

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力

李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年12月

第42卷 第12期
Vol.42 No.12

目次(卷终)

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力	李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培 (5563)
汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策	王海林, 杨涛, 聂磊, 方莉, 张中申, 郝郑平 (5574)
西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单	高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 林宇, 杨益 (5585)
新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析	陈军辉, 冯小琼, 李媛, 王书肖 (5594)
基于 iLME + Geoi-RF 模型的四川省 PM _{2.5} 浓度估算	吴宇宏, 杜宁, 王莉, 蔡宏, 周彬, 吴磊, 敖迪 (5602)
《大气污染防治行动计划》后期成都大气 PM _{2.5} 中水溶性无机离子特征	李佳琪, 张军科, 董贵明, 邓嘉琳, 刘子锐, 王跃思 (5616)
洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析	孙佳侯, 董喆, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹 (5624)
北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素	曹阳, 安欣欣, 刘保献, 景宽, 王琴, 罗霄旭 (5633)
天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析	王艺璇, 刘保双, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂 (5644)
沈阳市挥发性有机物污染特征及反应活性	杜寒冰, 王男, 任万辉, 苏枞枞, 胡建林, 于兴娜 (5656)
典型化工集中区环境空气 SVOCs 污染特征及来源解析	葛祥, 吴健, 高松, 冯加良, 陈俊伟, 张舒惟, 焦正 (5663)
南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估	张子金, 林煜棋, 张煜烟, 曹梦瑶, 章炎麟 (5673)
基于排放清单和实地测试的工业 VOCs 排放特征: 以郑州市高新区为例	任何, 卢轩, 刘洋, 尹沙沙, 胡鹤霄 (5687)
我国水性建筑涂料 VOCs 排放特征及其环境影响	高美平, 王海林, 刘文文, 聂磊, 李国昊, 安小栓 (5698)
VOCs 源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析	王峰, 汪健伟, 杨宁, 翟菁, 侯灿 (5713)
山东省 O ₃ 时空分布及影响因素分析	张森, 丁椿, 李彦, 王桂霞, 林晶晶, 孟赫, 许杨 (5723)
2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性	钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王成辉, 李英杰, 王波, 刘政 (5736)
基于高分辨率在线测量的轻型汽油车含氧挥发性有机物排放模型构建	郝钰琦, 袁自冰, 王梦雷, 沙青娥, 杜新悦, 刘元向, 刘学辉, 段乐君, 袁斌, 郑君瑜, 邵敏, 闫宇 (5747)
三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析	张凯, 吴凤平, 成长春 (5757)
长江流域总氮排放量预测	丁肇慰, 郑华 (5768)
1980~2015 年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征	姚梦雅, 胡敏鹏, 陈丁江 (5777)
黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布	韩谔, 潘保柱, 陈越, 刘亚平, 侯易明 (5786)
基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源	邢子康, 余钟波, 衣鹏, 钱睿智, 王嘉毅 (5796)
水源水库真核微生物种群结构季相演替特征	张海涵, 黄鑫, 黄廷林, 刘凯文, 马曼丽, 刘祥, 苗雨甜, 宗容容 (5804)
达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异	李文宝, 郭鑫, 张博尧, 杜蕾, 田雅楠 (5814)
尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制	王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞 (5826)
武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估	张坤峰, 付青, 涂响, 昌盛, 樊月婷, 孙兴滨, 王山军 (5836)
上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系	徐慕, 李世豪, 马巾, 王丽卿, 张玮 (5848)
曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素	李琳琳, 李荣涛, 孔维静, 杨苹果, 杜志超, 毕斌, 卢少勇 (5857)
水平潜流人工湿地对畜禽养殖废水中特征污染物的去除	赵伟, 范增增, 杨新萍 (5865)
木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水滞留改良影响	孟依柯, 王媛, 汪传跃, 王报 (5876)
黑臭河道中聚乙烯醇/海藻酸钠固定微米沸石粉去除氨氮	魏超, 陈涛, 江桥, 王姝, 邱伟建, 成小英 (5884)
玉米秸秆生物炭对灰钙土吸附金霉素的影响	南志江, 蒋煜峰, 毛欢欢, 梁新茹, 邓雪儒 (5896)
饮用水砂滤池中微生物对微量污染物的降解潜力与途径	周洁, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (5905)
污水分析方法监测城市毒品滥用长期趋势	曹禹, 董小棠, 邵雪婷, 刘琳, 王德高 (5912)
阿奇霉素和铜对活性污泥古菌群落和 ARGs 的胁迫影响及后效应	高玉玺, 李星, 赵君如, 张忠兴, 樊晓燕 (5921)
典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	李强, 曹莹, 何连生, 王耀峰, 龚成, 何书涵 (5930)
我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价	王耀峰, 何连生, 姜登岭, 曹莹, 李强, 官健 (5938)
浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险	王敏, 董佳琦, 白龙龙, 张勇, 蒋仲龙, 姜雯雯, 吴家森, 张璐瑶, 方嘉, 傅伟军 (5949)
北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探	管伟豆, 郭堤, 王萍, 张增强, 李荣华 (5958)
典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价	强瑞, 李英菊, 罗谦, 陈美凤, 李海燕, 黄先飞, 秦樊鑫 (5967)
雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应	周亚龙, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟, 杨志斌 (5977)
铜仁土壤-水稻重金属累积效应与安全种植区划	朱亮亮, 吴勇, 周浪, 唐乐斌, 宋波 (5988)
干湿交替对铈锰改性生物炭固定红壤 As 的影响	黄晓雅, 李莲芳, 朱昌雄, 黄金丽, 吴翠霞, 叶婧 (5997)
铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除	王冰清, 阳琴, 李虹颖, 熊启中, 徐刚, 孙瑞波, 田达, 李军利, 郅红建, 叶新新 (6006)
稻田灌溉河流 CH ₄ 和 N ₂ O 排放特征及影响因素	吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 方贤滔, 张天睿, 胡靖, 刘树伟, 邹建文 (6014)
节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	王永明, 徐永记, 纪洋, 冯彦房 (6025)
有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N ₂ O 的排放特征及微生物特性	王楷, 史雷, 马龙, 王书停, 张然, 郑伟, 李紫燕, 翟丙年 (6038)
不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响	孔培君, 郑洁, 栾璐, 陈紫云, 薛敬荣, 孙波, 蒋瑞霖 (6047)
氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响	杨建强, 刁华杰, 胡姝姝, 陈晓鹏, 王常慧 (6058)
化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响	向书江, 余砾, 熊子怡, 罗东海, 王莹燕, 邓正昕, 王子芳, 高明 (6067)
浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油菜产量	王正, 孙兆军, Sameh El-Sawy, 王珍, 何俊, 韩磊, 邹本涛 (6078)
《环境科学》第42卷(2021年)总目录	(6091)
《环境科学》征订启事(5593) 《环境科学》征稿简则(5623) 信息(5643, 5835, 5883)	

木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水持留改良影响

孟依柯¹, 王媛^{1,2*}, 汪传跃¹, 王报³

(1. 河海大学土木与交通学院, 南京 210098; 2. 河海大学水利水电学院, 南京 210098; 3. 中国建设基础设施有限公司, 北京 100029)

