

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第7期

Vol.39 No.7

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

近 20 年来中国典型区域 PM _{2.5} 时空演变过程	罗毅, 邓琼飞, 杨昆, 杨扬, 商春雪, 喻臻钰 (3003)
西安市 PM _{2.5} 健康损害价值评估	魏国茹, 史兴民 (3014)
河北香河亚微米气溶胶组分特性、来源及其演变规律分析	江琪, 王飞, 孙业乐 (3022)
南京北郊秋季 PM _{2.5} 碳质组分污染特征及来源分析	徐足飞, 曹芳, 高嵩, 鲍孟盈, 石一凡, 章炎麟, 刘晓妍, 范美益, 张雯淇, 卞航, 刘寿东 (3033)
临安夏季霾和清洁天气 PM _{2.5} 化学组成特征比较	梁林林, 孙俊英, 张养梅, 刘畅, 徐婉筠, 张根, 刘旭艳, 马千里 (3042)
盘锦市秋冬季节 PM _{2.5} 中碳组分特征及来源解析	张蕾, 姬亚芹, 张军, 王士宝, 李越洋, 赵静琦, 张伟 (3051)
南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应	黄聪聪, 马嫣, 郑军 (3057)
夏季青岛大气粗细粒子中微量元素的浓度、溶解度及干沉降通量	李鹏志, 李茜, 石金辉, 高会旺, 姚小红 (3067)
太原市夏季降水中溶解态重金属特征及来源	叶艾玲, 程明超, 张璐, 何秋生, 郭利利, 王新明 (3075)
杭州地区大气 CO ₂ 体积分数变化特征及影响因素	浦静姣, 徐宏辉, 姜瑜君, 杜荣光, 齐冰 (3082)
典型工业源 VOCs 治理现状及排放组成特征	景盛翱, 王红丽, 朱海林, 杨强, 卢滨, 夏阳, 余传冠, 陶士康, 李莉, 楼晟荣, 黄成, 唐伟, 井宝莉 (3090)
地级市域工业 VOCs 排放源产排特性及其控制技术应用现状: 以秦皇岛市为例	胡旭睿, 虎啸宇, 王灿 (3096)
青霉素发酵尾气 VOCs 污染特征及健康风险评价	郭斌, 么瑞静, 张硕, 马磊, 康江, 王姗姗 (3102)
轻型汽油车尾气 OC 和 EC 排放因子实测研究	黄成, 胡馨遥, 鲁君 (3110)
南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价	田春晖, 杨若杼, 古丽扎尔·依力哈木, 钱新, 王金花, 李慧明 (3118)
西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析	石栋奇, 卢新卫 (3126)
三峡库区主要河流秋季 pCO ₂ 及其影响因素	罗佳宸, 毛蓉, 李思悦 (3134)
泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素	寇永朝, 华琨, 李洲, 李志 (3142)
生物滞留对城市地表径流磷的去除途径	李立青, 刘雨倩, 杨佳敏, 王娟 (3150)
淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系	杨丽, 张玮, 尚光霞, 张军毅, 王丽卿, 魏华 (3158)
抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系	李蕊, 陈光杰, 康文刚, 陈丽, 王教元, 陈小林, 刘园园, 冯钟, 张涛 (3168)
蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响	王永平, 谢瑞, 晁建颖, 姬昌辉, 于剑 (3179)
生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响	徐德福, 潘潜澄, 李映雪, 陈晓艺, 王佳俊, 周磊 (3187)
Mn-Co/蜂窝陶瓷催化剂制备及催化臭氧化对苯二酚效能	张兰河, 高伟国, 陈子成, 张海丰, 王旭明 (3194)
Fe/Cu 双金属活化过一硫酸盐降解四环素的机制	李晶, 鲍建国, 杜江坤, 冷一非, 孔淑琼 (3203)
铈酸盐改性钛酸纳米片对水中 Cd(II) 的吸附行为及机制	康丽, 刘文, 刘晓娜, 刘宏芳, 李一菲 (3212)
铁锰原位氧化产物吸附微量磷的实验	蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 董杨, 刘文哲 (3222)
制备方法对铁钛复合氧化物磷吸附性能的影响: 共沉淀法与机械物理混合法	仲艳, 王建燕, 陈静, 张高生 (3230)
电导率对厌氧产酸、正渗透与微生物燃料电池耦合工艺运行性能的影响	陆宇琴, 刘金梦, 王新华, 李秀芬, 李晔 (3240)
不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的 COD 需求	李冬, 曹美忠, 郭跃洲, 梅宁, 李帅, 张杰 (3247)
基质浓度对 ABR 反应器 SAD 协同脱氮除碳效能影响	张敏, 姜滢, 汪瑶琪, 韦佳敏, 陈重军, 沈耀良 (3254)
采用含硫铁化学污泥作为反硝化电子供体进行焦化废水中总氮深度去除	付炳炳, 潘建新, 马景德, 王丰, 吴海珍, 韦朝海 (3262)
间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性	高春娣, 孙大阳, 安冉, 赵楠, 焦二龙, 祝海兵 (3271)
基于高通量测序的 SBR 反应器丝状膨胀污泥菌群分析	洪颖, 姚俊芹, 马斌, 徐双, 张彦江 (3279)
纳米零价铁 (NZVI) 对厌氧产甲烷活性、污泥特性和微生物群落结构的影响	苏润华, 丁丽雨, 任洪强 (3286)
气水比对后置固相反硝化滤池工艺脱氮及微生物群落影响	张千, 吉芳英, 付旭芳, 陈晴空 (3297)
活性污泥胞外多聚物提取方法的比较	孙秀玥, 唐珠, 杨新萍 (3306)
耐冷嗜碱蒙氏假单胞菌 H97 的鉴定及其好氧反硝化特性	蔡茜, 何腾霞, 冶青, 李振轮 (3314)
PFOS 前体物质 (PreFOSs) 降解菌的分离鉴定及其降解特性	赵淑艳, 周涛, 王博慧, 梁田坤, 柳丽芬 (3321)
采油井场土壤微生物群落结构分布	蔡萍萍, 宁卓, 何泽, 张敏, 石建省 (3329)
铜尾矿坝不同恢复年限土壤理化性质和酶活性的特征	王瑞宏, 贾彤, 曹苗文, 柴宝峰 (3339)
广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险	郭颖, 李玉冰, 薛生国, 廖嘉欣, 王琼丽, 吴川 (3349)
邻苯二甲酸酯在重庆市城市土壤中的污染分布特征及来源分析	杨志豪, 何明靖, 杨婷, 卢俊峰, 魏世强 (3358)
成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素	李珊, 李启权, 王昌全, 张浩, 肖怡, 唐嘉玲, 代天飞, 李一丁 (3365)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的相关性	赵晶晶, 贡璐, 安申群, 李杨梅, 陈新 (3373)
塔里木盆地北缘绿洲 4 种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系	安申群, 贡璐, 李杨梅, 陈新, 孙力 (3382)
高原喀斯特土壤有机碳短期稳定的温度作用机制	唐国勇, 张春华, 刘方炎, 马艳 (3391)
施硼对水稻幼苗吸收和分泌砷的影响	朱毅, 孙国新, 陈正, 胡莹, 郑瑞伦 (3400)
不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析	胡雪芳, 田志清, 梁亮, 陈俊德, 张志民, 朱祥民, 王士奎 (3409)
南京大气臭氧浓度的季节变化及其对主要作物影响的评估	赵辉, 郑有飞, 魏莉, 关清 (3418)
三峡库区涪陵和忠县两地居民发汞含量水平及影响因素分析	程楠, 谢青, 樊宇飞, 王永敏, 张成, 王定勇 (3426)
人粪便好氧堆肥过程中典型抗生素的消减特性	时红蕾, 王文昌, 李倩 (3434)
COD/SO ₄ ²⁻ 对青霉素菌渣厌氧消化影响	强虹, 李玉友, 裴梦富 (3443)
果蔬类垃圾主发酵堆肥产物储放和利用的恶臭释放特征	何品晶, 蒋宁玲, 徐贤, 韦顺艳, 邵立明, 吕凡 (3452)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田 NH ₃ 挥发的影响	庞炳坤, 张敬沙, 吴杰, 李志琳, 蒋静艳 (3460)
《环境科学》征订启事 (3141) 《环境科学》征稿简则 (3202) 信息 (3229, 3433, 3451)	

