

E方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

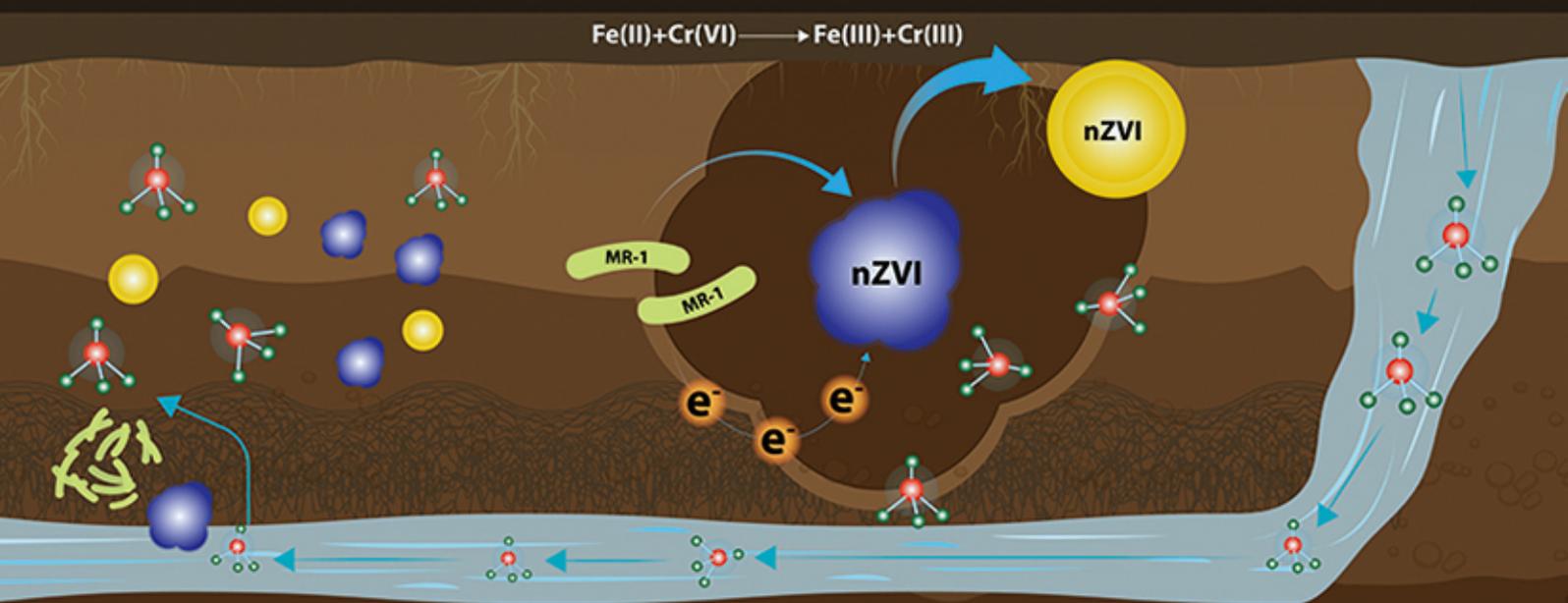
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJIANG KEXUE

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制

廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年9月

第42卷 第9期
Vol.42 No.9

目次

北京市 2014~2020 年 PM_{2.5} 和 O₃ 时空分布与健康效应评估 陈菁, 彭金龙, 徐彦森 (4071)

京津冀地区高分辨率 PM_{2.5} 浓度时空变化模拟与分析 杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 张凌云, 魏强, 李夫星, 王丽艳, 王卫 (4083)

京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对 PM_{2.5} 污染影响 邵玄逸, 王晓琦, 钟焜盛, 王瑞鹏 (4095)

太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析 王雁, 郭伟, 闫世明, 裴坤宁, 李明明, 陈二萍 (4104)

嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析 张颖龙, 李莉, 吴伟超, 吕升, 秦阳, 祝新明, 高晋徽, 唐倩, 夏崢 (4116)

基于机器学习算法的新冠疫情管控对河南省空气质量影响的模拟分析 魏煜, 徐起翔, 赵金帅, 张瑞芹 (4126)

新乡市大气 PM_{2.5} 载带金属元素季节分布、来源特征与健康风险 刘桓嘉, 贾梦珂, 刘永丽, 赵艺洁, 郑爱华, 刘恒志, 徐肃阳, 肖晴晴, 苏晓燕, 任言 (4140)

黄渤海气溶胶中砷的分布特征和季节变化 袁帅, 王艳, 刘汝海, 种习习, 刘晓雨, 邵龙 (4151)

天津市 2020 年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源 李立伟, 肖致美, 杨宁, 蔡子颖, 闫斌峰, 元洁, 白宇, 郑乃源, 唐逸 (4158)

中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素 何超, 慕航, 杨璐, 王丹璐, 邸彦峰, 叶志祥, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 洪松 (4168)

乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究 张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 刘晓, 郭文凯, 李光耀, 陈梅 (4180)

珠江三角洲海岸背景区大气 VOCs 污染特征与来源 云龙, 李成柳, 张明棣, 何龙, 郭键锋 (4191)

永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析 孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 王艺璇, 裴宏伟, 沈彦军 (4202)

汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别 程兵芬, 张远, 夏瑞, 张楠, 张新飞 (4211)

环境持久性药物在江苏省地表水中的污染水平、分布特征及生态风险评估 赵美美, 范德玲, 古文, 汪贞, 梁梦园, 刘济宁, 张志 (4222)

柳江流域河流溶解态重金属时空分布及污染评价 张婉军, 辛存林, 于爽, 刘齐, 曾鹏 (4234)

雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价 师环环, 潘羽杰, 曾敏, 黄长生, 侯清芹, 皮鹏程, 彭红霞 (4246)

龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价 谢浩, 梁永平, 李军, 邹胜章, 申豪勇, 赵春红, 王志恒 (4257)

硫氧同位素解析典型岩溶地下河流域硫酸盐季节变化特征和来源 任坤, 潘晓东, 兰干江, 彭聪, 梁嘉鹏, 曾洁 (4267)

包头南海湿地磷形态及污染源定量识别 拜亚红, 钱晨歌, 袁思静, 谢子嫣, 来凌子, 张敏, 刘颖, 苗春林 (4275)

城市新城区公园沟塘沉积物磷释放风险及影响因素分析 李如忠, 宋敏, 杨继伟 (4287)

水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析 齐冉, 张灵, 杨帆, 颜昌宙 (4296)

锰砂人工湿地对污染物的强化去除 马权, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (4304)

4 种典型沉水植物对去除磷污染底泥的应用效果 陶理, 王沛芳, 袁秋生, 王洵, 胡斌 (4311)

输水情景下白洋淀好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应 周石磊, 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 于明会, 姚波, 崔建升, 罗晓 (4319)

木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性 孟依柯, 王媛, 汪传跃 (4332)

海州湾潮间带沙蚕对沉积物微塑料的指示作用 王嘉旋, 宋可心, 孙一鑫, 方涛, 李瑾祯, 张涛, 冯志华 (4341)

纳米二氧化钛与镉对斜生栅藻 (*Scenedesmus obliquus*) 生长的拮抗效应及其作用机制 王璞, 赵丽红, 朱小山 (4350)

螺旋霉素废水处理过程中菌群结构、水质特征及抗性基因之间关系分析 武彩云, 李慧莉, 覃彩霞, 佟娟, 魏源送 (4358)

螯合铁对厌氧铁氨氧化脱氮效能及微生物群落的影响 廖宏燕, 宋诚, 万柳杨, 时绍鹏, 王兴祖 (4366)

溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮性能与微生物群落的影响 池玉蕾, 石炬, 任童, 王晓昌, 金鹏康 (4374)

间歇梯度曝气下缩短 SRT 强化短程 SNEDPR 系统脱氮除磷 张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张杰 (4383)

生物膜系统中部分反硝化实现特性 于莉芳, 张兴秀, 张琼, 王晓玉, 彭党聪, 张日霞 (4390)

厌氧推流进水对反硝化除磷好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 曹思雨, 王琪, 张杰 (4399)

不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化生活污水短程硝化反硝化除磷颗粒系统运行 王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (4406)

中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的 Meta 分析 张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 杨兰芳, 赵永存, 黄标 (4414)

青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价 杜昊霖, 王莺, 王劲松, 姚玉璧, 周悦, 刘晓云, 芦亚玲 (4422)