摘要: 现阶段生物滞留系统的填料土存在氮磷营养盐净化效果不稳定、雨水持留能力下降等问题。为评估木屑生物炭作为生物滞留系统填料土添加剂的改良效果, 选用对照填料土和施用了木屑生物炭的改良填料土进行对比研究, 通过理化性质测试、等温吸附实验、土柱实验和土水特征曲线测定, 研究木屑生物炭对填料土的改良影响与优化机制。结果表明, 木屑生物炭孔隙率大、比表面积大、饱和含水率高和 CEC 高, 可优化填料土的结构, 提升填料土的离子交换能力; 木屑生物炭对填料土的氮磷吸附改良效果突出, 对 NH_4^+ -N 的最大吸附量提高了 2.80 倍, 去除率由 31.30% 提高至 64.10%, 对 PO_4^{3-} -P 的最大吸附量提高了 1.28 倍, 去除率由 61.90% 提高至 90.00%; 经木屑生物炭改良后, 填料土的饱和含水率提高 1.63 倍, 渗透系数提高 2.43 倍, 在各含水率下的基质吸力明显增加。木屑生物炭的添加可优化生物滞留系统填料土的性能, 加强对雨水径流中氮磷营养盐的吸附, 提高系统的渗透性和雨水持留能力。

关键词: 木屑生物炭; 生物滞留系统; 吸附特性; 渗透特性; 土水特征

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)12-5876-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202104055

Improvement of Nitrogen and Phosphorus Adsorption and Stormwater Retention Capacity by Hardwood Biochar as an Additive Material in Filler Soil

MENG Yi-ke¹, WANG Yuan^{1,2*}, WANG Chuan-yue¹, WANG Bao³

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. China Construction Infrastructure Co., Ltd., Beijing 100029, China)

Abstract: The additive materials in bioretention facilities play a leading role in stormwater treatment to purify polluted runoff. Currently, the traditional additive materials have several problems, such as unstable purification effects of nitrogen and phosphorus and decreasing rainwater retention capacity. It has been demonstrated that hardwood biochar has the ability to retain nutrients and improve soil water retention in some soils. Here, physicochemical property tests, isothermal adsorption experiments, column experiments, and soil water characteristic curve tests have been conducted on control and hardwood biochar modified filler soil to assess the feasibility of hardwood biochar as an additive material in filler soil. The results showed that the hardwood biochar with porosity, large specific surface area, high saturated water content, and high CEC could optimize the structure of the filler soil and improve the ion exchange capacity of the filler soil. Hardwood biochar had a remarkable improvement effect on ammonium and phosphorus adsorption in the filler soil. The maximum adsorption capacity of NH_4^+ -N increased by 2.80 times, and the removal rate increased from 31.30% to 64.10%. The maximum adsorption capacity of PO_4^{3-} -P increased by 1.28 times, and the removal rate increased from 61.90% to 90.00%. After the addition of hardwood biochar, the saturated water content of the filler soil increased by 1.63 times, and the permeability coefficient increased by 2.43 times. The matric suction of hardwood biochar modified filler soil at each water content increased significantly. In conclusion, the addition of hardwood biochar can optimize the performance and grading of the filler soil, enhance the adsorption of ammonium and phosphorus in rainwater runoff, and improve the bioretention systems' permeability and rainwater retention capacity.

Key words: hardwood biochar; bioretention system; adsorption properties; permeability characteristics; water retention capacity

随着全球气候变化极端降雨增多, 导致城市内涝、水质型缺水、水污染循环加剧和生态退化等问题日益凸显^[1]。应对该些问题, 我国提出建设海绵城市, 加强对城市雨水资源的疏导和利用^[2]。生物滞留系统是海绵城市建设中进行城市雨水资源管理与利用的代表性生态设施^[3]。有研究证实, 生物滞留系统可以实现径流削减和污染物净化双重功能^[4]。

生物滞留系统中过滤层填料土对水文削减和污染物控制起到关键作用, 是发挥生物滞留设施功能的关键因素^[5]。现阶段生物滞留系统填料土主要采用砂土与有机物(如泥炭、木屑和堆肥等)混合物, 但尚无通用标准。美国马里兰州使用体积比为 5:2:3 的砂子、树叶堆肥物和覆盖土混合物作为填料土^[6]; 北卡罗来纳州则采用质量比为 88:8:4 的混凝

土砂、黏土和木屑混合物为填料土^[7]。填料土中的砂土可以提高系统的渗透性^[8], 有机物的添加可以为植物和微生物提供必要的养分^[9], 同时改善填料土的持水性^[10]。但木屑和堆肥这些有机物在实际使用中具有较高的氮磷浸出量^[11], 影响生物滞留系统的运行效果。同时, 随着系统的施用与运行, 在水力作用下, 砂土逐渐沉积淤堵, 造成设施渗透性逐渐变差^[12]。故需要进一步对生物滞留系统的过滤层填料土进行优化改良研究。

收稿日期: 2021-04-06; 修订日期: 2021-05-31

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX21_0490); 中央高校基本科研业务费(学生项目)

作者简介: 孟依柯(1995~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为海绵城市与生物滞留系统, E-mail: mengyike@outlook.com

* 通信作者, E-mail: wangyuanhu@163.com

生物炭具有多孔、清洁和吸附力强的特性^[13],已有研究考虑将不同种生物炭作为过滤层填料土添加剂用于生物滞留系统,如木屑生物炭^[14]、鸡粪生物炭^[15]和浒苔生物炭^[16]等。其中木屑生物炭对提高土体养分固持能力^[17]、提高土的团聚体稳定性^[18]和持水特性^[19]等方面展现了突出的优势,且商业化产量丰富。此外木屑生物炭营养盐淋出量低,且具有较好的氮磷吸附效果,可用作生物滞留系统填料解决雨水径流污染问题^[20]。但现仍缺乏木屑生物炭在施用情况下作为填料土添加剂的污染物去除量化研究与机理分析,且需进一步探讨其对生物滞留系统水文影响。故本文通过比较对照填料土和施用了木屑生物炭的改良填料土在氮磷营养盐吸附和持水渗透方面的表现,分析木屑生物炭作为生物滞留系统填料土改良剂的可性行。

1 材料与方法

1.1 材料准备与理化性质测试

木屑生物炭:由松木屑在 600℃ 下热解制成,其理化性质包括饱和含水率 ω_{sat} (%)、孔隙比 e (无量纲)、比表面积 BET ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)、pH、阳离子交换量 CEC ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)、总氮含量 ω_{N} (%) 和总磷含量 ω_{P} (%) 的指标检测。对木屑生物炭进行扫描电镜 SEM、能谱 EDS 和傅里叶红外分析。

对照填料土:参考北卡罗来纳州生物滞留设施标准,按质量比 88:8 将河砂与粉质黏土混合均匀而成。

改良填料土:按质量比 88:8:4 将河砂、粉质黏土与木屑生物炭混合均匀而成。

1.2 氮磷等温吸附实验

为评估木屑生物炭在生态滞留设施应用中对氮磷营养盐的吸附能力,分别对对照和改良填料土进行了氮磷的等温吸附实验。将 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NH_4Cl 和 Na_2HPO_4 标准溶液用去离子水分别稀释到 0、0.5、1、2、5 和 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。取 10 g 对照和改良填料土放入 50 mL 锥形瓶中,分别加入 20 mL 上述浓度的溶液,在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 条件下以 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的频率振荡 24 h。使用流动注射仪 (San^{++} , 荷兰 Skalar 公司) 测吸附后溶液中 NH_4^+-N 与 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的浓度。每组实验做 2 组重复。