生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响

徐德福^{1,2,3}, 潘潜澄^{1,2}, 李映雪¹, 陈晓艺^{1,2}, 王佳俊^{1,2}, 周磊^{1,2}

(1. 大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 3. 江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室, 南京 210044)

摘要: 构建了菖蒲人工湿地, 通过向人工湿地中加入小麦秸秆生物炭、芦苇生物炭及木屑生物炭以研究生物炭对人工湿地中植物根系形态、溶解氧及净化能力的影响。结果表明, 加入 3 种生物炭能显著增加人工湿地中菖蒲根的总根长、总投影面积、总体积、总表面积、根尖数、分枝数和根干重以及人工湿地中的溶解氧含量 ($P < 0.05$); 其中加入木屑生物炭后, 菖蒲根的根长、投影面积、表面积、总体积、根尖数、分枝数和根干重分别增加了 96.1%、106.2%、185.6%、172.5%、75.3%、121.5% 和 84.9%。加入生物炭后, 菖蒲根系形态与人工湿地中溶解氧含量、总氮去除率、总磷去除率和 COD 去除率间均显著正相关 ($P < 0.05$)。在水力负荷 $0.022 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 时, 加入木屑生物炭显著增加了人工湿地对总氮、总磷和 COD 的去除率 ($P < 0.05$)。木屑炭有效地促进了人工湿地中植物根系的生长, 增加了人工湿地溶解氧含量, 提高了人工湿地的净化能力。

关键词: 生物炭; 人工湿地; 净化能力; 湿地植物; 溶解氧

中图分类号: X171; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)07-3187-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201712072

Effect of Biochar on Root Morphological Characteristics of Wetland Plants and Purification Capacity of Constructed Wetland

XU De-fu^{1,2,3}, PAN Qian-cheng^{1,2}, LI Ying-xue¹, CHEN Xiao-yi^{1,2}, WANG Jia-jun^{1,2}, ZHOU Lei^{1,2}

(1. Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Nanjing 210044, China)

Abstract: A constructed wetland with *Acorus calamus* L. was built. Straw biochar, reed biochar, and sawdust biochar was added into the constructed wetland individually to study the effect of different biochars on the root morphology, dissolved oxygen, and purification ability of the constructed wetland. The results show that the total root length, total projection area, total volume, total surface area, root number, branch number, and root dry weight of *Acorus calamus* L. significantly increased when all three kinds of biochar were added into the constructed wetland ($P < 0.05$). Similarly, adding the biochars into the constructed wetland also significantly increased dissolved oxygen content in the wetland ($P < 0.05$). Addition of sawdust biochar into the constructed wetland increased the root length, projection area, surface area, total volume, number of root tips, number of branches, and root dry weight of *Acorus calamus* L. by 96.1%, 106.2%, 185.6%, 172.5%, 75.3%, 121.6%, and 84.9%, respectively. After adding biochars into the constructed wetland, the root morphology of *Acorus calamus* L. and dissolved oxygen content was significantly correlated with removal rate of TN, TP, and COD, respectively. Addition of sawdust biochar into the constructed wetland significantly increased the removal rates of total nitrogen, total phosphorus, and COD when the hydraulic load was $0.022 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ($P < 0.05$). These results suggested that the addition of sawdust biochar to the constructed wetland increased the root growth of *Acorus calamus* L. and enhanced dissolved oxygen content, resulting in purification capacity of the constructed wetland.

Key words: biochar; constructed wetlands; purification capacity; wetland plants; dissolved oxygen

人工湿地由基质、植物和微生物等组成, 并利用物理、化学和生物的协同作用, 通过过滤、吸附、沉淀、离子交换、植物吸收和微生物分解等作用来实现对污水的高效净化^[1]。人工湿地的基质可以支持植物生长并且为微生物提供附着场所。生物炭 (biochar) 是指生物质在无氧或限氧条件下, 通过热解形成的一种含碳量丰富、性质稳定的产物^[2]。目前, 生物炭在土壤改良应用方面越来越广^[3,4]。

在环境治理方面, 生物炭多孔的结构和较大的

比表面积, 使其与活性炭一样可被用来作为净化污水的吸附剂^[5], 以降低污水中的氨氮和磷酸盐含量^[6], 并将其转化为植物生长所需的氮、磷元素^[7]。段婧婧等^[8]报道, 加入生物炭可以降低污水 TN 浓度并有效利用污水中的氮、磷元素, 以提高水芹产

