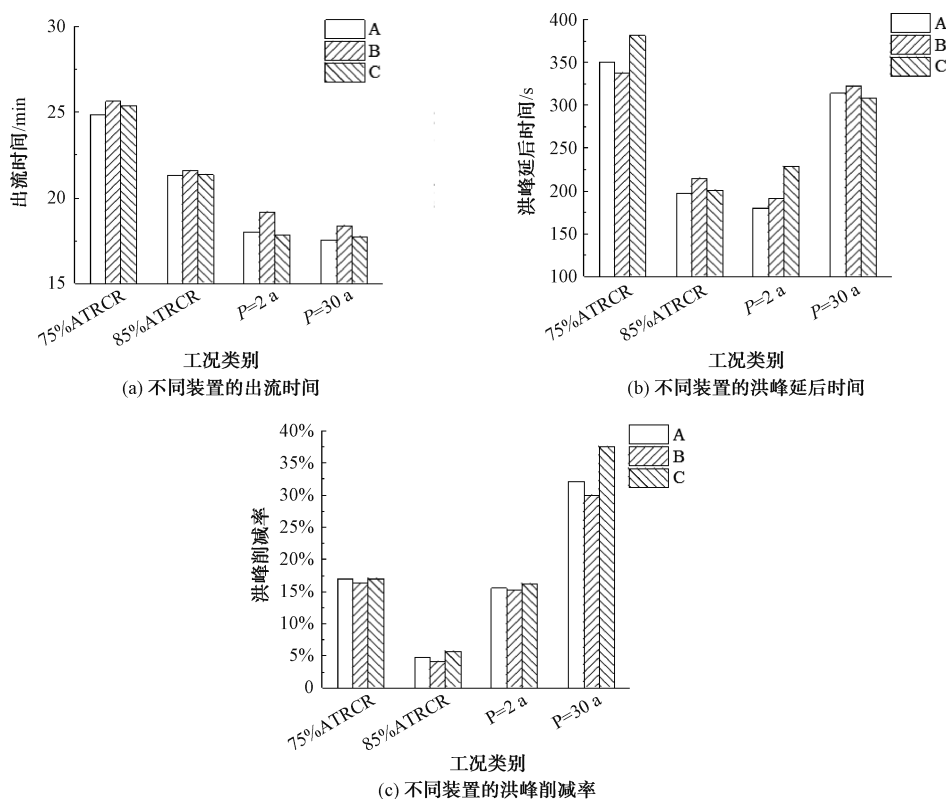


图3 雨水渗透设施在4种工况下对雨水径流量控制效果

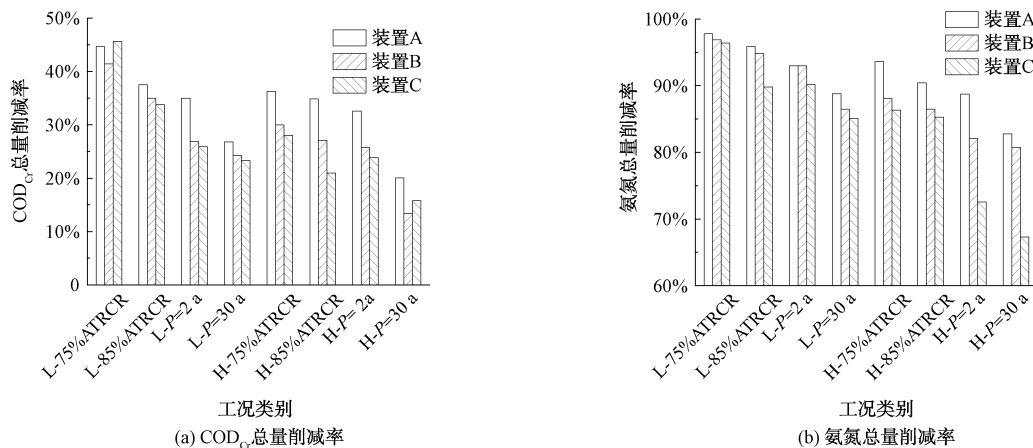
Fig. 3 Effect of Infiltration Facilities on Rainwater Runoff Control under Four Working Conditions