使用 Freundlich 模型和 Langmuir 模型对等温吸附结果进行拟合^[21],如式(1)和式(2)所示:

$$q_e = K_F \times c_e^{1/n} \quad (1)$$

式中, c_e 为吸附后溶液中 NH_4^+-N 与 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; q_e 为平衡吸附量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; K_F 为 Freundlich 模型容量-亲和性参数,

$(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}) \cdot (\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})^{1/n}$; n 为 Freundlich 特征常数。

$$q_e = q_{\text{max}} \times K_L \times c_e / (1 + K_L \times c_e) \quad (2)$$

式中, q_{max} 为最大吸附量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; K_L 为 Langmuir 模型亲和性参数, $\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$ 。

1.3 土柱吸附实验

为模拟填料在实际情况下的工作效果,进行了土柱实验研究。在 2 个 PVC 圆柱 (高 30 cm, 直径 6 cm, 底部有孔径 3 mm 的筛盘底座) 中,在底部垫上滤纸,将翻拌均匀的对照填料土和改良填料土分别填入柱子中。每倒入 2 cm 厚度的混合填料,就用木锤从填料上方 5 cm 处自由下落锤击 10 次,直至填装至 24 cm。在混合填料顶部铺设淋洗干净并烘干的碎石块。在柱子顶部用以 $15 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度泵入人造雨水 3 h。人造雨水径流包括 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ NH_4^+-N 和 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 。每隔 20 min 接取 50 mL 出水,检测出水的 NH_4^+-N 与 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度,检测方法同上。每组实验做 2 组重复。

1.4 土柱入渗实验

为评价填料土在暴雨条件下应对雨洪的入渗能力和渗透性质,使用同样的土柱装置进行土柱入渗实验。对照和改良填料土分别按照上述方法再次填入土柱中,使用蠕动泵在土柱顶部进行供水,保持 3 cm 的水头,观察并记录下渗轨迹和高度,在土柱底部有出水时刻,使用量筒对土柱出水量进行监测。

1.5 土水特征曲线测定

采用滤纸法分别对对照和改良填料土进行土水特征曲线的测定,分析木屑生物炭添加前后填料土的持水性能的变化。对照和改良填料土每组制作 20 个,高为 20 mm,直径为 61.8 mm 的标准环刀样,保持每组的土样密度一致。将土样抽真空饱和 24 h 后取出,在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的气候箱中恒温蒸发,用天平检测土样的质量变化并估算其饱和度,当饱和度到达预计值,迅速取 2 张大滤纸夹着 1 张小滤纸放在两块土样之间,用 2 块土样紧密夹住滤纸,用保鲜膜包裹成一紧密整体后置于一个密封罐中。将所有密封罐置于无光恒温恒湿环境 1 周,待土样与滤纸之间的吸力达到平衡。取出滤纸称重,计算滤纸含水率,通过率定曲线计算土样的基质吸力^[22],如式(3)。

$$\lg u_s = \begin{cases} 4.84 - 0.062\omega, & \omega \leq 47 \\ 6.05 - 2.48\lg\omega, & \omega > 47 \end{cases} \quad (3)$$

式中, u_s 为基质吸力, kPa; ω 为滤纸含水率, %。

采用 Van Genuchten 模型对实验数据进行拟合^[23]:

$$\theta_w = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (a\psi)^n]^{(1-1/n)} \quad (4)$$

式中, θ_w 为体积含水率, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; θ_s 为饱和体积含水率, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; θ_r 为残余体积含水率,

$\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; a 为进气值对应的吸力, cm^{-1} ; n 为拟合参数; ψ 为基质吸力, kPa .

2 结果与讨论

2.1 理化性质分析

木屑生物炭的理化性质如表 1 所示. 轻质、饱和含水率高、孔隙率大和比表面积大是木屑生物炭的突出物理特性. SEM 及 EDS 图像显示(图 1): 木屑生物炭为多孔的蜂窝状结构, 在热解过程中生成了大量的内部通道和孔隙, 使其比表面积提高, 表面存

在大量金属矿物离子. 木屑生物炭呈碱性, 阳离子交换量较高, 同时氮磷含量低. 红外光谱图显示(图 2), 木屑生物炭存在大量的醚键和羟基, 能够提升对金属阳离子及 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的吸附效果^[24]. 由此可见木屑生物炭符合应用于生物滞留池的基本要求: 碱性可中和酸性土壤介质, 提高固氮菌等微生物菌种的活跃度^[25], 进而抑制硝化作用提高净化效果; 阳离子交换量大, 能够促进填料土中离子交换, 提高对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的吸附效果^[15]; 氮磷含量低避免了在使用中营养盐的淋失.

表 1 木屑生物炭理化性质

Table 1 Physicochemical properties of hardwood biochar									
项目	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\omega_{\text{sat}}/\%$	G_s	e	BET/ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	pH	CEC/ $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega_{\text{N}}/\%$	$\omega_{\text{P}}/\%$
参数	0.378	195.65	1.982	3.88	129.72	8.80	7.4	0.07	0.38

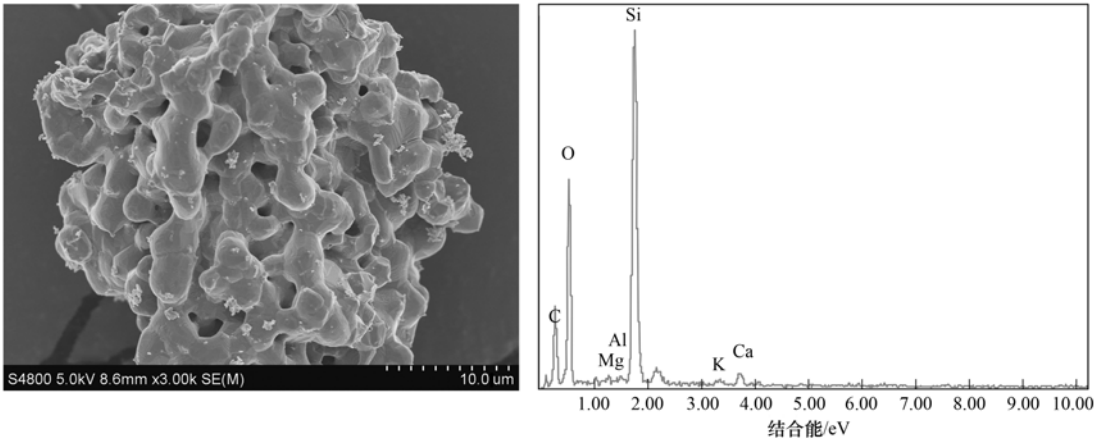


图 1 木屑生物炭的扫描电镜与能谱图
Fig. 1 SEM and EDS image of hardwood biochar

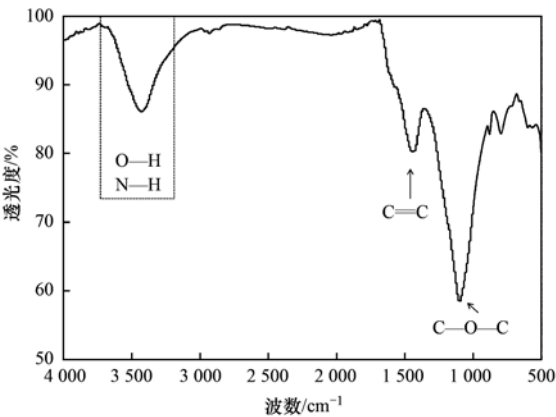


图 2 木屑生物炭的红外光谱图
Fig. 2 Infrared spectrum of hardwood biochar

2.2 等温吸附特性分析

对照填料土及木屑生物炭改良填料土对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的吸附实验结果如图 3 和图 4 所示. 总体上看, 木屑生物炭的掺入明显提高了填料土对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的吸附能力.