收稿日期: 2017-12-09; 修订日期: 2018-01-09

基金项目: 江苏省自然科学基金项目 (BK20141477); 教育部留学回国人员科研启动基金项目 (2014S048); 江苏高校“青蓝工程”项目 (20161507); 江苏省“六大人才高峰”项目 (JNHB-057)

作者简介: 徐德福 (1975 ~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为污染水体生态修复, E-mail: defuxu1@163.com

量. 另外,生物炭已用于人工湿地以提高人工湿地的净化能力,如生物炭可显著提高垂直流人工湿地对污水的净化效率^[9]. 唐美珍等^[10]的研究表明,用生物炭固定化的 *Pseudomonas flava* WD-3 可提高冬季人工湿地的净化能力,其对 COD、氨氮和 TP 的去除率分别为游离菌的 1.03、1.15 和 1.14 倍. 卢少勇等^[11]的研究发现生物炭在人工湿地中既可以吸附氨氮,也可以为反硝化提供碳源. 然而有关生物炭对湿地植物根系生长的影响等鲜见报道. 为此,本文将生物炭加入人工湿地以研究生物炭对湿地植物根系形态及溶解氧的影响,以期生物炭在人工湿地中的应用提供理论基础.

1 材料与方法

1.1 实验材料

本实验中所用的生物炭为市售小麦秸秆、芦苇和木屑生物炭;细砂购自建材市场,细砂为 0~0.3 mm、0.3~1 mm、1~2 mm、2~3 mm 和 >3 mm 的粒径百分比分别是 32%、26%、7%、10% 和 25%. 菖蒲取自南京信息工程大学校园池塘;实验用水模拟生活污水,由磷酸二氢钾、葡萄糖、氯化铵和硝酸钾等配置而成,其水质指标如表 1 所示.

表 1 实验进水水质指标

Table 1 Quality of the influent water

水质指标	COD	铵态氮	总氮
浓度范围/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	330.6~397.5	16.2~29.2	16.8~32.7

1.2 人工湿地设计

人工湿地由 2 个花盆组成(图 1),其中外盆直径 30 cm,高 16 cm,底部有凸起;内盆底部直径 20 cm,且有 4 个直径为 1 cm 的孔洞,顶部直径 28 cm,高 30 cm,外盆和内盆中的水可通过内盆底部孔洞自由交换. 将 3 种生物炭(小麦秸秆生物炭、芦苇生物炭和木屑生物炭)分别与细砂按 1:9(体积比)的比例混合均匀,混合后的基质为细砂+秸秆炭、细砂+芦苇炭和细砂+木屑炭. 分别将混合后的 3 种基质 7 L 放置于内盆中,同时将 1 L 基质装入根袋中,并在根袋中插入带孔的 PVC 管(PVC 管材直径 5 cm,长 20 cm,每隔 5 cm 钻孔,图 1),然后将根袋放入内盆基质中构成人工湿地. 另外设对照(CK)处理,即内盆和根袋中只放细砂,未放生物炭. 在每个人工湿地根袋中种植长度约为 10 cm 的菖蒲幼苗 2 株,种植密度 $33\text{株}\cdot\text{m}^{-2}$. 每种人工湿地设 3 次重复.

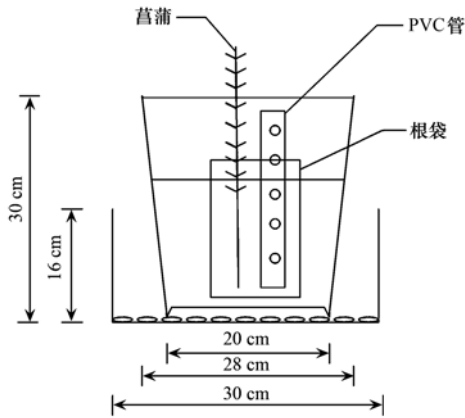


图 1 模拟人工湿地示意

Fig. 1 Schematic of the constructed wetland

人工湿地于 2017 年 5 月建立,并加入污水运行,在运行期间,每隔 1 周加入 1 次污水以确保菖蒲正常生长. 在 10 月 20 日,加入污水 8 L,然后在加入污水后的第 2、4 和 6 d[相当于水力负荷 0.06、0.03 和 $0.02\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$]测定人工湿地 PVC 管中的溶解氧含量,并分别取样分析污水中氨氮、总氮、总磷及 COD 含量. 11 月 3 日,将根袋从盆中取出,然后将根系从根袋中取出并分析根系形态和生物量.

1.3 分析方法

水样中铵态氮采用水杨酸分光光度法测定,总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,总磷采用钼酸铵分光光度法测定, COD 采用重铬酸钾氧化法测定,具体方法参考文献[12]. 人工湿地溶解氧含量采用溶解氧仪(上海雷磁 JPB-607A)测定. 菖蒲的总根长、总根投影面积、总根表面积、总根体积、总根尖数和分枝数用加拿大 Regent 公司的 WinRHIZO 根系分析系统分析.

污染物去除率的计算公式^[13]为:

$$\text{去除率} = \frac{(c_0 - c_t)}{c_0} \times 100\%$$

式中, c_0 为初始污染物浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; c_t 为 t 天后污染物浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

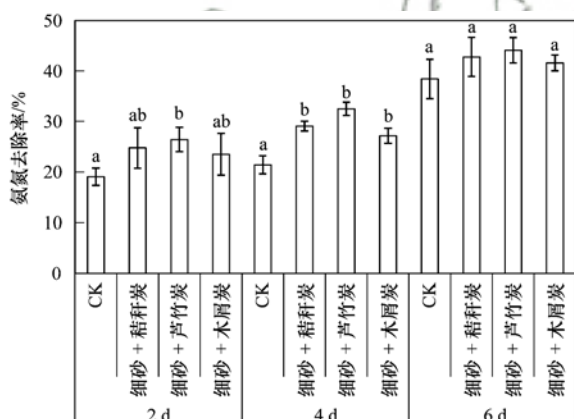
1.4 数据分析

利用 Microsoft Office Excel 2003 进行数据处理并绘图;利用 SPSS 22.0 进行数据分析,采用单因素方差分析和 LSD 法比较不同处理间根系形态和氨氮、总氮、总磷和 COD 去除率的差异,利用 Pearson 相关系数分析根系形态与污染物去除率、溶解氧含量之间的相关性及显著水平,所有数据均采用平均值 $\pm$ 标准差表示.