电子垃圾拆解区土壤-农作物系统中铜元素的空间分布特征及其风险评价 张璐瑶, 赵科理, 傅伟军 (4432)

改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜镉形态的影响 王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 王佳锐, 张曦, 丁京涛, 周海宾, 李春燕, 程琼仪 (4441)

组配改良剂联合锌肥对土壤-水稻系统镉迁移转运的影响 周坤华, 周航, 王子钰, 刘雅, 刘佳伟, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4452)

不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响 魏玮, 李平, 郎漫 (4462)

1 株草螺属植物内生菌 R-13 的分离鉴定及对龙葵吸收土壤镉的影响 鹿杰, 刘月敏, 黄永春, 王常荣, 刘斌, 刘仲齐, 黄益宗, 黄雁飞, 张长波 (4471)

不同地区土壤古菌群落对重金属污染响应 李雨桐, 杨杉, 张艺, 范例, 刘坤, 张晟 (4481)

高通量测序分析黄土高原退耕还林区土壤细菌群落特征 刘晓华, 魏天兴 (4489)

餐厨垃圾生物发酵液对黄土丘陵区土壤质量的影响试验 邵立明, 任俊达, 吕凡, 章骅, 何品晶 (4500)

秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系 马寰菲, 胡汗, 李益, 郭鑫鑫, 任成杰, 赵发珠 (4510)

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化 Cr(VI) 及机制 廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚 (4520)

降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响 蒿廉伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平 (4527)

氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米 N₂O 排放的影响 符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 汤水荣, 王鸿浩, 伍延正, 孟磊 (4538)

负载 NH₄⁺-N 生物炭对土壤 N₂O-N 排放和 NH₃-N 挥发的影响 马晓刚, 何建桥, 陈玉蓝, 李德天, 刘川, 董建新, 郑学博 (4548)

微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响 张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 王玺, 徐晗, 胡荣桂, 严昶, 林杉 (4558)

1985~2019 年中国全氟辛酸磺酰基化合物的动态物质流分析 王佳钰, 陈景文, 唐伟豪, 崔蕴晗, 王中钰, 宋国宝, 陈伟强 (4566)

《环境科学》征订启事(4201) 《环境科学》征稿简则(4340) 信息(4382, 4537, 4565)

木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性

孟依柯¹, 王媛^{1,2*}, 汪传跃¹

(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)

摘要: 现阶段生物滞留系统的填料存在氮磷营养元素淋出及吸附净化效果不稳定的问题。为评估木屑生物炭作为生物滞留系统过滤层填料的可行性, 选用传统填料(椰糠、堆肥、陶粒和火山石)作为对比材料, 通过理化性质测试、批量淋洗实验、等温吸附和解吸实验, 研究木屑生物炭的基本性质、淋出特性和吸附特性, 探究木屑生物炭对生物滞留系统的优化效果与改良机制。结果表明, 经高温热解生成的木屑生物炭具有疏松和多孔的特性, 饱和含水率为 195.65%, 持水效果好; 热解后木屑生物炭表面的氮磷元素转换为稳定的化合物, 在批量淋洗实验中其氮素淋出量低、淋出速度快, 磷素淋出滞缓但在人造雨水径流的淋洗中保持线型负值增长, 吸附效果稳定; 在典型雨水径流浓度($2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NH_4^+ 及 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 PO_4^{3-}) 下, 木屑生物炭可吸附 $34.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 NH_4^+ 和 $59.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 PO_4^{3-} , 具有突出的综合吸附能力; NH_4^+ 及 PO_4^{3-} 吸附平衡后的木屑生物炭在去离子水中的平均解吸率为 21.23% 和 17.43%, 吸附效果稳定。综上所述, 木屑生物炭的施用可解决填料营养盐过剩淋出的问题, 且具有较好的氮磷吸附效果, 可用作生物滞留系统的填料解决雨水径流污染问题。

关键词: 生物炭; 生物滞留系统; 填料添加物; 淋出特性; 吸附特性

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4332-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202101264

Nitrogen and Phosphorus Leaching Characteristics and Adsorption Properties of Hardwood Biochar in Stormwater Runoff

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

(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)

Abstract: At present, the fillers used in bioretention systems are limited by problems such as unstable leaching and adsorption of nitrogen and phosphorus. To assess the feasibility of using hardwood biochar as a filter filler material in bioretention systems, it was compared to traditional filter filler materials, namely coconut chaff, compost, ceramsite, and volcanic stone. Experiments and tests were conducted to study the physico-chemical properties, leaching, and adsorption characteristics of hardwood biochar, and to explore the optimizing effect and mechanism of hardwood biochar in bioretention systems. Hardwood biochar created through high temperature pyrolysis was found to be porous and loose, with a saturated moisture content of 195.65% and good water retention capacity. After pyrolysis, the nitrogen and phosphorus elements on the hardwood biochar surface were converted into stable compounds. In a batch leaching experiment, the quantity of leached nitrogen was low, and the leaching speed was fast; phosphorus leaching was slow, although the linear negative value increased during artificial rainwater runoff leaching, and the adsorption effect was stable. When exposed to typical nitrogen and phosphorous concentrations in rainwater runoff ($2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ of NH_4^+ and $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ of PO_4^{3-}), hardwood biochar adsorbed $34.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ NH_4^+ and $59.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ PO_4^{3-} , showing outstanding comprehensive adsorption capacity. After reaching adsorption equilibrium, the average desorption rates of the hardwood biochar in deionized water were 21.23% and 17.43%, proving that the adsorption effect was stable. In conclusion, the application of hardwood biochar can mitigate excessive leaching of nutrients from fillers, as it has a better adsorption capacity for nitrogen and phosphorus. Therefore, hardwood biochar can be used as the filler material in bioretention systems, to reduce pollution associated with rainwater runoff.

Key words: biochar; bioretention system; additive materials; leaching characteristics; adsorption properties

近年来, 洪涝灾害已经成为困扰各大城市的“新城市病”, 与此同时水质型缺水也是国内外公认的城市水资源难题之一^[1]。生物滞留系统是当下进行城市雨水资源管理与利用最为有力的工具之一^[2]。有研究表明, 生物滞留系统通过其高持水性, 可以大大减少径流量和峰值流量, 降低径流污染^[3]。

生物滞留设施中过滤层填料对地表径流量削减和水质净化起到关键作用。为提高生物滞留设施运行效果, 填料选择已成为国内外研究的热点问题, 主要可分为生物废弃物和矿物材料 2 类。生物废弃

物, 如椰糠^[4]、泥炭^[5]和畜粪^[6]等, 对重金属和油脂等污染物有较好的吸附净化效果, 但由于其在生长过程中积累了大量的氮磷营养物, 在实际使用中具有较高的氮磷浸出量, 导致氮磷去除效果的局限性。矿物材料填料, 如火山石^[7]、蒙脱石^[8]和沸石^[9]等, 能够提高生物滞留设施的渗透性能, 且本身氮磷含量较低。但由于其自身结构限制, 污染物的去除率和

收稿日期: 2021-01-28; 修订日期: 2021-03-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1765204, 41772340)

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: wangyuanhhu@163.com

保水能力相对较低. 故需要进一步探索寻找高效、清洁的过滤层填料.

生物炭是生物有机材料在完全或部分缺氧和相对“较低温度”($<700^{\circ}\text{C}$)的环境下热解炭化产生的固态产物^[10]. 在热解过程中, 大部分氮和磷元素被氧化为稳定的化合物^[11], 降低了营养盐淋失的风险. 此外, 许多研究已经证实, 木屑生物炭作为一种土壤添加剂, 既可以提高土的团聚体稳定性和持水特性^[12], 也可以提高土体养分的固持能力^[13]. 但现阶段使用木屑生物炭作为生物滞留系统过滤层填料的研究较为少见, 需要进一步探究其作为填料的可行性. 故本研究针对木屑生物炭的基本物化性质、淋出特性和吸附特性开展探索, 以评价其作为过滤层填料的可行性.

1 材料与方法

1.1 材料准备与理化性质测试

研究选用的木屑生物炭由松木屑在 600°C 下热解制成, 其具有比表面积大、氮磷含量低的特点, 符合生物滞留设施过滤层填料的选择标准. 另选用椰糠、堆肥、陶粒和火山石这 4 种传统填料进行对比研究.