90%,原因可能是高浓度的SS更有利于填料对其进行过滤及吸附。不同装置对 $COD_{Cr}$ 、TN的总量削减率在20%~50%、5%~25%,对SS、氨氮和TP的总量削减率均能达到85%以上,甚至95%;这说明沸石和炼钢炉渣分别对氨氮和TP有吸附效果,但对 $COD_{Cr}$ 和 $NO_3-N$ 几乎没有吸附效果,这与已有研究得出结论<sup>[14-18]</sup>一致。而将炼钢炉渣应用于吸附径流污染物的研究较少,在各类高炉渣中,不同类别炉渣的吸附能力差别较大<sup>[19-21]</sup>。综上,经过试验可

知,炼钢炉渣和沸石作为雨水渗透设施的填料对氨氮和TP的吸附效果显著,既实现了废物利用、降低成本,又实现了对屋面雨水径流的控制。

### 3 结论

- (1)雨水渗透装置对屋面雨水径流量和径流污染均具有较好的控制效果。
- (2)不同的主填料级配对雨水径流量的控制效果不同,当主填料体积分数取粗砂:中粗砂:细砂=3:6:1时,在4种不同的降雨工况下,其控制效果均



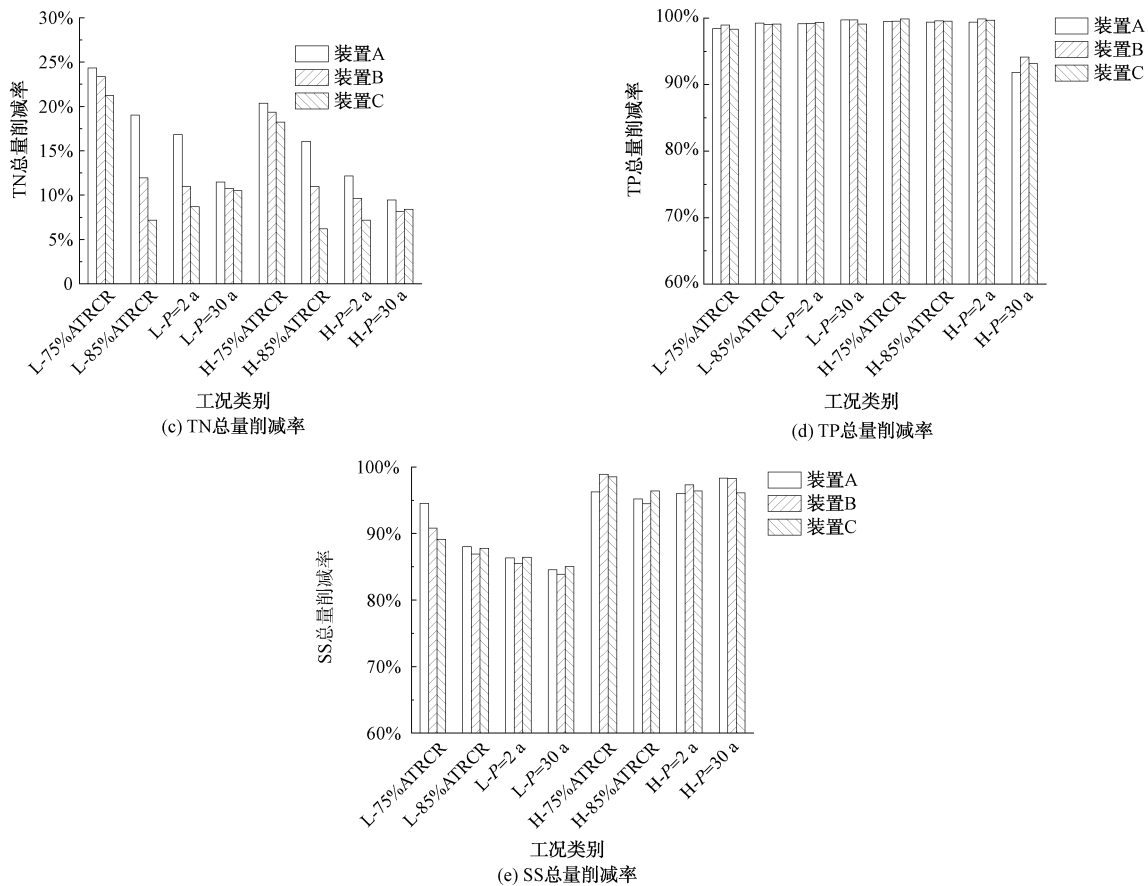


图 4 渗透设施对雨水径流污染物削减效果

Fig. 4 Effect of Infiltration Facilities on Pollutants Reduction in Storm Water Runoff