2 结果与分析

2.1 生物炭对人工湿地去除氨氮的影响

加入污水 2 d 后, 基质为秸秆炭 + 细砂、芦苇炭 + 细砂和木屑炭 + 细砂的人工湿地对氨氮去除率与未加生物炭人工湿地 (CK) 相比分别增加 29.9%、38.6% 和 23.2%, 其中添加芦苇炭的人工湿地与 CK 处理对氨氮的去除存在显著差异 ($P < 0.05$)。污水加入 4 d 后, 与 CK 处理相比, 加入生物炭的人工湿地对氨氮去除率分别增加 36.0%、51.9% 和 27.0%, 其中加入秸秆炭、芦苇炭和木屑炭的人工湿地对氨氮去除与 CK 相比均存在显著差异 ($P < 0.05$)。加入污水 6 d 后, 与 CK 处理相比, 加入生物炭的人工湿地对氨氮的去除率分别增加 11.36%、14.75% 和 8.24%, 各处理间均无显著差异 (图 2)。由此可见, 在短期内 (4 d) 加入生物炭可促进人工湿地对氨氮的去除, 停留时间超过 6 d 后, 生物炭对人工湿地去除氨氮无显著影响。添加生物炭对人工湿地去除氨氮的影响能力为: 木屑炭 > 秸秆炭 > 芦苇炭。



不同小写字母表示 $P < 0.05$ 差异显著性水平, 下同

图 2 人工湿地对氨氮的去除率

Fig. 2 Removal rate of ammonia nitrogen by the constructed wetland

2.2 生物炭对人工湿地去除总氮的影响

加入污水 2 d 后, 基质为秸秆炭 + 细砂、芦苇炭 + 细砂和木屑炭 + 细砂的人工湿地对总氮去除率与 CK 相比分别增加 26.4%、16.7% 和 27.6%。加入污水 4 d 和 6 d 后, 与 CK 相比, 加入秸秆炭、芦苇炭和木屑的人工湿地对总氮去除率分别增加 26.6% 与 10.2%、21.8% 与 7.2% 和 41.6% 与 16.4%, 其中添加木屑炭的人工湿地与 CK 处理对总氮去除呈显著差异 ($P < 0.05$, 图 3)。添加生物炭对人工湿地去除总氮的影响能力为: 木屑炭 > 秸秆炭 > 芦苇炭。

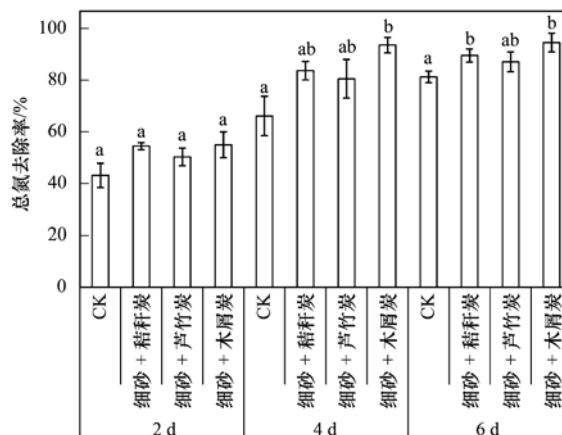


图 3 人工湿地对总氮的去除率

Fig. 3 Removal rate of total nitrogen by the constructed wetland

2.3 生物炭对人工湿地去除总磷的影响

加入污水 2 d 后, 基质为秸秆炭 + 细砂、芦苇炭 + 细砂和木屑炭 + 细砂的人工湿地对总磷的去除率与 CK 相比分别增加 121.5%、74.0% 和 136.1%, 其中添加木屑炭与芦苇炭的人工湿地对总磷的去除率呈显著差异 ($P < 0.05$)。相同地, 加入污水 4 d 和 6 d 后, 与 CK 相比, 添加 3 种生物炭的人工湿地对总磷去除率分别增加 25.4% 与 18.5%、20.5% 与 16.0% 和 47.6% 与 29.3% (图 4)。添加 3 种生物炭对人工湿地去除总磷的效果表现为: 木屑炭 > 秸秆炭 > 芦苇炭。

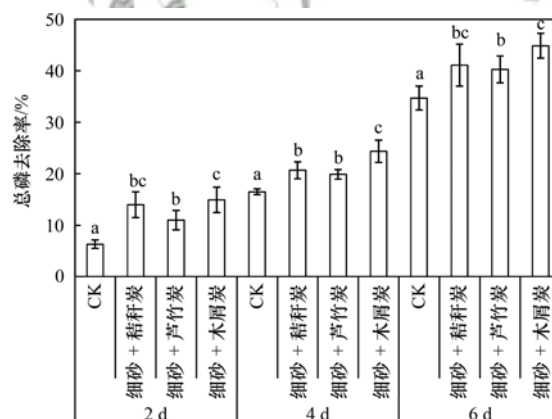


图 4 人工湿地对总磷的去除率

Fig. 4 Removal rate of total phosphorus by the constructed wetland

2.4 生物炭对人工湿地去除 COD 的影响

加入污水 2 d 后, 基质为秸秆炭 + 细砂、芦苇炭 + 细砂和木屑炭 + 细砂的人工湿地对 COD 去除率与 CK 相比分别增加 21.7%、16.0% 和 22.7%, 加入生物炭显著提高了人工湿地对 COD 的去除率 ($P < 0.05$)。4 d 和 6 d 后, 与 CK 相比, 加入生物炭的人工湿地对 COD 去除率分别增加 6.0% 与

4.5%、5.1%与3.6%和8.7%与9.7%,加入木屑炭显著提高了人工湿地对COD的去除率($P < 0.05$,图5)。3种生物炭对人工湿地中COD去除的效果表现为:木屑炭>秸秆>芦苇。