木屑生物炭及对比材料的物理性质测试包括密度、含水率和比表面积等参数的测试. 运用环刀法测试材料的天然堆积密度. 用抽真空饱和再烘干的方法测得天然含水率 ω (%) 与饱和含水率 ω_{sat} (%). 运用比重瓶法测得材料密度 G_s (无量纲), 与饱和含水率换算得到材料的孔隙比 e (无量纲). 使用快速比表面积分析仪 (ASAP 2020, 美国 Micromeritics 公司) 测量材料的比表面积 BET ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$).

化学性质测试指标包括 pH、阳离子交换量 CEC ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)、总氮质量分数 TN (%) 和总磷质量分数 TP (%). 材料与去离子水在质量比为 1:50 的混合液中测得 pH. 采用乙酸铵交换法测定 CEC. TN 和 TP 使用元素分析仪获得. 另进行了扫描电镜 (SEM) 和能谱 (EDS) 分析 (SU3500/S4800, 日本 Hitachi 公司).

1.2 淋出性质测试

现阶段生物滞留系统氮磷去除效果不稳定的主要原因是填料中氮磷的淋出^[14]. 故在进行填料施用的可行性分析时, 首先需要对其淋出性质进行研究, 确保其尽量少、尽量快地释放营养盐. 对选中的 5 种材料分别进行去离子水和人造雨水径流的连续淋洗, 并分析其营养盐的释放特性.

将在低温 60°C 烘干的 5 种材料各取 5 g, 分别加入装有 100 mL 淋洗液 (去离子水或人造雨水径

流) 的锥形瓶中, 在 $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 的条件下, 以 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的频率振荡 24 h. 人造雨水径流采用 $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 与 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Na}_2\text{HPO}_4$ 的混合溶液, 未考虑油脂、重金属、氮的影响. 取淋出液在 $5000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 20 min 后, 再取上清液测其电导率. 在锥形瓶中再次加入 100 mL 淋洗液, 重复上述步骤, 直至电导率与上次测量一致, 视为上述材料已洗净. 将用去离子水淋洗净的材料放入烘箱中 60°C 烘干, 以备吸附实验用. 每种材料做 2 组重复实验, 设仅有淋洗液的锥形瓶作为对照组 (吸附与解吸实验设定相同).

使用流动注射仪 (San⁺⁺, 荷兰 Skalar 公司) 测淋出液中 NO_3^- 、 NH_4^+ 、TN、 PO_4^{3-} 和 TP 的浓度, 使用电感耦合等离子体质谱仪 (NexION, 美国 PerkinElmer 公司) 测淋出液中铅、镉、锰、钴和镍的浓度.

1.3 等温吸附与解吸实验

作为生物滞留系统过滤层的填料, 材料需要对雨水径流中的氮磷有一定的吸附效果. 为评价材料对雨水中氮磷的吸附能力, 研究进行不同氮磷浓度下的等温吸附实验. 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 0.5、1、2、5、7 和 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 该梯度参考了典型雨水径流浓度^[15] 和同行吸附实验研究^[10, 16]. 取 0.2 g 淋洗实验后洗净并烘干的材料放入 50 mL 锥形瓶中, 加入 10 mL 上述浓度的溶液, 在 $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下振荡 24 h. 取液及检测方法同上, 测吸附后溶液中 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 的浓度.

将吸附平衡后的材料取出, 60°C 烘干后, 分别取 0.1 g 加入锥形瓶, 再各加入 5 mL 去离子水, 在 $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下振荡 24 h. 取液及检测方法同上, 测解吸后溶液中 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 的浓度.

1.4 吸附与解吸数据分析

为探究材料对 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 的吸附性质, 对其吸附平衡量进行 Freundlich 和 Langmuir 模型拟合.

NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 在 24 h 的平衡吸附量 q_e ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的计算公式为:

$$q_e = (c_0 - c_e) \times V/m \quad (1)$$

式中, c_0 和 c_e 为吸附前、后溶液中 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 的浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; V 为溶液体积, L; m 为材料质量, kg.

用化学吸附 Freundlich 模型对等温吸附结果进行拟合:

$$q_e = K_F \times c_e^{1/n} \quad (2)$$

式中, K_F 为 Freundlich 模型容量-亲和性参数,

$\text{mg}^{1-1/n} \cdot \text{L}^{1/n} \cdot \text{kg}^{-1}$; n 为 Freundlich 特征常数.

用单分子层物理吸附 Langmuir 模型对等温吸附结果进行拟合:

$$q_e = q_{\max} \frac{K_L \times c_e}{1 + K_L \times c_e} \quad (3)$$

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, $\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$.

用无量纲系数 R_L 判定吸附是否容易发生:

$$R_L = 1/(1 + K_L \times c_0) \quad (4)$$

当 $0 < R_L < 1$ 时, 吸附容易发生; 当 $R_L > 1$ 时, 吸附不易发生; 当 $R_L = 0$ 时, 吸附过程可逆; 当 $R_L = 1$ 时, 为线性吸附.

解吸率 η 计算公式为:

$$\eta = (c_d \times V)/(m \times q_e) \times 100\% \quad (5)$$

式中, c_d 为解吸后溶液中 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 的浓度,

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; V 为溶液体积, L ; m 为材料质量, kg .

2 结果与讨论

2.1 理化性质分析

木屑生物炭与对比材料的理化性质有较大差异, 具体如表 1 所示: 木屑生物炭的堆积密度大于椰糠和堆肥两种生物废弃物材料, 且低于陶粒、火山石两种矿物类材料. 在饱和状态下, 木屑生物炭可以吸附几近自身重量 2 倍的水分, 虽低于椰糠和堆肥, 但其饱和含水率远高于陶粒与火山石. 材料的孔隙比和比表面积一定程度上反映了内部的孔隙空间和吸附潜力的大小: 木屑生物炭的孔隙比为 3.88 仅次于椰糠 5.38, 远高于其他 3 种材料; 其比表面积是椰糠的 16.74 倍和堆肥的 3.8 倍.

表 1 填物理化性质

Table 1 Physicochemical properties of additive materials

材料名称	ρ / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\omega/\%$	$\omega_{\text{sat}}/\%$	G_s	e	BET / $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	pH	CEC / $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	TN/ $\%$	TP/ $\%$
木屑生物炭	0.378	4.21	195.65	1.982	3.88	129.72	8.80	7.4	0.07	0.38
椰糠	0.305	154.96	544.87	0.988	5.38	7.75	6.73	12.2	2.65	1.87
堆肥	0.314	86.22	267.61	0.619	1.66	34.10	7.08	5.3	1.25	1.41
陶粒	0.558	0.87	54.48	1.057	0.58	4.56	7.63	3.6	0.11	0.15
火山石	0.828	0.35	22.43	2.637	0.59	24.05	6.78	3.9	0.03	0.09

木屑生物炭是 5 种材料中 pH 最高的, 为 8.80, 可用以中和酸性的生物滞留设施填料、提高固氮菌等微生物菌种的活跃度^[17]、进而抑制硝化作用提高净化效果. 而饱和含水率较高的椰糠和比表面积较大的火山石都呈弱酸性. 阳离子交换量对 NH_4^+ 的吸附有重要影响, 其值越大吸附效果会随之一定程度地增长^[10], 相比之下, 木屑生物炭的阳离子交换量较高, 仅次于椰糠, 具有较大的吸附潜力. 从材料的总氮、总磷含量上看, 木屑生物炭、陶粒和火山石属于低氮磷含量材料, 其质量分数均低于 0.5%, 而椰糠和堆肥在自然生长过程中, 累计了大量的营养元素, 故氮磷含量较高, 其质量分数均高于 1%. 由此可以推测, 在后期的淋洗过程中, 椰糠和堆肥的氮磷淋出量将高于其他 3 种材料.

本研究对木屑生物炭淋洗前后进行了扫描电镜与能谱观测, 如图 1 所示. 观测可知: 木屑生物炭经热解后, 内部存在丰富的喉道、孔隙结构, 为水分的持有提供了附着空间. 木屑生物炭为粉末颗粒状, 粒径大小在 0.075 ~ 0.5 mm 之间, 外表凹凸不规则且有孔洞, 表面有些许矿物质附着, 但未发现重金属元素痕迹. 经淋洗后木屑生物炭的表面孔洞更为明显, 表面的矿物质和金属离子被部分冲刷掉, 但仍有少

许沾连.