在 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 吸附上, 木屑生物炭改良的填料土比对照填料土多吸附了 75.5% ~ 144.3% 的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, 将对照填料土的吸附量由 0.183 ~ 5.714 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 提高至 0.470 ~ 8.316 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 在生物滞留设施中, 对径流中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的吸附去除主要是通过填料对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 进行离子交换或者通过静电吸引^[16]. 由表 1 可知, 木屑生物炭的阳离子交换量高, 加入填料土后, 提高了填料土的离子交换能力^[24]. 并且木屑生物炭在热解过程中, 产生了大量的含氧官能团, 如图 2 所示, 表面含有羧基和醚键等, 官能团中的 O 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 中的 H 通过静电吸引可以形成稳定的氢键^[23]. 因此, 木屑生物炭能够较大程度地提高填料土对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的吸附能力.

木屑生物炭将填料土对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的吸附量提高了 28.0% ~ 156.7%, 将其从 0.274 ~ 4.016 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的吸附量提高至 0.630 ~ 7.158 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 由图 1 的

EDS 图像可知,木屑生物炭表面携带了大量的 Mg、Al 和 Ca 等金属元素,在与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的接触过程中,形成磷酸镁晶体 $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ 、羟基磷灰石 $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ 及其他稳定的化合物^[26,27]. 而对照填料土中河砂主要成分为 SiO_2 ,金属离子含量少,故其对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸附效果较差. 木屑生物炭的加入为填料土提供了离子交换和桥接的基础,进而提高了填料土的吸附效果.

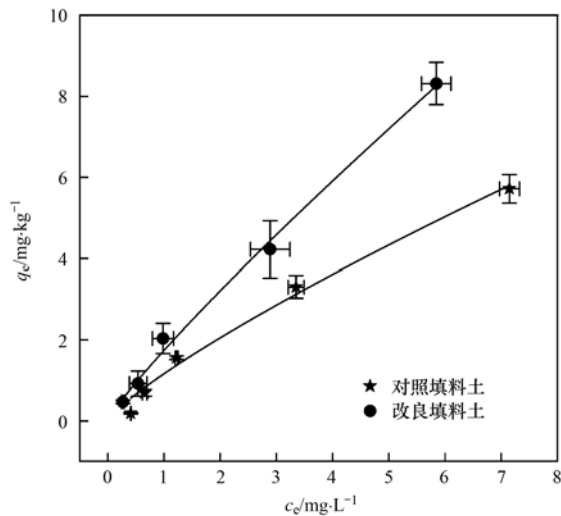


图3 对照与改良填料土对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附等温线
Fig. 3 Isotherm of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ adsorption by control and modified filler soil

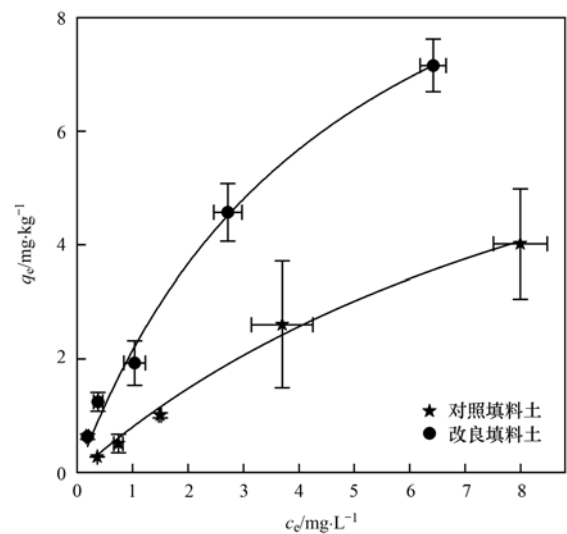


图4 对照与改良填料土对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸附等温线
Fig. 4 Isotherm of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ adsorption by control and modified filler soil

对照和改良填料土的等温吸附拟合结果如表2所示. 从表中 R^2 对比发现, Freundlich 模型和 Langmuir 模型均可用于拟合填料土对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸附, Langmuir 模型的契合程度更高. 由 Langmuir 模型中的最大吸附量 q_{max} 可知,木屑生物炭的添加将填料土对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附极限量提高了 2.80 倍,对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 提高了 1.28 倍. 在 Freundlich 模型中,对照和改良填料土的特征常数倒数 $1/n$ 小于

表2 对照与改良填料土对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的等温吸附线拟合数据

Table 2 Fitting data of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ adsorption by control and modified filler soil

营养盐	材料	Freundlich 模型			Langmuir 模型		
		K_F $/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})\cdot(\text{L}\cdot\text{mg}^{-1})^{1/n}$	$1/n$	R^2	$q_{\text{max}}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	K_L $/\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$	R^2
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	对照填料土	1.164	0.817	0.985	16.302	0.076	0.991
	改良填料土	1.741	0.882	0.995	45.679	0.038	0.992
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	对照填料土	0.826	0.775	0.978	9.779	0.089	0.991
	改良填料土	2.200	0.643	0.987	12.557	0.207	0.990

1,说明该种吸附方式为非线性吸附,即对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 吸附能力有限,且将逐渐达到饱和.

图5为不同 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 起始浓度下,对照和改良填料土对营养盐的吸附率. 在加入木屑生物炭后,填料土对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附率由 18.3%~39.0% 提高至 41.6%~50.9%,对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸附率由 20.1%~27.4% 提高至 35.8%~63.0%. 改良填料土对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸附率随 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度的升高有明显地下降趋势,但对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附率保持较为稳定的趋势. 在 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的典型雨水径流浓度下^[28],改良填料土对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附率达到最高. 需要指出,图5的吸附率是在填料土与雨水径流的固液混合比为 $0.5\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的情况下的实验结果. 在生物滞留系统

填料土的实际施用过程中,可根据当地雨水的径流浓度和降雨量,调节填料土的配比以达到设施经济和吸附效果最优化.

2.3 土柱吸附特性分析

土柱实验模拟了填料土在实际情况下对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除效果,出水浓度及去除率如图6~8所示. 从总体上看,木屑生物炭的加入将会降低 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的出水浓度,提高填料土对营养盐去除率.