能达到最好。

(3)主填料与副填料一起填入装置后,对比主填料单独作用,对雨水径流量的控制效果变化不大,装置对径流量的控制能力主要在主填料层。

(4)装置中的填料对  $COD_{Cr}$ 、TN 的总量削减率在 20%~50%、5%~25%,对 SS、氨氮、TP 的总量削减率均能达到 85%以上。采用炼钢炉渣和沸石分别对去除雨水径流污染物中的 TP 和氨氮有明显的效果,并且当装置中副填料体积分数取沸石:高炉渣=7:3时,在 4 种不同的降雨工况下,对雨水径流污染物的控制效果较好。

### 参考文献

[ 1 ] 王和意,刘敏,刘华林,等. 城市降雨屋面径流污染分析和  
管理控制[J]. 长江流域资源与环境, 2005(3): 367-371.  
WANG H Y, LIU M, LIU H L, et al. Primary research on  
pollution of urban roof runoff[J]. Resources and Environment in  
the Yangtze Basin, 2005(3): 367-371.

[ 2 ] 刘守城,何兆芳,张烨,等. 屋面雨水径流水质特性研究  
[J]. 环境科技, 2012, 25(6): 28-31.  
LIU S C, HE Z F, ZHANG Y, et al. Characteristics of the roof  
runoff water quality[J]. Environmental Science and Technology,  
2012, 25(6): 28-31.  
[ 3 ] 许润,高泉祀,康建雄,等. 屋面雨水水质及其收集回用技  
术分析[J]. 净水技术, 2019, 38(8): 124-129.  
XU R, GAO Q S, KANG J X, et al. Analysis of water quality,  
collection and reuse technology for roof rainwater[J]. Water  
Purification Technology, 2019, 38(8): 124-129.  
[ 4 ] 蔡倩.《城镇水务 2035 年行业发展规划纲要》解读[J]. 净  
水技术, 2021, 40(6): 1-5.  
CAI Q. Interpretation of Outline of Industry Development Plan for  
Urban Water Affairs in 2035[J]. Water Purification Technology,  
2021, 40(6): 1-5.  
[ 5 ] 赵宁睿. 城市面源污染负荷计算与防控措施探讨——以昆  
明为例[J]. 净水技术, 2021, 40(s2): 71-75.  
ZHAO N R. Discussion on urban surface pollution load  
calculation and prevention and control measures——Case of  
Kunming[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(s2):  
71-75.