2.2 氮素淋出特性分析

通过摇床淋洗实验可以预估生物滞留系统过滤层填料在实际使用情况下营养盐的淋出情况, 以评估材料的适用性. 木屑生物炭及对比材料的氮素淋失情况见表 2 和图 2 所示. 总体上看, 木屑生物炭的氮素 (NO_3^- 、 NH_4^+ 和 TN) 淋出量非常低, 略高于陶粒的淋出量, 与火山石的淋出量接近. 生物废弃物材料 (椰糠与堆肥) 的氮素淋出量远高于木屑生物炭和矿物类材料.

木屑生物炭在去离子水的 8 次淋洗过程中, 释放了微量的氮素: 在首次淋洗过程中, 木屑生物炭释放了 $0.214 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{NO}_3^-$ 和 $0.157 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{NH}_4^+$, 分别占首次淋出 TN 的 29.36% 和 21.54%, 其余氮素可能源自于有机氮的淋出. 木屑生物炭累计释放了 $0.389 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{NO}_3^-$ 、 $0.251 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{NH}_4^+$ 和 $1.314 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{TN}$, 释放量远低于椰糠和堆肥. 木屑生物炭的氮素淋失主要发生在首轮淋洗, 首轮释放的 NO_3^- 占 8 次淋洗累计释放的 55.08%, NH_4^+ 占 8 次的 62.50%, TN 占 8 次的 55.43%, 木屑生物炭淋失速度快. 与其他种类的生物炭相比: 在 450℃ 热解下的牧草生物炭在 8 次淋洗作用下共淋

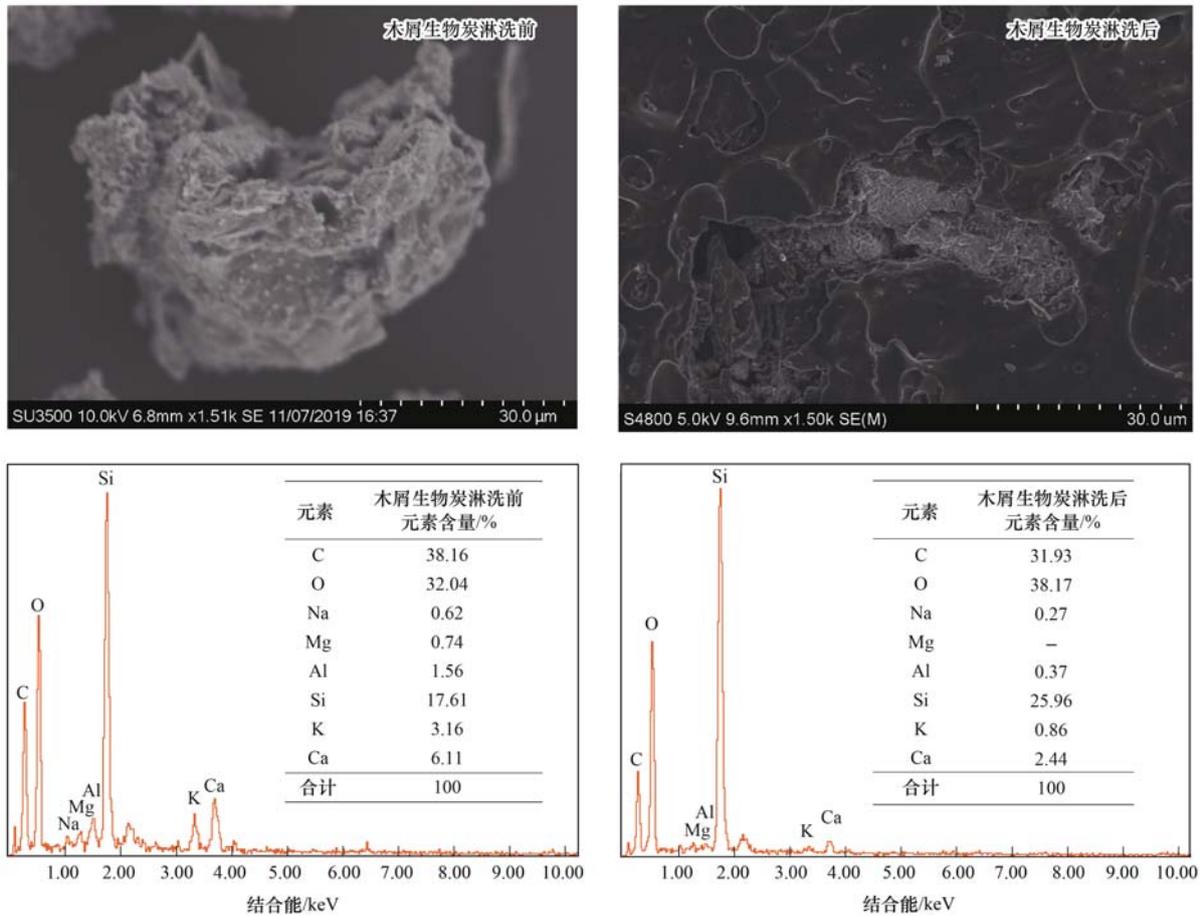


图1 木屑生物炭淋洗前后的扫描电镜与能谱图

Fig. 1 SEM and EDS images of hardwood biochar before and after leaching experiments

表2 材料在首次与整个淋洗过程中的氮素淋出量与占比

Table 2 Leaching quantities and proportions of nitrogen in the first stage and during the whole leaching process

淋洗液	材料名称	NO ₃ ⁻			NH ₄ ⁺			TN			
		总淋失量/ μmol·g ⁻¹	首次淋出量/ μmol·g ⁻¹	首次/总淋 失量/%	总淋失量/ μmol·g ⁻¹	首次淋出量/ μmol·g ⁻¹	首次/总淋 失量/%	总淋失量/ μmol·g ⁻¹	总淋失量/ 总氮含量/%	首次淋出量/ μmol·g ⁻¹	首次/总淋 失量/%
去离子水	木屑生物炭	0.389	0.214	55.08	0.251	0.157	62.50	1.314	2.63	0.729	55.43
	椰糠	65.165	45.443	69.73	36.110	21.573	59.74	122.114	6.45	75.100	61.50
	堆肥	22.178	14.429	65.06	8.980	2.304	25.66	40.971	4.59	24.100	58.82
	陶粒	0.171	0.071	41.67	0.041	0.021	51.72	0.657	0.84	0.100	15.22
	火山石	0.509	0.214	42.07	0.299	0.099	33.01	1.457	6.80	0.329	22.55
人造雨水径流	木屑生物炭	0.633	0.200	31.59	0.166	0.049	29.31	1.143	2.29	0.257	22.50
	椰糠	73.520	59.329	80.70	40.990	21.870	53.35	137.157	7.25	90.314	65.85
	堆肥	42.782	28.300	66.15	17.731	4.629	26.10	109.843	12.30	56.929	51.83
	陶粒	0.330	0.043	12.97	0.123	0.059	47.67	0.829	1.05	0.171	20.69
	火山石	0.579	0.257	44.40	0.414	0.311	75.17	1.467	6.85	0.657	44.79

失了 23 ~ 635 mg·kg⁻¹ TN^[18]; 鸡粪炭在 10 次淋洗作用下, 累计释放了 7.14 ~ 127.1 μmol·g⁻¹ TN^[19], 相较之下本研究选用的木屑生物炭氮素释放量非常低。

在人造雨水径流淋洗过程中, 木屑生物炭的氮素淋失速度减慢, 淋失量降低, NO₃⁻ 的淋失总量增加了 71%。去离子水淋洗比人造雨水径流淋洗更易流失 NH₄⁺ 和 TN: 在首轮淋洗实验中, 木屑生物炭在去离子水中比在人造雨水径流中多释放了 220% 的

NH₄⁺ 和 184% 的 TN; 经 8 次淋洗后, 木屑生物炭在去离子水中累计释放的 TN 量比在人造雨水径流中分别多出 15%, 且多出 51% 的 NH₄⁺。

2.3 磷素淋出特性分析

为评价填料是否会出现磷素的过量淋出、造成出水富营养化的问题, 本研究对淋出液中的磷素进行了检测, 材料随淋洗次数的 PO₄³⁻ 和 TP 淋出量如表 3 和图 3 所示。由于人造雨水径流中含有 3 mg·L⁻¹ PO₄³⁻ (Na₂HPO₄), 在计算该种淋洗液下的