在固液混合比为 $0.3\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的土柱实验中,改良填料土柱对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均去除率为 64.10%,高于等温吸附实验中改良填料土对 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附率(50.90%,固液混合比为 $0.5\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$). 亲水性

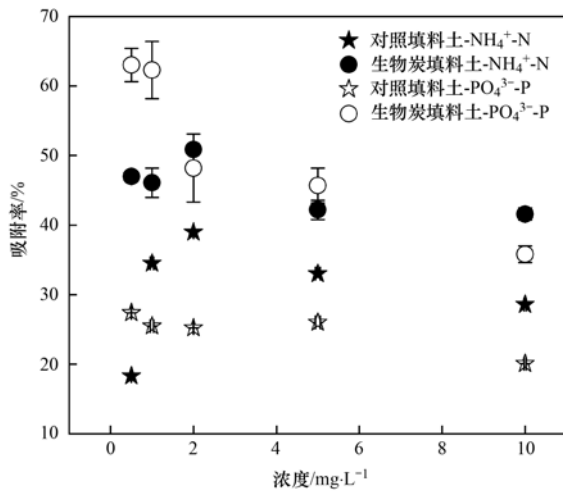
图5 对照和改良填料土对 NH_4^+ -N与 PO_4^{3-} -P的吸附率

Fig. 5 NH_4^+ -N and PO_4^{3-} -P adsorption rate of control and modified filler soil

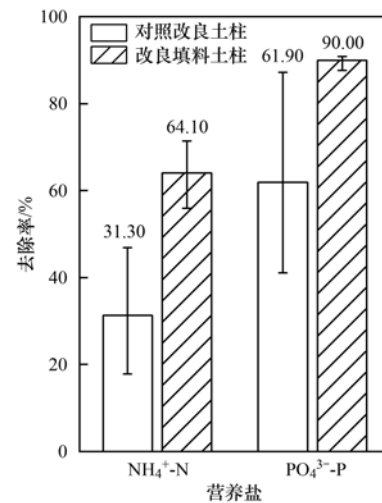


图8 土柱营养盐平均去除率

Fig. 8 Average removal rates of columns

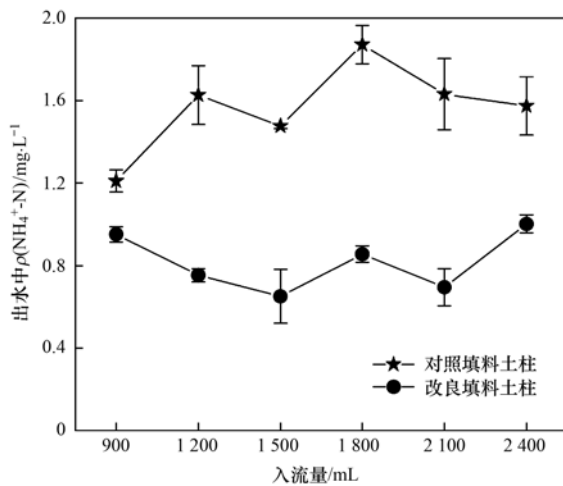
图6 土柱出水中 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$

Fig. 6 Outflow $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ from columns

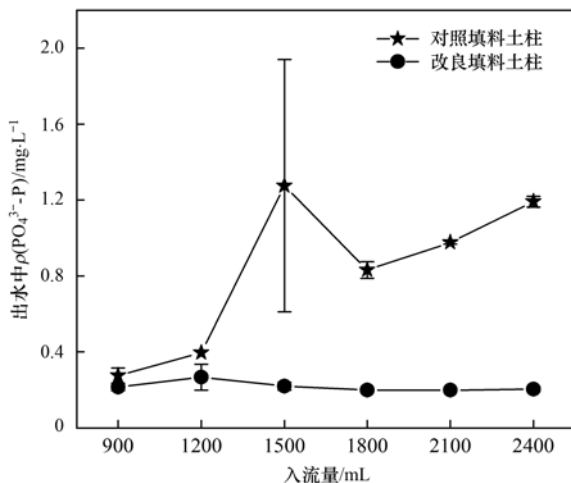
图7 土柱出水中 $\rho(\text{PO}_4^{3-}-\text{P})$

Fig. 7 Outflow $\rho(\text{PO}_4^{3-}-\text{P})$ from columns

富的孔隙和内部通道,使其在与雨水接触过程中,迅速捕获雨水完成吸附过程^[30]. 相比于等温吸附实验,土柱实验中填料土与 NH_4^+ -N的接触时间变短、水力作用降低,已经吸附在填料表面的 NH_4^+ -N难以被冲刷流失,故尽管固液混合比相比于等温吸附实验降低,但去除率在土柱实验中反而上升. 按照等温吸附实验中 Langmuir 模型 $q_{\max}$ 的预估,改良填料土将在入流量达到 38.14 L (约 16 场一年一遇的降雨量)时,失去 NH_4^+ -N的吸附能力.

改良填料土柱对 PO_4^{3-} -P的平均去除率为 90.00%,高于对照填料土的 61.90%. 在出水浓度检测中, PO_4^{3-} -P浓度一直保持在较低的平稳状态且有下降趋势. 随着雨水的入渗和冲刷,木屑生物炭表面携带的部分有机物被逐渐冲刷,故其亲水性会有所提升. 亲水性增强后,雨水与木屑生物炭的接触路径增多、接触时间延长,导致吸附作用有所增强. 虽然亲水性提高带来吸附效果的增强,但吸附过程在持续进行,吸附能力会趋向饱和,故出水浓度降低趋势不明显,且在后期会保持较为平稳的趋势.

2.4 渗透特性分析

对照和改良填料土进行了常水头入渗实验,其入渗特征曲线如图 9 所示. 在雨水入渗干燥土柱的过程中,木屑生物炭改良填料土柱的入渗速度在初始阶段略高于对照柱,随着雨水向下继续入渗,改良填料土柱的入渗速度放缓,慢于对照柱. 对照和改良填料土柱的平均密度分别为 $1.60 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $1.40 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,木屑生物炭的掺入降低了填料土容重,增加了填料土颗粒间的孔隙体积,使得在入渗初期,改良柱表层雨水吸纳下渗速度快,在入渗后期,入渗雨水先用于饱和上部土层后向下渗透,故入渗速度减缓. 以入渗结束后填料土的含水率表征其持水能力,

是影响填料土在雨水入渗过程中对营养盐去除效果的重要因素^[29]. 在土柱实验中,木屑生物炭由于丰

改良填料土持水能力是对照填料土的 1.63 倍. 这一特性有利于生物滞留系统应对短期暴雨径流, 在短时间内可以迅速、大量地吸纳地表径流, 延迟洪峰出现时间, 有较好地雨水滞蓄效果.

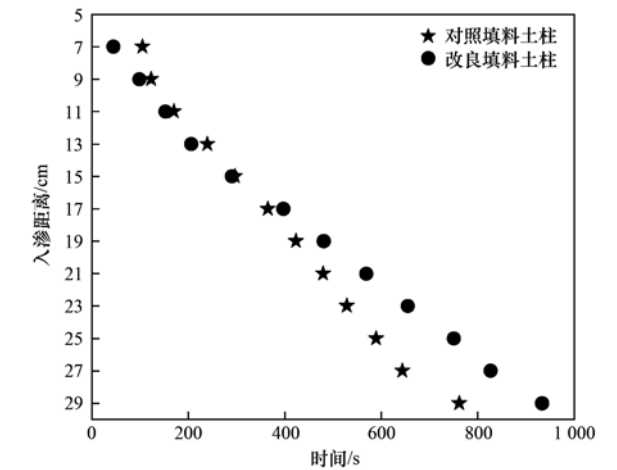


图 9 对照与改良填料土柱入渗特征曲线
Fig. 9 Infiltration characteristic curve of control and modified filler soil columns

对照和改良填料土的渗透特征曲线如图 10 所示. 欧美地区对生物滞留系统填料土的渗透系数要求在 $3.47 \times 10^{-6} \sim 5.5 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [31], 综合考虑我国的降雨特征和污染物负荷削减要求, 学者建议我国的生物滞留系统填料土渗透系数应大于 $10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [32]. 经测定, 对照和改良填料土柱的渗透系数分别为 $9.68 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $2.36 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 经木屑生物炭改良后的填料土, 内部孔隙增多, 渗透通道增加, 故渗透性有显著提高, 且满足相关建议要求. 但随着时间的推移, 在水力压实和沉积物的综合影响下, 微小颗粒向下运移, 堵塞了部分渗透通道导致渗透性下降 [12], 生物滞留系统渗透系数会出现减小的现象, 对照柱尤为明显, 而改良柱渗透率几乎保持不变. 恰当的颗粒级配是保证透水孔隙有效性的重要措施 [33], 木屑生物炭的掺入优化了填料土的颗粒级配, 内部孔隙也额外增加了渗透空间, 故其保持了较优的渗透性.