- [ 6 ] 李亚娇, 徐毓江, 李家科. 低影响开发单项设施模拟模型研究与应用进展[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(5): 135-141.  
LI Y J, XU Y J, LI J K. Advance in simulation model research and application for single facility of low impact development[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(5): 135-141.
- [ 7 ] 张曼, 周可可, 张婷, 等. 城市典型 LID 措施水文效应及雨洪控制效果分析[J]. 水力发电学报, 2019, 38(5): 57-71.  
ZHANG M, ZHOU K K, ZHANG T, et al. Hydrological responses and stormwater control effects of typical urban LID measures[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(5): 57-71.
- [ 8 ] 王亚丽, 杨宁, 崔素萍, 等. 高炉渣对废水中  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附率和吸附行为[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(2): 186-193.  
WANG Y L, YANG N, CUI S P, et al. Adsorption rate and behavior of  $\text{Cu}^{2+}$  in wastewater from blast furnace slag [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2021, 47(2): 186-193.
- [ 9 ] 陶茂林, 何志兰, 杨敬一, 等. 高炉渣制备 Ca-Mg-Al 类水滑石吸附水中 Cr(VI)[J]. 水处理技术, 2020, 46(3): 66-70, 75.  
TAO M L, HE Z L, YANG J Y, et al. Adsorption of Cr(VI) from aqueous solution on Ca/Mg/Al hydrotalcite prepared by blast furnace slag[J]. Technology of Water Treatment, 2020, 46(3): 66-70, 75.
- [ 10 ] 周夏芝. 高炉渣改性及其吸附  $\text{La}^{3+}/\text{Ce}^{3+}$  性能研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2019.  
ZHOU X Z. Study on the adsorption properties of  $\text{La}^{3+}/\text{Ce}^{3+}$  for blast furnace slag with modification [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2019.
- [ 11 ] 翟祖峰. 镧改性高炉渣对水中污染物的吸附性能研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.  
ZHAI Z F. Study on adsorption of contaminants from water by using lanthanum modified blastfurnace slag [D]. Zhenzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2019.
- [ 12 ] 陈望, 陈莹, 赵剑强, 等. 雨水斗截污装置对屋面初期雨水净化规律及关键参数设计[J]. 环境工程学报, 2020, 14(7): 1799-1807.  
CHEN W, CHEN Y, ZHAO J Q, et al. Purifying rule and key parameters design of the interception device of rainwater funnel treating initial roof rainwater runoff [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(7): 1799-1807.
- [ 13 ] 徐宇婕, 龚玥敏, 毕学鹏, 等. 宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析[J]. 环境科学, 2020, 41(7): 3275-3284.  
XU Y J, GONG Y M, BI J P, et al. Analysis of rainwater runoff pollution characteristics of various typical underlying surfaces in Ningbo [J]. Environmental Science, 2020, 41(7): 3275-3284.
- [ 14 ] 盘贤豪. 天然及改性沸石吸附水中氨氮的实验研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2020.  
PAN X H. Experimental study on adsorption of ammonia nitrogen in water by natural and modified zeolite [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2020.
- [ 15 ] 鲁秀国, 盘贤豪, 郑宇佳. 改性及天然沸石对水中氨氮吸附性能的研究[J]. 离子交换与吸附, 2020, 36(6): 520-529.  
LU X G, PAN X H, ZHENG Y J. Study on adsorption performance of modified and natural zeolite on ammonia nitrogen in water [J]. Ion Exchange and Adsorption, 2020, 36(6): 520-529.
- [ 16 ] 蒋艳红. 高炉渣吸附性能研究[D]. 南宁: 广西大学, 2006.  
JIANG Y H. Study on the adsorption characteristics of blast-furnace slag [D]. Nanning: Guangxi University, 2006.
- [ 17 ] 王文姣, 庄钊, 白瑞钦, 等. 四氧化三铁 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) 磁性复合材料在废水处理中的研究进展[J]. 胶体与聚合物, 2020, 38(4): 186-190.  
WANG W J, ZHUANG Z, BAI R Q, et al. Research progress of ferromagnetic oxide ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) magnetic composite materials in wastewater treatment [J]. Chinese Journal of Colloid & Polymer, 2020, 38(4): 186-190.
- [ 18 ] 胡小莲. 磁性纳米四氧化三铁及其复合材料吸附磷性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.  
HU X L. The study on adsorption removal of phosphate using iron oxide nanoparticles and their composites [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [ 19 ] 王华国. 燃煤炉渣理化特性及用于污水处理的可行性研究[J]. 能源与节能, 2021(7): 105-106.  
WANG H G. Study on physical and chemical properties of coal-fired slag and its feasibility for sewage treatment [J]. Energy and Energy Conservation, 2021(7): 105-106.
- [ 20 ] 黄理辉, 张波, 毕学军, 等. 高炉渣除磷试验研究[J]. 净水技术, 2004(3): 9-11.  
HUANG L H, ZHANG B, BI X J, et al. Study on phosphorus removal using blast furnace slags [J]. Water Purification Technology, 2004(3): 9-11.
- [ 21 ] 王应军, 伍钧, 张俊萍, 等. 高炉渣对磷的吸附特性[J]. 四川农业大学学报, 2010, 28(3): 351-355.  
WANG Y J, WU J, ZHANG J P, et al. Adsorption characteristics of blast furnace slag to phosphorus [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2010, 28(3): 351-355.