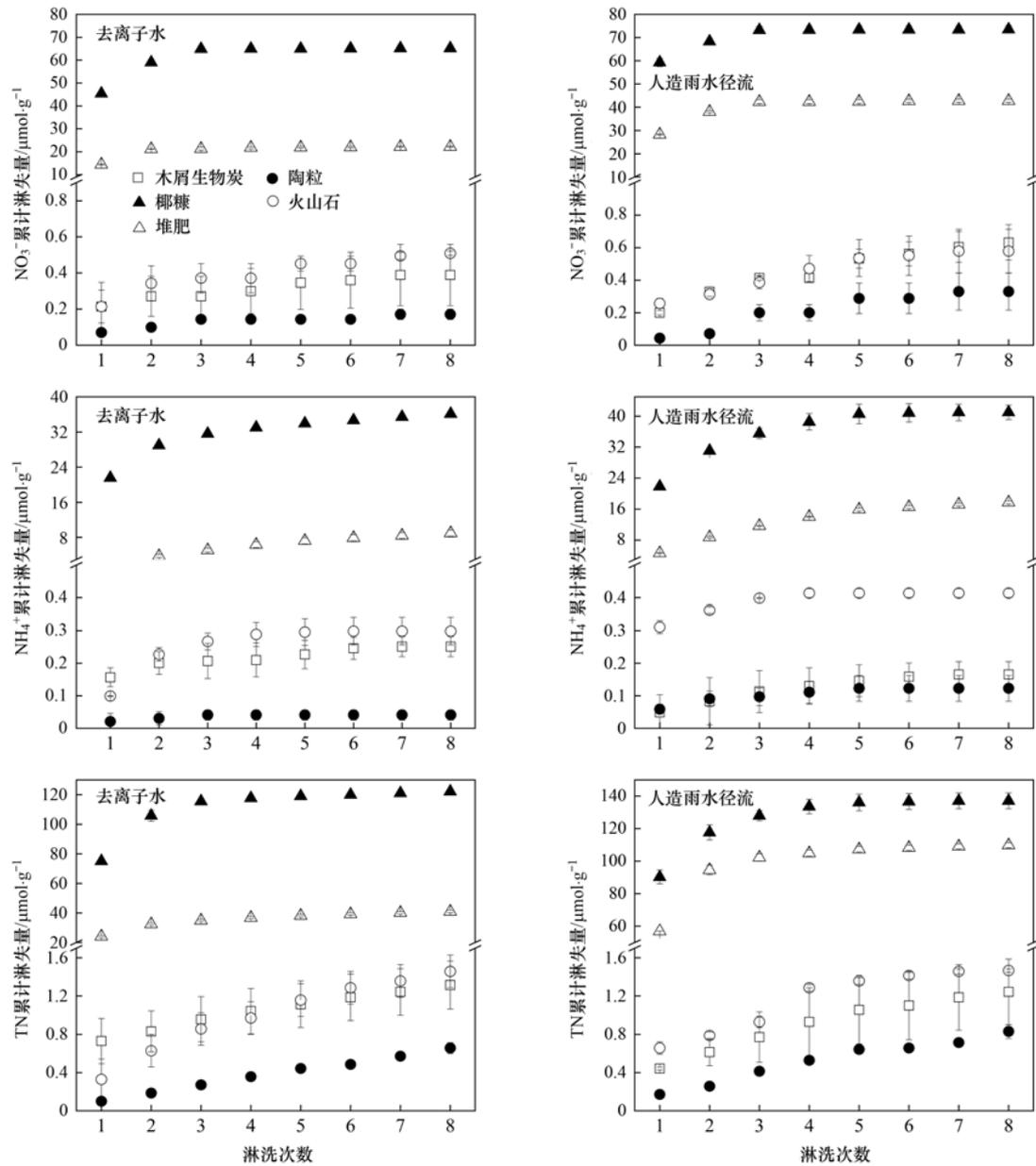


图2 木屑生物炭与对比填料的氮素累计淋失量

Fig. 2 Cumulative nitrogen leaching quantities of hardwood biochar and comparison fillers

表3 材料在首次与整个淋洗过程中的磷素淋出量与占比

Table 3 Leaching quantities and proportions of phosphorous in the first stage and during the whole leaching process

淋洗液	材料名称	PO ₄ ³⁻			TP			
		总淋失量 /μmol·g ⁻¹	首次淋出量 /μmol·g ⁻¹	首次/总淋 失量/%	总淋失量 /μmol·g ⁻¹	总淋失量/ 总磷含量/%	首次淋出量 /μmol·g ⁻¹	首次/总淋 失量/%
去离子水	木屑生物炭	7.107	0.194	2.72	8.548	0.72	0.271	3.17
	椰糠	46.093	34.400	74.63	63.432	10.85	41.239	65.01
	堆肥	34.174	13.490	39.48	41.523	9.42	16.690	40.20
	陶粒	0.000	0.000	—	0.148	0.32	0.032	21.74
	火山石	0.148	0.084	56.52	0.813	2.89	0.148	18.25
人造雨水径流	木屑生物炭	-13.67	-1.79	—	-11.51	—	-1.53	—
	椰糠	30.445	26.619	—	59.535	—	38.065	—
	堆肥	20.157	15.723	—	35.490	—	18.065	—
	陶粒	-4.869	-1.118	—	-6.077	—	-2.006	—
	火山石	-4.890	-1.191	—	-3.402	—	-0.802	—

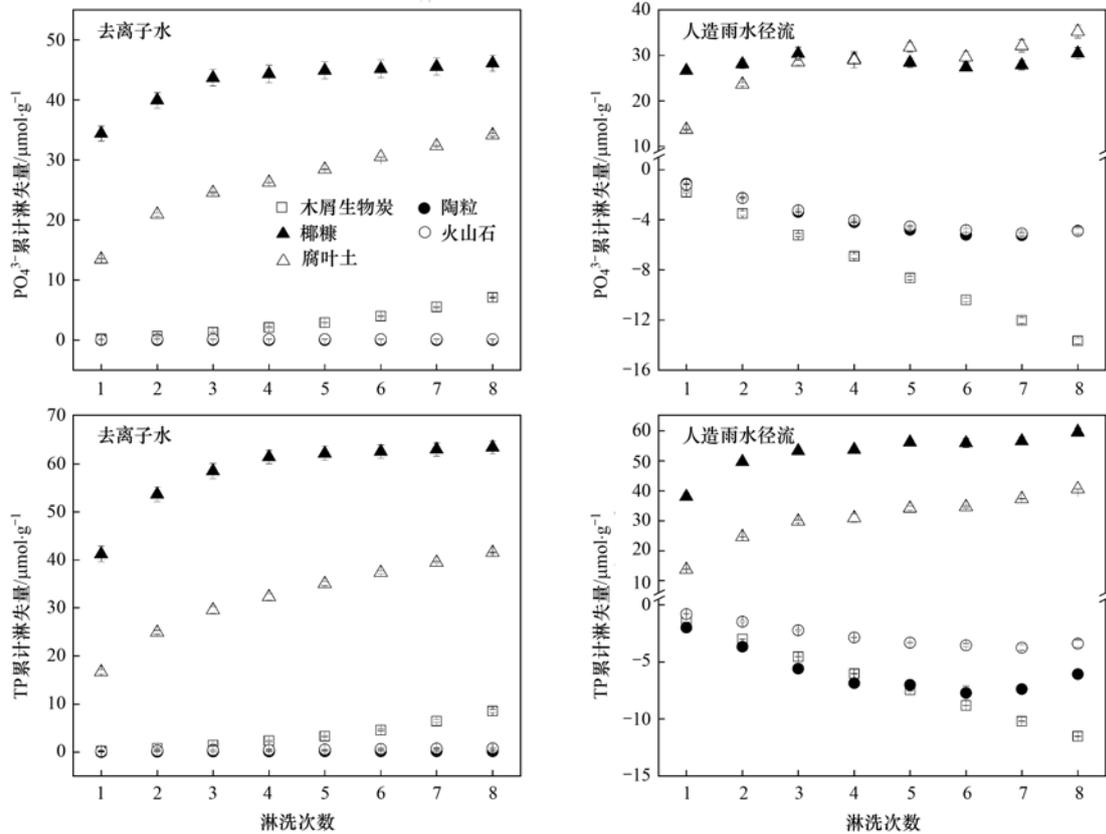


图3 木屑生物炭与对比填料的磷素累计淋失量

Fig. 3 Cumulative phosphorous leaching quantities of hardwood biochar and comparison fillers

淋出量时均减去 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ PO}_4^{3-}$, 故部分淋出结果为负值.