2.5 土水特征分析

对照和改良填料土的土水特征曲线如图 11 所示. 在饱和状态下, 木屑生物炭将填料土的基质吸力由 2.694 kPa 提高至 3.124 kPa, 体积含水率提高了 13%; 在相同饱和度下, 将填料土的基质吸力提升

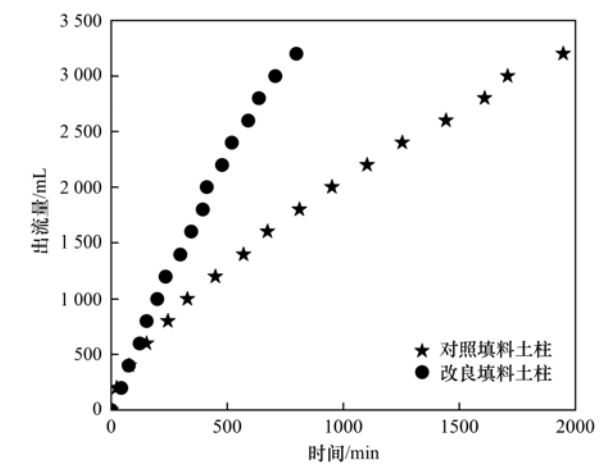


图 10 对照与改良填料土柱渗透特征曲线
Fig. 10 Permeation characteristic curve of control and modified filler soil columns

了 9%~110%. 木屑生物炭对填料土持水性的增强有助于提升生物滞留设施对雨水径流的滞留量, 延缓洪峰, 降低出流量. 滞留量的增加有助于提升生物滞留设施的水力停留时间, 延长污染物在系统设施内部的净化反应时间, 提升暴雨径流的净化效果.

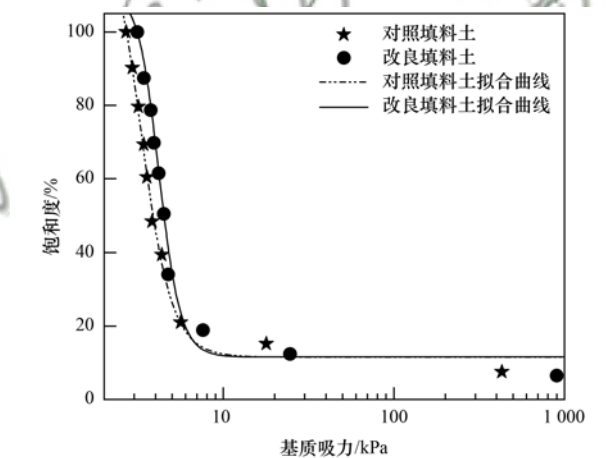


图 11 对照与改良填料土的土水特征曲线
Fig. 11 Water retention curves of control and modified filler soil

Van Genuchten 模型能够很好地拟合对照及改良填料土的土水特征曲线, 拟合参数如表 3 所示. 通过拟合曲线可知, 木屑生物炭的加入将填料土萎蔫点的体积含水率由 $0.052 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 提高至 $0.059 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, 田间持水量较对照填料土高出了 31%. 木屑生物炭轻质疏松多孔的结构特性增加了填料土颗粒间的孔隙体积, 有助于提高填料土在较低基质吸力下的含水率.

表 3 对照和改良填料土的 Van Genuchten 模型拟合参数

Table 3 Fitted parameters of control and modified filler soil using Van Genuchten model					
填料土	$\theta_s/\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	$\theta_r/\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	a/cm^{-1}	n	R^2
对照	0.052	0.584	0.031	5.380	0.995
改良	0.059	0.563	0.024	7.335	0.989

3 结论

(1)木屑生物炭饱和含水率高、孔隙率大和比表面积大,可优化填料土的孔隙结构和颗粒级配,且其碱性能够改良酸性土,其较高的 CEC 可提高填料土的离子交换能力。

(2)经木屑生物炭改良后的填料土,对氮磷的吸附效果显著提升.在等温吸附实验中,改良填料土对 NH_4^+ -N的最大吸附量提高了 2.80 倍,对 PO_4^{3-} -P 提高了 1.28 倍;在土柱实验中,改良填料土对 NH_4^+ -N 的去除率由 31.30% 提高至 64.10%,对 PO_4^{3-} -P 的去除率由 61.90% 提高至 90.00%。

(3)填料土经木屑生物炭改良后,入渗速度提升,渗透系数提高 2.43 倍,在各含水率下的基质吸力明显增加.木屑生物炭的施用将会提升生物滞留系统的持水效果、雨水滞留量,提升生物滞留设施的水力停留时间。

参考文献:

- [1] McDonald R I, Weber K, Padowski J, *et al.* Water on an urban planet: urbanization and the reach of urban water infrastructure [J]. *Global Environmental Change*, 2014, **27**: 96-105.
- [2] Nguyen T T, Ngo H H, Guo W S, *et al.* Implementation of a specific urban water management-Sponge City[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **652**: 147-162.
- [3] Tirpak R A, Afroz A R M N, Winston R J, *et al.* Conventional and amended bioretention soil media for targeted pollutant treatment: a critical review to guide the state of the practice[J]. *Water Research*, 2021, **189**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116648.
- [4] 李家科, 张兆鑫, 蒋春博, 等. 海绵城市生物滞留设施关键技术研究进展[J]. *水资源保护*, 2020, **36**(1): 1-8, 17.
Li J K, Zhang Z X, Jiang C B, *et al.* Research progress on key technologies of bioretention facilities for sponge city construction [J]. *Water Resources Protection*, 2020, **36**(1): 1-8, 17.
- [5] Skorobogatov A, He J X, Chu A, *et al.* The impact of media, plants and their interactions on bioretention performance: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **715**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136918.
- [6] Davis A P, Hunt W F, Traver R G, *et al.* Bioretention technology: overview of current practice and future needs[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2009, **135**(3): 109-117.
- [7] Hunt W F, Jarrett A R, Smith J T, *et al.* Evaluating bioretention hydrology and nutrient removal at three field sites in North Carolina[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2006, **132**(6): 600-608.
- [8] 王书敏, 黄克舒, Davis A P, 等. 生物滞留系统介质土的理化性质比较研究[J]. *中国给水排水*, 2019, **35**(17): 133-138.
Wang S, Huang K, Davis A P, *et al.* Comparison of physical-chemical properties of soil media in bioretention system [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, **35**(17): 133-138.
- [9] 陈垚, 杨威, 王健斌, 等. 雨水生物滞留设施中植被的设计与养护[J]. *中国给水排水*, 2017, **33**(12): 6-11.
Chen Y, Yang W, Wang J B, *et al.* Design and maintenance of vegetation in bioretention facilities [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, **33**(12): 6-11.
- [10] de Macedo M B, do Lago C A F, Mendiondo E M. Stormwater volume reduction and water quality improvement by bioretention: potentials and challenges for water security in a subtropical catchment[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **647**: 923-931.
- [11] Li L Q, Davis A P. Urban stormwater runoff nitrogen composition and fate in bioretention systems[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(6): 3403-3410.
- [12] Hatt B E, Fletcher T D, Deletic A. Hydraulic and pollutant removal performance of fine media stormwater filtration systems [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(7): 2535-2541.
- [13] 田婧. 生物炭对生物滞留池水文效应和氮素去除影响的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016. 23-41.
- [14] Reddy K R, Xie T, Dastgheibi S. Evaluation of biochar as a potential filter media for the removal of mixed contaminants from urban storm water runoff [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2014, **140**(12), doi: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000872.
- [15] Tian J, Miller V, Chiu P C, *et al.* Nutrient release and ammonium sorption by poultry litter and wood biochars in stormwater treatment [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **553**: 596-606.
- [16] 陈友媛, 李培强, 李闲驰, 等. 浒苔生物炭对雨水径流中氮氮的吸附特性及吸附机制[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 274-282.
Chen Y Y, Li P Q, Li X C, *et al.* Effect of enteromorpha prolifera biochar on the adsorption characteristics and adsorption mechanisms of ammonia nitrogen in rainfall runoff [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 274-282.
- [17] Mukome F N D, Zhang X M, Silva L C R, *et al.* Use of chemical and physical characteristics to investigate trends in biochar feedstocks [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, **61**(9): 2196-2204.
- [18] Spokas K A, Novak J M, Masiello C A, *et al.* Physical disintegration of biochar: an overlooked process [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2014, **1**(8): 326-332.
- [19] Zhang J, Chen Q, You C F. Biochar effect on water evaporation and hydraulic conductivity in sandy soil[J]. *Pedosphere*, 2016, **26**(2): 265-272.
- [20] 孟依柯, 王媛, 汪传跃. 木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4332-4340.
Meng Y K, Wang Y, Wang C Y. Nitrogen and phosphorus leaching characteristics and adsorption properties of hardwood biochar in stormwater runoff[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4332-4340.
- [21] Foo K Y, Hameed B H. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, **156**(1): 2-10.
- [22] 白福青, 刘斯宏, 袁骄. 滤纸总吸力吸湿曲线的率定试验[J]. *岩土力学*, 2011, **32**(8): 2336-2340.
Bai F Q, Liu S H, Yuan J. Calibration test for total suction wetting curve of filter paper [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, **32**(8): 2336-2340.
- [23] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, **44**(5): 892-898.
- [24] Tan Z X, Yuan S N, Hong M F, *et al.* Mechanism of negative

- surface charge formation on biochar and its effect on the fixation of soil Cd[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **384**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121370.
- [25] Zhalnina K, Dias R, de Quadros P D, *et al.* Soil pH determines microbial diversity and composition in the park grass experiment [J]. *Microbial Ecology*, 2015, **69**(2): 395-406.
- [26] Meng Y K, Wang Y, Wang C Y. Phosphorus release and adsorption properties of polyurethane-biochar crosslinked material as a filter additive in bioretention systems[J]. *Polymers*, 2021, **13**(2), doi: 10.3390/polym13020283.
- [27] Shin H, Tiwari D, Kim D J. Phosphate adsorption/desorption kinetics and P bioavailability of Mg-biochar from ground coffee waste[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, **37**, doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101484.
- [28] Davis A P, Shokouhian M, Sharma H, *et al.* Water quality improvement through bioretention media: nitrogen and phosphorus removal[J]. *Water Environment Research*, 2006, **78** (3): 284-293.
- [29] Davis A P. Field performance of bioretention: hydrology impacts [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2008, **13** (2): 90-95.
- [30] Suliman W, Harsh J B, Abu-Lail N I, *et al.* The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **574**: 139-147.
- [31] Le Coustumer S, Fletcher T D, Deletic A, *et al.* The influence of design parameters on clogging of stormwater biofilters: a large-scale column study[J]. *Water Research*, 2012, **46** (20): 6743-6752.
- [32] Jiang C B, Li J K, Li H E, *et al.* An improved approach to design bioretention system media [J]. *Ecological Engineering*, 2019, **136**: 125-133.
- [33] Zhang Z H, Huang X Y, Liu W, *et al.* Study on the hydraulic parameters of Woshaxi landslide soils during water level drawdown of three gorges reservoir[J]. *Geofluids*, 2020, **2020**, doi: 10.1155/2020/6283791.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2020年12月29日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2019年度中国科技论文统计结果。统计结果显示《环境科学》2019年度总被引频次12 057,影响因子2.256,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列。