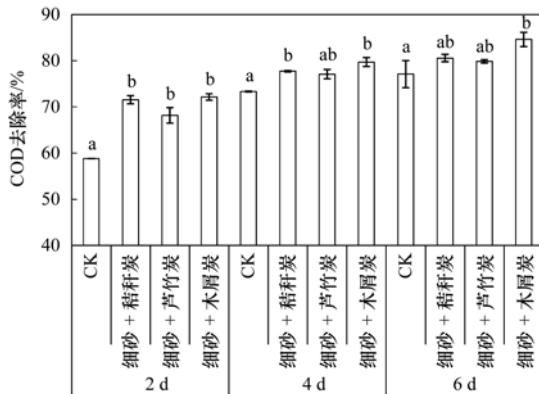


图5 人工湿地对COD的去除率

Fig. 5 Removal rate of COD by the constructed wetland

2.5 生物炭对人工湿地溶解氧含量的影响

加入污水2d后,基质为秸秆炭+细砂、芦苇炭+细砂和木屑炭+细砂的人工湿地中溶解氧含量与CK相比分别增加255.6%、214.3%和357.1%;相同地,4d和6d后,与CK相比,添加3种生物炭的人工湿地中的溶解氧含量分别增加107.1%与63.9%、93.6%与52.5%和134.0%与84.7%。添加生物炭显著提高了人工湿地中的溶解氧含量($P < 0.05$,图6),4种人工湿地中溶解氧含量大小为:添加木屑炭人工湿地>添加秸秆炭人工湿地>添加芦苇炭人工湿地>CK。

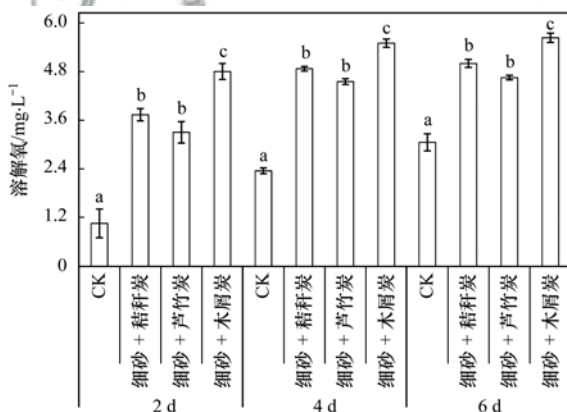


图6 人工湿地溶解氧的变化

Fig. 6 Variation of dissolved oxygen in the constructed wetland

2.6 生物炭对人工湿地中菖蒲根系形态和生物量的影响

人工湿地中加入生物炭后,菖蒲总根长和总投影面积显著增加($P < 0.05$)[图7(a)和7(b)].与CK处理相比,加入秸秆炭、芦苇炭和木屑炭后菖蒲

总根长分别增加52.3%、42.2%和96.1%;相同地,菖蒲总根投影面积也分别增加68.7%、57.2%和106.2%。菖蒲总根长和总根投影面积均为添加木屑炭的人工湿地显著高于添加秸秆或芦苇生物炭人工湿地($P < 0.05$)。人工湿地中加入生物炭后,菖蒲总根表面积、总根体积均显著增加($P < 0.05$)[图7(c)和7(d)].与CK处理相比,人工湿地中加入秸秆炭、芦苇炭和木屑炭后菖蒲总根表面积和总体积分别增加68.7%与85.4%、57.2%与72.7%和106.2%与185.6%,且加入木屑炭的人工湿地中菖蒲总根表面积和总根体积显著高于添加芦苇炭或秸秆炭的人工湿地($P < 0.05$)。

人工湿地加入木屑炭后,菖蒲总根尖数、总分枝数显著高于添加秸秆炭或芦苇炭的人工湿地($P < 0.05$)[图7(e)和7(f)].与CK处理相比,人工湿地加入秸秆炭、芦苇炭和木屑炭后菖蒲的总根尖数分别增加76.1%、64.0%和172.5%,相同地,加入3种生物炭后,菖蒲根的分枝数也分别增加31.4%、19.8%和75.3%。人工湿地中加入3种生物炭后对菖蒲根尖数和总分支数的影响能力为:木屑炭>秸秆炭>芦苇炭。

人工湿地中加入木屑炭后,菖蒲地上部分和根干重显著高于CK处理($P < 0.05$)[图8(a)].加入秸秆炭、芦苇炭和木屑炭后人工湿地中菖蒲地上部分干重分别增加47.9%、42.1%和84.9%,相同地,菖蒲根的干重也分别增加66.1%、32.9%和121.6%,并且添加木屑炭处理与芦苇炭处理间有显著差异($P < 0.05$)。3种生物炭对菖蒲根和地上部分干重的影响表现为木屑炭>秸秆>芦苇。

3 讨论

3.1 人工湿地溶解氧对菖蒲根系形态的响应

菖蒲根系形态影响了人工湿地溶解氧含量。相关分析显示,菖蒲总根长、总投影面积、总表面积、总体积、总分枝数、总根尖数和根干重与人工湿地中溶解氧含量均呈极显著正相关($P < 0.01$)(表2)。植物根系泌氧量与植物光照条件、植物叶面积^[14]和生物量有关^[15],在本研究中,加入生物炭后菖蒲地上部分(叶)干重增加[图8(b)],叶面积变大,光合作用增强,从而增加了菖蒲根系的泌氧量。黄丹萍等^[16]发现菖蒲的根尖泌氧量最大,离根尖越远,泌氧量越小。因此本研究中加入生物炭后,菖蒲总根尖数显著增加[图7(e)],从而使得菖蒲根系泌氧量增大,增加了人工湿地中的溶解氧含量。