在去离子水的 8 次淋洗过程中, 木屑生物炭的磷素淋出量远低于椰糠和堆肥, 与陶粒和火山石接近. 木屑生物炭在 8 次淋洗中, 以几近恒定的速度持续淋失 PO_4^{3-} , 这也是热解后生物炭材料的淋洗固有点, 不同种类的生物炭包括牧草生物炭、橡木生物炭^[18]和鸡粪生物炭^[20]等都具有该特性, 也说明如果持续淋洗木屑生物炭, 在淋洗液中仍会有 PO_4^{3-} 浸出.

木屑生物炭在首次淋洗过程中, 释放了 $0.194 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{ PO}_4^{3-}$ 和 $0.271 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{ TP}$, 分别占 8 次总淋失量的 2.72% 和 3.17%, 除 PO_4^{3-} 外其他形式淋出的磷素占首轮淋出氮素的 28.41%. 尽管在去离子水中, 木屑生物炭会保持持续的磷素淋出, 但在含有 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ PO}_4^{3-}$ 的人造雨水径流中, 木屑生物炭会保持较高的吸附效率, 淋出液的 PO_4^{3-} 浓度低于 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 且随着淋洗次数的增加, 吸附能力未出现降低. 陶粒、火山石在第 5~6 轮淋洗过程中, 对淋溶液中的 PO_4^{3-} 表现出吸附饱和; 椰糠和堆肥尽管对人造雨水径流有一定的吸附效果, 但由于自身磷素淋出量较高, 其磷素淋出量在人造雨水径流淋洗实验中远高于其他材料. 这也是传统的生物滞留

池去除磷素效果不稳定的原因^[21].

在去离子水和人造雨水径流淋洗实验中, 5 种材料的淋出液均未检出铅、镉、锰、钴和镍, 故填料无重金属淋出污染的危险性.

2.4 吸附特性分析

洗净后的木屑生物炭及对比材料对 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 的吸附实验结果如图 4 和图 5 所示. 在 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NH}_4^+$ 及 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ PO}_4^{3-}$ 的典型雨水径流浓

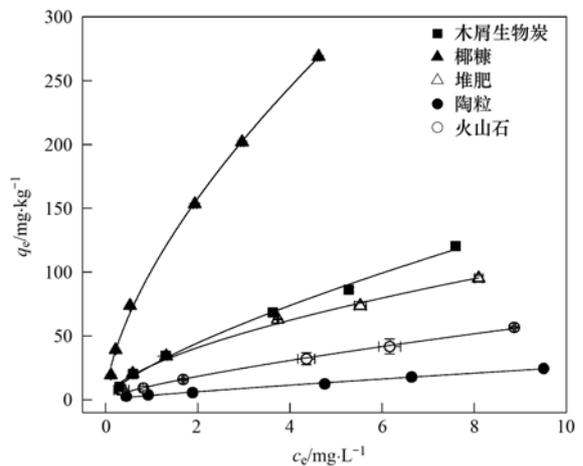


图4 木屑生物炭对比填料对 NH_4^+ 的吸附等温线

Fig. 4 Isotherm of NH_4^+ adsorption by hardwood biochar and comparison fillers

度下^[15],木屑生物炭可吸附 $34.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ NH}_4^+$ 和 $59.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ PO}_4^{3-}$.

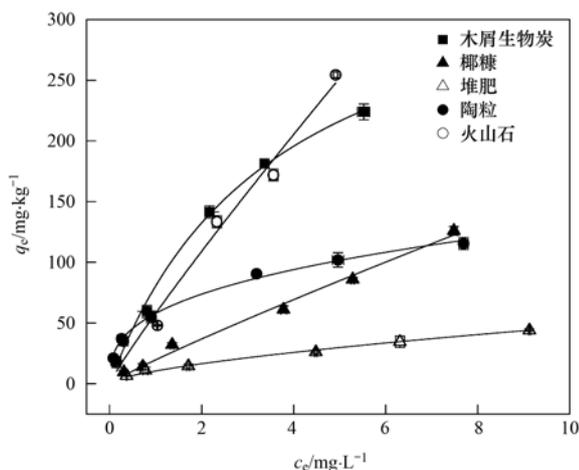


图5 木屑生物炭和对比填料对 PO_4^{3-} 的吸附等温线

Fig. 5 Isotherm of PO_4^{3-} adsorption by hardwood biochar and comparison fillers

在 NH_4^+ 吸附上,木屑生物炭的吸附能力低于椰糠,但强于其他材料:木屑生物炭比火山石多吸附 32%~123%、比陶粒多吸附 279%~517%。 NH_4^+ 的吸附主要是通过材料表面含氧官能团产生静电吸引^[22],或者依靠离子交换^[23]实现的。表1中材料的阳离子交换量大小顺序与等温吸附实验中材料对 NH_4^+ 的吸附能力大小顺序一致。椰糠表面也存在大量亲水的羟基团^[24],且阳离子交换量最大,故其 NH_4^+ 的吸附效果最好。木屑生物炭表面含有丰富的

含氧官能团包括羧基和醚键^[25]等,这些官能团中的氧原子与 NH_4^+ 中的氢原子相互吸引,可形成稳定的氢键,并且木屑生物炭阳离子交换量较高,故具有较优越的 NH_4^+ 吸附效果。

木屑生物炭在 PO_4^{3-} 的吸附上具有明显的优势,比椰糠多吸附 77%~150% 的 PO_4^{3-} ,在 $2 \sim 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 PO_4^{3-} 浓度下,木屑生物炭可吸附 $59.5 \sim 141.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 PO_4^{3-} ,是火山石的 1.05~1.25 倍、是陶粒的 1.08~1.56 倍。 PO_4^{3-} 的吸附主要是通过 2、3 价金属离子 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 和 Fe^{3+} 等) 与 PO_4^{3-} 形成沉淀或者稳固的化合物^[26]。由图 1 可知,淋洗后的木屑生物炭表面有 Ca^{2+} 和 Al^{3+} 存在,为吸附提供了条件,并且可以推测,未淋洗的木屑生物炭 PO_4^{3-} 的吸附效果更强,同时也解释了木屑生物炭在人造雨水径流中 PO_4^{3-} 的淋出量保持了稳定的负值的原因。

材料等温吸附的拟合结果如表 4 所示,其中 R^2 显示 Freundlich 和 Langmuir 模型都可以很好地拟合这 5 种材料对 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 的吸附。对木屑生物炭而言: Freundlich 模型对其吸附 NH_4^+ 拟合的吻合度更高,更适用于模拟木屑生物炭对 NH_4^+ 的吸附,这与 Ahmed 等^[16] 和 Yao 等^[27] 的研究结果一致。而 Langmuir 模型更适用于拟合木屑生物炭对 PO_4^{3-} 的吸附。在 Freundlich 模型中,木屑生物炭的特征常数倒数 $1/n$ 小于 1,且 Langmuir 模型系数 R_L 在 0~1 之间,证明其对 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 的吸附均易发生。

表 4 木屑生物炭和对比填料对 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 的吸附等温线拟合数据

Table 4 Fitting data for NH_4^+ and PO_4^{3-} adsorption by hardwood biochar and comparison fillers

营养盐	材料	Freundlich 模型			Langmuir 模型			
		$K_F/\text{mg}^{1-1/n} \cdot \text{L}^{1/n} \cdot \text{kg}^{-1}$	$1/n$	R^2	$q_{\max}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$K_L/\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$	R^2	R_L
NH_4^+	木屑生物炭	26.844	0.729	0.996	280.220	0.093	0.984	0.518~0.956
	椰糠	101.591	0.635	0.998	453.839	0.291	0.985	0.256~0.873
	堆肥	26.795	0.608	0.986	142.992	0.219	0.986	0.314~0.901
	陶粒	3.418	0.868	0.992	147.218	0.021	0.988	0.828~0.990
	火山石	10.865	0.750	0.994	152.247	0.064	0.983	0.608~0.969
PO_4^{3-}	木屑生物炭	80.500	0.623	0.984	374.176	0.274	0.995	0.267~0.879
	椰糠	19.568	0.912	0.989	1779.198	0.010	0.986	0.418~0.935
	堆肥	10.890	0.623	0.991	75.388	0.139	0.961	0.418~0.935
	陶粒	57.881	0.350	0.995	120.193	1.218	0.947	0.076~0.622
	火山石	57.865	0.914	0.979	3175.061	0.017	0.977	0.174~0.808