CONTENTS

Emission Reduction Potential of Air Pollutants of Thermal Power Industry Based on Carbon Emission Reduction Target and Emission Standard Constraint Scenarios	LI Hui, SUN Xue-li, PANG Bo, <i>et al.</i> (5563)
Volatile Organic Compounds in the Vehicle Repairing Industry of China: Emission, Management, Purification, and Policy	WANG Hai-lin, YANG Tao, NIE Lei, <i>et al.</i> (5574)
Pollutant Emission Inventory of Biomass Combustion Sources in Xining City	GAO Yu-zong, JI Ya-qin, LIN Zi, <i>et al.</i> (5585)
Analysis of Air Quality and Influencing Factors in Sichuan Basin During the COVID-19 Outbreak	CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, LI Yuan, <i>et al.</i> (5594)
Estimation of PM _{2.5} Concentration in Sichuan Province Based on Improved Linear Mixed Effect Model and Geo-intelligent Random Forest	WU Yu-hong, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (5602)
Characterization of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric PM _{2.5} in Chengdu During the Later Stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan	LI Jia-qi, ZHANG Jun-ke, DONG Gui-ming, <i>et al.</i> (5616)
Characteristics of Chemical Composition and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particulate Matter in Luoyang	SUN Jia-bin, DONG Zhe, LI Li-ping, <i>et al.</i> (5624)
Characteristics and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Beijing	CAO Yang, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (5633)
Chemical Characteristics and Source Apportionment with Temporal Refinement for VOCs in Tianjin Suburb in Summer	WANG Yi-xuan, LIU Bao-shuang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (5644)
Pollution Characteristics and Reactivity of Volatile Organic Compounds in Shenyang	DU Han-bing, WANG Nan, REN Wan-hui, <i>et al.</i> (5656)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric SVOCs Around Typical Chemical Industry Zones	GE Xiang, WU Jian, GAO Song, <i>et al.</i> (5663)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Toxic Volatile Organic Compounds in Nanjing in Summer and Winter	ZHANG Zi-jin, LIN Yu-chi, ZHANG Yu-xian, <i>et al.</i> (5673)
Emission Characteristics of Industrial VOCs Based on Emission Inventory and Field Test: A Case Zhengzhou High-tech Zone	REN He, LU Xuan, LIU Yang, <i>et al.</i> (5687)
VOCs Emission Characteristics of Water-based Architectural Coatings and the Influence on the Atmospheric Environment in China	GAO Mei-ping, WANG Hai-lin, LIU Wen-wen, <i>et al.</i> (5698)
WRF-Chem Simulations of the Impacts of Uncertainty in VOCs Emissions on Ozone Formation and Control Strategies	WANG Feng, WANG Jian-wei, YANG Ning, <i>et al.</i> (5713)
Spatial and Temporal Distribution of Ozone and Influencing Factors in Shandong Province	ZHANG Miao, DING Chun, LI Yan, <i>et al.</i> (5723)
Chemical Characteristics and Contaminant Sensitivity During the Typical Ozone Pollution Processes of Chengdu in 2020	QIAN Jun, XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (5736)
Development of an Emission Model for Oxygenated Volatile Organic Compounds from Gasoline Vehicles Based on the Online Measurement	HAO Yu-qi, YUAN Zi-bing, WANG Meng-lei, <i>et al.</i> (5747)
Dynamic Evolution Characteristics of Water Resources Utilization Efficiency in China Under the Constraint of Triple Attribute Carrying Capacity	ZHANG Kai, WU Feng-ping, CHENG Chang-chun (5757)
Prediction of Total Nitrogen Load in Yangtze River Basin	DING Zhao-wei, ZHENG Hua (5768)
Dynamic of Net Anthropogenic Nitrogen Inputs and Riverine Nitrogen Export in the Yangtze River Basin in 1980-2015	YAO Meng-ya, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (5777)
Characteristics of Water Environment and Spatial-temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in the Yellow River	HAN Xu, PAN Bao-zhu, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5786)
Analysis of Nitrate Pollution Sources Under Different Rainfall Conditions Based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values	XING Zi-kang, YU Zhong-bo, YI Peng, <i>et al.</i> (5796)
Seasonal Variation Characteristics of Eukaryotic Microbial Community Composition in the Source Water Reservoir	ZHANG Hai-han, HUANG Xin, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5804)
Characteristics of Planktonic Bacteria Community Between Summer and Winter Surface Water in Dali Lake	LI Wen-bao, GUO Xin, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (5814)
Impacts of Wastewater Effluent Discharge on Bacteria Community and Water-soluble Organic Matter in Benthic Biofilm in Receiving River	WANG Yu-tao, FAN Chen-yang, ZHU Jin-xin, <i>et al.</i> (5826)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical POPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan	ZHANG Kun-feng, FU Qing, TU Xiang, <i>et al.</i> (5836)
Investigation on Fluoroquinolone Resistance Genes in the Intensive Aquaculture Area of Shatianhu Intensive Aquaculture Farm and Surrounding Waterbodies in Shanghai, China	XU Mu, LI Shi-hao, MA Jin, <i>et al.</i> (5848)
Influencing Factors of Nitrogen Removal from Low-Pollution Water by Aerated Constructed Wetland	LI Lin-lin, LI Rong-tao, KONG Wei-jing, <i>et al.</i> (5857)
Removal of Characteristic Pollutants in Livestock Wastewater by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands	ZHAO Wei, FAN Zeng-zeng, YANG Xin-ping (5865)
Improvement of Nitrogen and Phosphorus Adsorption and Stormwater Retention Capacity by Hardwood Biochar as an Additive Material in Filler Soil	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue, <i>et al.</i> (5876)
Removal of Ammonia Nitrogen from Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate Fixed Micron Zeolite Powder in Black and Smelly Rivers	WEI Chao, CHEN Tao, JIANG Qiao, <i>et al.</i> (5884)
Effect of Corn Stalk Biochar on the Adsorption of Aureomycin from Sierozem	NAN Zhi-jiang, JIANG Yu-feng, MAO Huan-huan, <i>et al.</i> (5896)
Microbial Degradation Potential and Transformation Pathway of Micropollutants in Sand Filters of Drinking Water Treatment Plants	ZHOU Jie, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (5905)
Long-term Trends in Illicit Drugs Abuse in the City Assessed by Wastewater Analysis	CAO Yu, DONG Xiao-tang, SHAO Xue-ting, <i>et al.</i> (5912)
Stress and Post Effects of Azithromycin and Copper on Archaeal Community and ARGs in Activated Sludge	GAO Yu-xi, LI Xing, ZHAO Jun-ru, <i>et al.</i> (5921)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metals at Typical Smelting Industry Sites	LI Qiang, CAO Ying, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (5930)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Coking Sites in China	WANG Yao-feng, HE Lian-sheng, JIANG Deng-ling, <i>et al.</i> (5938)
Spatial Variation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Main <i>Torreya grandis</i> Plantation Region in Zhejiang Province	WANG Min, DONG Jia-qi, BAI Long-long, <i>et al.</i> (5949)
Investigations on the Derivation of Safe Maize-Producing Threshold of Soil Cd Content and on Classification of Cd Contaminated Maize-Producing Areas in Northern China	GUAN Wei-dou, GUO Di, WANG Ping, <i>et al.</i> (5958)
Relationship Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Soil Aggregates and in Crops Around a Typical Pb-Zn Mining Area	QIANG Yu, LI Ying-ju, LUO Qian, <i>et al.</i> (5967)
Heavy Metal Pollution and Cumulative Effect of Soil-crop Systems Around Typical Enterprises in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, WANG Qiao-lin, WANG Cheng-wen, <i>et al.</i> (5977)
Heavy Metal Accumulation Effect and Safe Planting Zoning of Soil and Rice in Tongren	ZHU Liang-liang, WU Yong, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (5988)
Effect of Dry-Wet Alternation on the Immobilization of Arsenic in Red Soil by Cerium Manganese Modified Biochar	HUANG Xiao-ya, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5997)
Ammonium Nitrogen Fertilizer and Humic Acid Synergically Promote the Removal of Cd from Soil by <i>Tagetes patula</i> L.	WANG Bing-qing, YANG Qin, LI Hong-ying, <i>et al.</i> (6006)
Characteristics and Influencing Factors of the Dissolved Methane and Nitrous Oxide Concentrations and Emissions from a Rice Paddy Drainage River in China	WU Shuang, YANG Wei-tong, SHENG Yang-yue, <i>et al.</i> (6014)
Coupling Effects of Water-saving Irrigation and Controlled-release Fertilizer (CRF) Application on CH ₄ and N ₂ O Emission in Single Cropping Paddy Field	WANG Yong-ming, XU Yong-ji, JI Yang, <i>et al.</i> (6025)
Effects of Manure Combined Chemical Fertilizers on Soil N ₂ O Emission and Microbial Characteristics of Wheat Crop System in Northwest Arid	WANG Kai, SHI Lei, MA Long, <i>et al.</i> (6038)
Effects of Different Types of Straw Returning on the Bacterial Community, Organic Carbon Mineralization and Maize Yield in Upland Red Soil	KONG Pei-jun, ZHENG Jie, LUAN Lu, <i>et al.</i> (6047)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Microorganisms in Saline-alkaline Grassland	YANG Jian-qiang, DIAO Hua-jie, HU Shu-ya, <i>et al.</i> (6058)
Effects of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Nutrients and Phosphorus Forms in Purple Soils	XIANG Shu-jiang, YU Luo, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i> (6067)
Effects of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar and Wood Vinegar Co-application on Takyric Solonetz Improvement and Yield of Oil Sunflower	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh El-Sawy, <i>et al.</i> (6078)