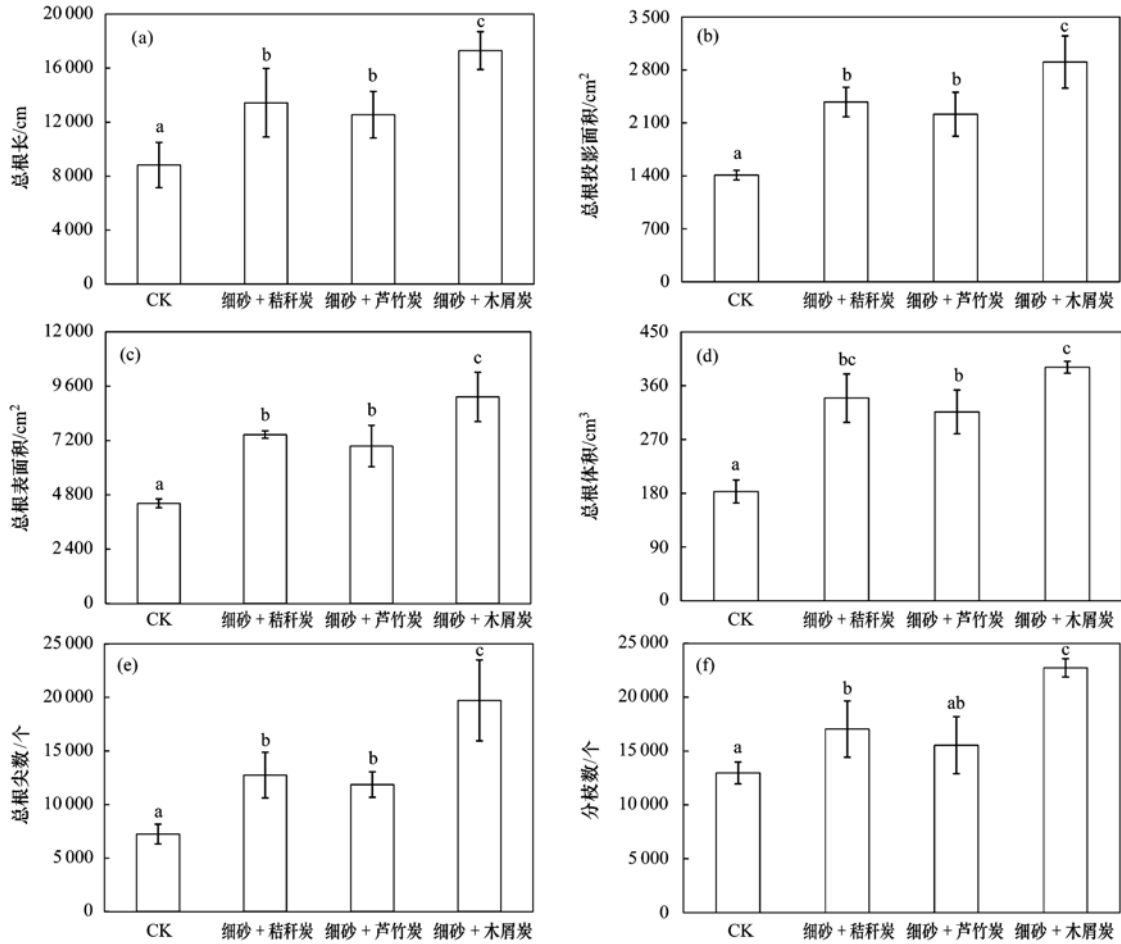


图 7 菖蒲根系形态
Fig. 7 Root morphological characteristics of *Acorus calamus* L.

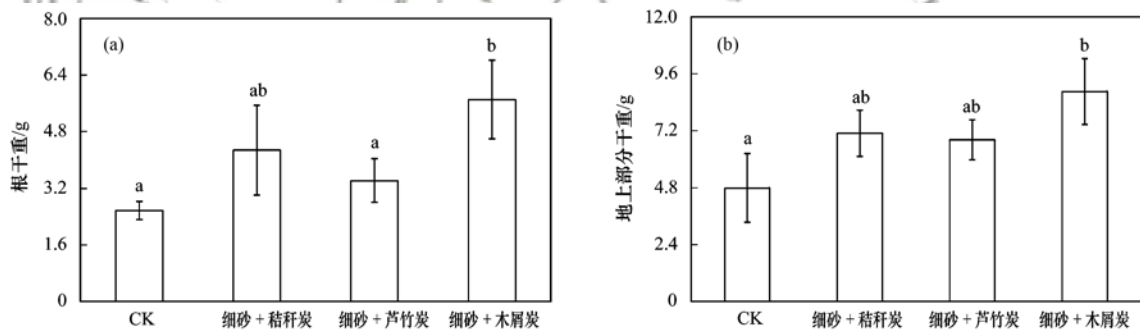


图 8 菖蒲根和地上部分干重
Fig. 8 Dry weight of *Acorus calamus* L.

表 2 湿地植物根系形态与水质指标的相关性分析¹⁾

项目	根长	投影面积	表面积	体积	总根尖数	分枝数	根干重	地上部分干重
溶解氧含量	0.869 **	0.929 **	0.944 **	0.945 **	0.861 **	0.804 **	0.755 **	0.818 **
氨氮去除率	0.38	0.435	0.356	0.493	0.343	0.301	0.367	0.538
总氮去除率	0.739 **	0.791 **	0.786 **	0.801 **	0.76 **	0.907 **	0.673 *	0.688 *
总磷去除率	0.936 **	0.938 **	0.888 **	0.895 **	0.961 **	0.726 **	0.847 **	0.881 **
COD 去除率	0.913 **	0.887 **	0.901 **	0.775 **	0.93 **	0.867 **	0.841 **	0.757 **

1) ** 表示极显著相关($P < 0.01$), * 表示显著相关($P < 0.05$)

3.2 湿地植物根系形态对人工湿地净化能力的影响

人工湿地加入生物炭增加了人工湿地对氨氮的去除率,且在第4 d,加入的3种生物炭均显著增加了人工湿地对氨氮的去除率($P < 0.01$) (图2). 卢少勇等^[11]认为生物炭可吸附氨氮而增加人工湿地对氨氮的去除,因此,加入生物炭提高人工湿地对氨氮的去除率可能与生物炭吸附氨氮有关. 然而,在本研究中,相关分析显示人工湿地对氨氮去除率与根系形态参数相关性不高(表2),可能与人工湿地对氨氮的去除主要与基质的吸附和离子交换有关^[17, 18]. 因此,在本研究中菖蒲对氨氮的吸收不是去除氨氮的主要途径.

相关分析结果表明,在第6 d时,人工湿地对总氮的去除率与菖蒲根长、投影面积、表面积、总体积、根尖数和分枝数呈极显著正相关($P < 0.01$),与地上部分和根干重呈显著正相关($P < 0.05$). 加入生物炭提高人工湿地对总氮的去除率,可能有以下二方面的原因:一是因为菖蒲的根系及基质的吸附作用使得氮在根区大量聚集,同时一部分氮被根系吸收^[19]. 二是菖蒲根系为微生物提供附着场所^[20],根系越发达,对微生物的生长和繁殖越有利^[21],特别是生物炭促进了菖蒲根系泌氧,增加根际溶解氧含量,有利于硝化细菌数量的增加,从而促进氮的去除.