木屑生物炭及对比材料吸附 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 后用去离子水作为解吸剂来使已吸附的 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 解吸出来。各材料的平均解吸率如表 5 所示。木屑生物炭对不同浓度 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 在去离子水中的平均解吸率分别为 21.23% 和 17.43%,均低于其他对比材料。由此可看出,木屑生物炭对 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 的吸附效果稳定,已吸附的 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 不易被再

表 5 木屑生物炭和对比填料对 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 的平均解吸率

Table 5 Average desorption rate of NH_4^+ and PO_4^{3-} by hardwood biochar and comparison fillers

材料	平均解吸率/%	
	NH_4^+	PO_4^{3-}
木屑生物炭	21.23	17.43
椰糠	45.74	76.30
堆肥	68.92	74.32
陶粒	45.23	63.02
火山石	35.23	58.24

次洗出,故其适宜作为生物滞留系统填料。

3 结论

(1)木屑生物炭在热解过程中产生了丰富的喉道、孔隙,其孔隙比和比表面积均高于对比材料,故其饱和含水率即持水性能较优;木屑生物炭的阳离子交换量高、表面有金属矿物质附着,为营养盐的吸附提供了条件。

(2)木屑生物炭在 8 次去离子水的淋洗中,共计淋出 $0.389 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1} \text{NO}_3^-$ 、 $0.251 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1} \text{NH}_4^+$ 、 $1.314 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1} \text{TN}$ 、 $7.107 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1} \text{PO}_4^{3-}$ 和 $8.548 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1} \text{TP}$,淋出量低。木屑生物炭氮素的淋失速度快、磷素淋失慢且有持续淋出,但雨水径流会阻缓且降低营养盐的淋失。

(3)木屑生物炭在 $2 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{NH}_4^+$ 及 $2 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{PO}_4^{3-}$ 的典型雨水径流浓度中,可以吸附 $34.6 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{NH}_4^+$ 和 $59.5 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{PO}_4^{3-}$ 。木屑生物炭通过其含氧官能团与 NH_4^+ 中的氢原子形成氢键及离子交换实现 NH_4^+ 的吸附,其表面的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 与 PO_4^{3-} 形成沉淀或化合物致使 PO_4^{3-} 浓度降低。在去离子水中,木屑生物炭解吸率低,吸附效果稳定。

参考文献:

- [1] Nika C E, Vasilaki V, Expósito A, *et al.* Water cycle and circular economy: Developing a circularity assessment framework for complex water systems [J]. *Water Research*, 2020, **187**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116423.
- [2] 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.
- [3] Grebel J E, Mohanty S K, Torkelson A A, *et al.* Engineered infiltration systems for urban stormwater reclamation [J]. *Environmental Engineering Science*, 2013, **30**(8): 437-454.
- [4] Hernández-Apaolaza L, Guerrero F. Comparison between pine bark and coconut husk sorption capacity of metals and nitrate when mixed with sewage sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(6): 1544-1548.
- [5] González A P S, Firmino M A, Nomura C S, *et al.* Peat as a natural solid-phase for copper preconcentration and determination in a multicommuted flow system coupled to flame atomic absorption spectrometry [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2009, **636**(2): 198-204.
- [6] Li P, Lang M, Li C L, *et al.* Nutrient leaching from soil amended with manure and compost from cattle fed diets containing wheat dried distillers' grains with solubles [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2016, **227**(10), doi: 10.1007/s11270-016-3094-6.
- [7] Jiang C B, Li J K, Li H E, *et al.* An improved approach to design bioretention system media [J]. *Ecological Engineering*, 2019, **136**, doi: 10.1016/j.ecoleng.2019.06.014.
- [8] Cai M, Li F C, Chen S H, *et al.* The adsorption effect of three minerals on chemical oxygen demand, total nitrogen, total phosphorus and heavy metals in biogas slurry [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, **199**(4), doi: 10.1088/1755-1315/199/4/042034.
- [9] Lin H H, Ma R, Lin J H, *et al.* Positive effects of zeolite powder on aerobic granulation; nitrogen and phosphorus removal and insights into the interaction mechanisms [J]. *Environmental Research*, 2020, **191**, doi: 10.1016/j.envres.2020.110098.
- [10] 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**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.02.129.
- [11] Knicker H. "Black nitrogen"-an important fraction in determining the recalcitrance of charcoal [J]. *Organic Geochemistry*, 2010, **41**(9): 947-950.
- [12] Reddy K R, Yaghoubi P, Yukselen-Aksoy Y. Effects of biochar amendment on geotechnical properties of landfill cover soil [J]. *Waste Management & Research*, 2015, **33**(6): 524-532.
- [13] 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.
- [14] Liu J Y, Davis A P. Phosphorus speciation and treatment using enhanced phosphorus removal bioretention [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(1): 607-614.
- [15] Hsieh C H, Davis A P. Evaluation and optimization of bioretention media for treatment of urban storm water runoff [J]. *Journal Of Environmental Engineering*, 2005, **131**(11), 1521-1531.
- [16] Ahmed Z, Kim K P, Shin J. Kinetic, thermodynamic, and equilibrium studies for adsorption of ammonium ion on modified polyurethane [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, **57**(32): 14849-14857.
- [17] 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.
- [18] Mukherjee A, Zimmerman A R. Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar-soil mixtures [J]. *Geoderma*, 2013, **193-194**: 122-130.
- [19] 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.
- [20] Wang Y, Lin Y X, Chiu P C, *et al.* Phosphorus release behaviors of poultry litter biochar as a soil amendment [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **512-513**: 454-463.
- [21] 李海燕, 罗艳红, 马玲. 生物滞留设施对地表径流中磷去除效果的研究述评 [J]. *中国水土保持*, 2014, (6): 26-31.
- [22] 陈友媛, 李培强, 李闲驰, 等. 浒苔生物炭对雨水径流中氨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.
- [23] Li S M, Barreto V, Li R W, *et al.* Nitrogen retention of biochar derived from different feedstocks at variable pyrolysis temperatures [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2018, **133**: 136-146.
- [24] 戎泽, 白波, 王洪伦, 等. 天然椰糠粉增强陕西委土持水性研究 [J]. *应用化工*, 2017, **46**(5): 902-906, 915. Rong Z, Bai B, Wang H L, *et al.* Enhanced performance of natural coconut powder for the water retention capacity of Shaanxi

- Lou soil[J]. Applied Chemical Industry, 2017, 46(5): 902-906, 915.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Yao Y, Gao B, Inyang M, *et al.* Removal of phosphate from aqueous solution by biochar derived from anaerobically digested sugar beet tailings[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 190(1-3): 501-507.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjcx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:
期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@cees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing, from 2014 to 2020	CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)
High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, FAN Li-hang, <i>et al.</i> (4083)
Impacts of Anthropogenic Emission Reduction and Meteorological Conditions on PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of Beijing-Tianjin-Hebei in Winter	SHAO Xuan-yi, WANG Xiao-qi, ZHONG Yi-sheng, <i>et al.</i> (4095)
Influence of Pollutant Transport from Both Sides of the Taihang Mountains on Cross-Valley Urban Aerosols	WANG Yan, GUO Wei, YAN Shi-ming, <i>et al.</i> (4104)
Variation Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in Winter in Jiashan	ZHANG Ying-long, LI Li, WU Wei-chao, <i>et al.</i> (4116)
Simulation Analysis of the Impact of COVID-19 Pandemic Control on Air Quality in Henan Province based on Machine Learning Algorithm	WEI Yu, XU Qi-xiang, ZHAO Jin-shuai, <i>et al.</i> (4126)
Seasonal Variation, Source Identification, and Health Risk of PM _{2.5} -bound Metals in Xinxiang	LIU Huan-jia, JIA Meng-ke, LIU Yong-li, <i>et al.</i> (4140)
Distribution Characteristics and Seasonal Variations of Arsenic in Atmospheric Aerosols over the Yellow Sea and Bohai Sea	YUAN Shuai, WANG Yan, LIU Ru-hai, <i>et al.</i> (4151)
Extinction Characteristics of Aerosols and the Contribution of Pollution Sources to Light Extinction During Three Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2020 in Tianjin	LI Li-wei, XIAO Zhi-mei, YANG Ning, <i>et al.</i> (4158)
Spatial Variation of Surface Ozone Concentration During the Warm Season and Its Meteorological Driving Factors in China	HE Chao, MU Hang, YANG Lu, <i>et al.</i> (4168)
Exploring Characteristics and Causes of Summer Ozone Pollution Based on Process Analysis in Wuhai	ZHANG Rui-xin, CHEN Qiang, XIA Jia-qi, <i>et al.</i> (4180)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric VOCs in the Coastal Background of the Pearl River Delta	YUN Long, LI Cheng-liu, ZHANG Ming-di, <i>et al.</i> (4191)
Hydrochemical Characteristics and Factors of Surface Water and Groundwater in the Upper Yongding River Basin	KONG Xiao-le, YANG Yong-hui, CAO Bo, <i>et al.</i> (4202)
Temporal and Spatial Variations in Water Quality of Hanjiang River and Its Influencing Factors in Recent Years	CHENG Bing-fen, ZHANG Yuan, XIA Rui, <i>et al.</i> (4211)
Pollution Level, Distribution Characteristic, and Ecological Risk Assessment of Environmentally Persistent Pharmaceutical Pollutants in Surface Water of Jiangsu Province	ZHAO Mei-mei, FAN De-ling, GU Wen, <i>et al.</i> (4222)
Spatial and Temporal Distribution and Pollution Evaluation of Soluble Heavy Metals in Liujiang River Basin	ZHANG Wan-jun, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4234)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater of Leizhou Peninsula	SHI Huan-huan, PAN Yu-jie, ZENG Min, <i>et al.</i> (4246)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements in Groundwater of Longzici Spring Area	XIE Hao, LIANG Yong-ping, LI Jun, <i>et al.</i> (4257)
Seasonal Variation and Sources Identification of Dissolved Sulfate in a Typical Karst Subterranean Stream Basin Using Sulfur and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LAN Gan-jiang, <i>et al.</i> (4267)
Phosphorus Fractions and Quantitative Identification of Pollution Sources in Nanhai Wetland, Baotou	BAI Ya-hong, QIAN Chen-ge, YUAN Si-jing, <i>et al.</i> (4275)
Release Risk of Phosphorus by Sediments and Its Influencing Factors in Ponds and Ditches of a New Urban District Park	LI Ru-zhong, SONG Min, YANG Ji-wei (4287)
Effect of Hydraulic Residence Time on Removal Efficiency of Pollutants in Subsurface Flow Constructed Wetlands and Analysis of Denitrification Mechanism	QI Ran, ZHANG Ling, YANG Fan, <i>et al.</i> (4296)
Enhanced Removal of Pollutants in Constructed Wetlands with Manganese Sands	MA Quan, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (4304)
Application Effect of Four Typical Submerged Macrophytes on Removing Cadmium from Polluted Sediment	TAO Li, WANG Pei-fang, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i> (4311)
Structure of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Response to Dissolved Organic Matter in Baiyangdian Lake During the Water Delivery Period	ZHOU Shi-lei, ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (4319)
Nitrogen and Phosphorus Leaching Characteristics and Adsorption Properties of Hardwood Biochar in Stormwater Runoff	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue (4332)
Indicator Function of Ragworm (Nereididae) on Sediment Microplastic in Haizhou Bay Intertidal Zone	WANG Jia-xuan, SONG Ke-xin, SUN Yi-xin, <i>et al.</i> (4341)
Antagonistic Effect and Mechanism of Nano Titanium Dioxide and Cadmium on the Growth of <i>Scenedesmus obliquus</i>	WANG Pu, ZHAO Li-hong, ZHU Xiao-shan (4350)
Mutual Influence Between Microbial Community, Wastewater Characteristics, and Antibiotic Resistance Genes During Spiramycin Production Wastewater Treatment	WU Cai-yun, LI Hui-li, QIN Cai-xia, <i>et al.</i> (4358)
Effect of Chelated Iron on Nitrogen Removal Efficiency and Microbial Community Structure in the Anaerobic Ferric Ammonium Oxidation	LIAO Hong-yan, SONG Cheng, WAN Liu-yang, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Dissolved Oxygen on Nutrient Removal Performance and Microbial Community in Low Carbon/Nitrogen Municipal Wastewater Treatment Process	CHI Yu-lei, SHI Xuan, REN Tong, <i>et al.</i> (4374)
Shortening SRT of Intermittent Gradient Aeration to Realize Nitrogen and Phosphorus Removal in Short-range SNEDPR System	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (4383)
Characteristics of Partial Denitrification in Biofilm System	YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, ZHANG Qiong, <i>et al.</i> (4390)
Effect of Anaerobic Plug-flow on Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Aerobic Granular Sludge with Intermittent Aeration	LI Dong, CAO Si-yu, WANG Qi, <i>et al.</i> (4399)
Combining Different Aerobic/Anoxic Durations with Zoned Sludge Discharge to Optimize Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules in Domestic Sewage	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (4406)
Meta-analysis of the Effects of Metal Mining on Soil Heavy Metal Concentrations in Southwest China	ZHANG Jian-lin, QU Ming-kai, CHEN Jian, <i>et al.</i> (4414)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau	DU Hao-lin, WANG Ying, WANG Jin-song, <i>et al.</i> (4422)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Cadmium Pollution in Soil-crops system of an E-waste Dismantling Area	ZHANG Lu-yao, ZHAO Ke-li, FU Wei-jun (4432)
Characteristics of Modified Biochars and Their Immobilization Effect on Cu and Cd in Polluted Farmland Soil Around Smelter	WANG Xin-yu, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, <i>et al.</i> (4441)
Combined Effects of Soil Amendment and Zinc Fertilizer on Accumulation and Transportation of Cadmium in Soil-Rice System	ZHOU Kun-hua, ZHOU Hang, WANG Zi-yu, <i>et al.</i> (4452)
Effects of Different Soil Conditioners on Rice Growth and Heavy Metal Uptake in Soil Contaminated with Copper and Cadmium	WEI Wei, LI Ping, LANG Man (4462)
Isolation and Identification of the Plant Endophyte R-13 and Its Effect on Cadmium Accumulation in <i>Solanum nigrum</i> L.	PANG Jie, LIU Yue-min, HUANG Yong-chun, <i>et al.</i> (4471)
Response of Soil Archaeal Community to Heavy Metal Pollution in Different Typical Regions	LI Yu-tong, YANG Shan, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4481)
High-throughput Sequencing Analysis of Soil Bacterial Community in the Grain for Green Project Areas of the Loess Plateau	LIU Xiao-hua, WEI Tian-xing (4489)
Experimental Influence of Food Waste Fermentation Broth on the Soil Quality in a Loess Hilly Area	SHAO Li-ming, REN Jun-da, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4500)
Stability of Soil Aggregates at Different Altitudes in Qinling Mountains and Its Coupling Relationship with Soil Enzyme Activities	MA Huan-fei, HU Han, LI Yi, <i>et al.</i> (4510)
Reactivation of Passivated Biochar/Nanoscale Zero-Valent Iron by an Electroactive Microorganism for Cooperative Hexavalent Chromium Removal and Mechanisms	LIAO Cong-jian, ZHAO Xiao-lei, LIU Kai, <i>et al.</i> (4520)
Influence of Precipitation Change on Soil Respiration in Desert Grassland	HAO Lian-yi, ZHANG Li-hua, XIE Zhong-kui, <i>et al.</i> (4527)
Effects of Nitrogen Fertilizer Application Times and Nitrification Inhibitor on N ₂ O Emission from Potted Maize	FU Pei-jiao, JI Heng-kuan, HE Qiu-xiang, <i>et al.</i> (4538)
Gaseous Nitrogen Emission from Soil After Application of NH ₄ ⁺ -N Loaded Biochar	MA Xiao-gang, HE Jian-qiao, CHEN Yu-lan, <i>et al.</i> (4548)
Effects of Microplastics Addition on Soil Organic Carbon Mineralization in Citrus Orchard	ZHANG Xiu-ling, YAN Zi-wei, WANG Feng, <i>et al.</i> (4558)
Dynamic Material Flow Analysis of Perfluorooctane Sulfonate in China, 1985-2019	WANG Jia-yu, CHEN Jing-wen, TANG Wei-hao, <i>et al.</i> (4566)