本实验中菖蒲根长、投影面积、表面积、总体积、根尖数、分枝数和根干重与总磷去除率均呈极显著正相关($P < 0.01$). 湿地中磷的去除主要包括植物、基质和微生物的共同作用^[22, 23]. 李爱权等^[24]认为在无植物的垂直流人工湿地中基质对磷的吸附是去除磷的重要途径. 李林锋等^[25]的研究发现有湿地植物的人工湿地对总磷的去除显著优于无湿地植物的湿地. 徐德福等^[26]的研究发现湿地植物对磷的吸收量与生物量成显著正相关. 因此,加入生物炭后菖蒲根系形态特征与总磷去除呈显著正相关,可能与生物炭促进菖蒲根系生长(图8),进而提高根系对磷的吸收量有关. 从表2可以看出,人工湿地对COD的去除与根系形态参数也呈正相关,其原因可能与生物炭促进植物根系生长,增加根系泌氧量,提高人工湿地溶解氧含量有关. 另一方面根系分泌物对根际土壤的生物活性有一定的促进作用^[27],因此,生物炭促进菖蒲根系生长,可能增加根系分泌物的数量,从而提高了基质微生物活性,促进了有机物的分解,提高COD的去除率.

4 结论

(1)添加秸秆炭、芦苇炭和木屑炭提高了人工湿地对氨氮、总氮、总磷和COD的去除率和人工湿地中溶解氧含量,另外,添加生物炭促进了菖蒲根的生长,增加了菖蒲的根长、根重、根面积、根体积、分枝数和总根尖数.

(2)人工湿地中菖蒲的根长、根重、根面积、根体积、分枝数和总根尖数与湿地溶解氧含量、总氮、总磷和COD去除率呈显著正相关性.

(3)不同生物炭对菖蒲根系形态的影响不同,木屑炭比秸秆炭和芦竹炭更能促进菖蒲根系的生长和提高人工湿地对污水的净化能力.

参考文献:

- [1] 梁康,王启烁,王飞华,等. 人工湿地处理生活污水的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(3): 422-428.
Liang K, Wang Q S, Wang F H, et al. Research progresses in domestic wastewater treatment by constructed wetlands [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(3): 422-428.
- [2] 武玉,徐刚,吕迎春,等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, **29**(1): 68-79.
Wu Y, Xu G, Lü Y C, et al. Effects of biochar amendment on soil physical and chemical properties: current status and knowledge gaps[J]. Advances in Earth Science, 2014, **29**(1): 68-79.
- [3] 徐国鑫,王子芳,高明,等. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 355-362.
Xu G X, Wang Z F, Gao M, et al. Effects of straw and biochar return in soil on soil aggregate and carbon sequestration [J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 355-362.
- [4] 安艳,姬强,赵世翔,等. 生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 293-300.
An Y, Ji Q, Zhao S X, et al. Effect of biochar application on soil aggregates distribution and moisture retention in orchard soil [J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 293-300.
- [5] Gray N F. Water technology: an introduction for scientists and engineers[M]. London: Arnold, 1999.
- [6] Hollister C C, Bisogni J J, Lehmann J. Ammonium, nitrate, and phosphate sorption to and solute leaching from biochars prepared from Corn Stover (*Zea mays* L.) and Oak wood (*Quercus* spp.) [J]. Journal of Environmental Quality, 2013, **42**(1): 137-144.
- [7] 段婧婧,薛利红,冯彦房,等. 碳氮比对水芹浮床系统去除低污染水氮磷效果的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, **24**(3): 384-391.
Duan J J, Xue L H, Feng Y F, et al. Effect of carbon/nitrogen ratio in low pollution wastewater on nitrogen and phosphorus removal in a floating-bed *Oenanthe javanica* system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, **24**(3): 384-391.
- [8] 段婧婧,薛利红,尹爱经,等. 添加生物炭的水芹湿地对农村低污染水的净化研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(2): 353-361.

- Duan J J, Xue L H, Yin A J, *et al.* Rural low-pollution wastewater purification in *Oenanthe Javanica* wetland with biochar addition[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(2): 353-361.
- [9] Zhou X, Wang X Z, Zhang H, *et al.* Enhanced nitrogen removal of low C/N domestic wastewater using a biochar-amended aerated vertical flow constructed wetland[J]. *Bioresource Technology*, 2017, **241**: 269-275.
- [10] 唐美珍, 汪文飞, 李如如, 等. 生物炭对 *Pseudomonas flava* WD-3 的固定化及其强化人工湿地污水处理研究[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(9): 3441-3448.
- Tang M Z, Wang W F, Li R R, *et al.* Immobilized *Pseudomonas flava* WD-3 by biochar for the sewage purification in the artificial wetland[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(9): 3441-3448.
- [11] 卢少勇, 万正芬, 李锋民, 等. 29 种湿地填料对氨氮的吸附解吸性能比较[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(8): 1187-1194.
- Lu S Y, Wan Z F, Li F M, *et al.* Ammonia nitrogen adsorption and desorption characteristics of twenty-nine kinds of constructed wetland substrates[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(8): 1187-1194.
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [13] Hu G J, Zhou M, Hou H B, *et al.* An ecological floating-bed made from dredged lake sludge for purification of eutrophic water[J]. *Ecological Engineering*, 2010, **36**(10): 1448-1458.
- [14] 贺锋, 吴振斌. 水生植物在污水处理和水质改善中的应用[J]. *植物学通报*, 2003, **20**(6): 641-647.
- He F, Wu Z B. Application of aquatic plants in sewage treatment and water quality improvement[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2003, **20**(6): 641-647.
- [15] 林剑华, 杨扬, 李丽, 等. 8 种湿地植物的生长状况及泌氧能力[J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(6): 1042-1048.
- Lin J H, Yang Y, Li L, *et al.* Characteristics of growth and radial oxygen loss of eight wetland plants[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(6): 1042-1048.
- [16] 黄丹萍, 贺锋, 肖蕾, 等. 高氮磷胁迫下菖蒲(*Acorus calamus* Linn.) 通气组织和根系释氧的响应[J]. *湖泊科学*, 2012, **24**(1): 83-88.
- Huang D P, He F, Xiao L, *et al.* Response between aerenchyma and radial oxygen loss of *Acorus calamus* Linn. under high nitrogen and phosphorus stress[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, **24**(1): 83-88.
- [17] 赵丹, 王曙光, 栾兆坤, 等. 改性斜发沸石吸附水中氨氮的研究[J]. *环境化学*, 2003, **22**(1): 59-63.
- Zhao D, Wang S G, Luan Z K, *et al.* Study on the ammonia removal from water using remodeled clinoptilolite[J]. *Environmental Chemistry*, 2003, **22**(1): 59-63.
- [18] 金相灿, 贺凯, 卢少勇, 等. 4 种填料对氨氮的吸附效果[J]. *湖泊科学*, 2008, **20**(6): 755-760.
- Jin X C, He K, Lu S Y, *et al.* Adsorption effect of ammonia by four fillings[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, **20**(6): 755-760.
- [19] Czerwionka K, Makinia J, Pagilla K R, *et al.* Characteristics and fate of organic nitrogen in municipal biological nutrient removal wastewater treatment plants[J]. *Water Research*, 2012, **46**(7): 2057-2066.
- [20] 杨忠臣. 人工湿地植物根系泌氧和分泌物影响污染物去除的机制研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- Yang Z C. Study on the mechanism of radial oxygen loss and root exudates affected pollutant removal in constructed wetland[D]. Ji'nan: Shandong University, 2016.
- [21] Wang H L, Lin K D, Hou Z N, *et al.* Sorption of the herbicide terbutylazine in two New Zealand forest soils amended with biosolids and biochars[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, **10**(2): 283-289.
- [22] Xu D F, Xu J M, Wu J J, *et al.* Studies on the phosphorus sorption capacity of substrates used in constructed wetland systems[J]. *Chemosphere*, 2006, **63**(2): 344-352.
- [23] Yang Y, Wang Z M, Liu C, *et al.* Enhanced P, N and C removal from domestic wastewater using constructed wetland employing construction solid waste (CSW) as main substrate[J]. *Water Science & Technology*, 2012, **66**(5): 1022-1028.
- [24] 李爱权, 李文朝, 潘继征, 等. 人工湿地复合基质深度净除磷实验[J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(2): 134-138.
- Li A Q, Li W C, Pan J Z, *et al.* Phosphorus removal efficiency of constructed wetland with different compound substrates treating pre-treated wastewater[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, **18**(2): 134-138.
- [25] 李林锋, 年跃刚, 蒋高明. 植物吸收在人工湿地脱氮除磷中的贡献[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(3): 337-342.
- Li L F, Nian Y G, Jiang G M. Contribution of macrophytes assimilation in constructed wetlands to nitrogen and phosphorus removal[J]. *Research of Environment Sciences*, 2009, **22**(3): 337-342.
- [26] 徐德福, 徐建民, 王华胜, 等. 湿地植物对富营养化水体中氮、磷吸收能力研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, **11**(5): 597-601.
- Xu D F, Xu J M, Wang H S, *et al.* Absorbability of wetland plants on N and P from eutrophic water[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, **11**(5): 597-601.
- [27] 邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 等. 不同地表条件下生物炭对土壤氨挥发的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 348-354.
- Zou J, Hu X Y, Zhang Y Y, *et al.* Effect of biochar on ammonia volatilization from soils of different surface conditions[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 348-354.

CONTENTS

Spatial-Temporal Change Evolution of PM _{2.5} in Typical Regions of China in Recent 20 Years	LUO Yi, DENG Qiong-fei, YANG Kun, <i>et al.</i>	(3003)
Evaluation the Extent of Health Damage Caused by PM _{2.5} Particulate in Xi'an City	WEI Guo-ru, SHI Xing-min	(3014)
Analysis of Chemical Composition, Source and Evolution of Submicron Particles in Xianghe, Hebei Province	JIANG Qi, WANG Fei, SUN Ye-le	(3022)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Components of PM _{2.5} During Autumn in the Northern Suburb of Nanjing	XU Zu-fei, CAO Fang, GAO Song, <i>et al.</i>	(3033)
Comparison of Chemical Components Characteristics of PM _{2.5} Between Haze and Clean Periods During Summertime in Lin'an	LIANG Lin-lin, SUN Jun-ying, ZHANG Yang-mei, <i>et al.</i>	(3042)
Characteristics and Sources of Carbon Components in PM _{2.5} During Autumn and Winter in Panjin City	ZHANG Lei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i>	(3051)
Aerosol Optical Properties and Light Absorption Enhancement of EC During Wintertime in Nanjing	HUANG Cong-cong, MA Yan, ZHENG Jun	(3057)
Concentration, Solubility, and Dry Deposition Flux of Trace Elements in Fine and Coarse Particles in Qingdao During Summer	LI Peng-zhi, LI Qian, SHI Jin-hui, <i>et al.</i>	(3067)
Characteristics and Sources of Dissolved Heavy Metals in Summer Precipitation of Taiyuan City, China	YE Ai-ling, CHENG Ming-chao, ZHANG Lu, <i>et al.</i>	(3075)
Characteristics of and Factors Affecting Atmospheric CO ₂ Concentration in Hangzhou	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, JIANG Yu-jun, <i>et al.</i>	(3082)
Treatment Status and Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industrial Sources	JING Sheng-ao, WANG Hong-li, ZHU Hai-lin, <i>et al.</i>	(3090)
Characteristics of Industrial VOCs Emission Sources and Control Technology Application in a Prefecture-level City Region-Based on Qinhuangdao City	HU Xu-rui, HU Xiao-yu, WANG Can	(3096)
Pollution Condition and Health Risk Assessment of VOCs in Fermentation Exhaust from Penicillin Production	GUO Bin, YAO Rui-jing, ZHANG Shuo, <i>et al.</i>	(3102)
Measurements of OC and EC Emission Factors for Light-duty Gasoline Vehicles	HUANG Cheng, HU Qing-yao, LU Jun	(3110)
Pollution Levels and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Nanjing	TIAN Chun-hui, YANG Ruo-zhu, Gulizhaer Yilihamu, <i>et al.</i>	(3118)
Contamination Levels and Source Analysis of Heavy Metals in the Finer Particles of Urban Road Dust from Xi'an, China	SHI Dong-qi, LU Xin-wei	(3126)
pCO ₂ in the Main Rivers of the Three Gorges Reservoir and Its Influencing Factors	LUO Jia-chen, MAO Rong, LI Si-yue	(3134)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Surface Water and Groundwater of the Jinghe River	KOU Yong-chao, KUA Kun, LI Zhou, <i>et al.</i>	(3142)
Urban Runoff Phosphorus Removal Pathways in Bioretention Systems	LI Li-qing, LIU Yu-qing, YANG Jia-min, <i>et al.</i>	(3150)
Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationships with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai	YANG Li, ZHANG Wei, SHANG Guang-xia, <i>et al.</i>	(3158)
Spatio-temporal Variations of Diatom Community and Their Relationship with Water Environment in Fuxian Lake	LI Rui, CHEN Guang-jie, KANG Wen-gang, <i>et al.</i>	(3168)
Effects of Algal Blooms and Their Degradation on the Sediment-water Micro-interface	WANG Yong-ping, XIE Rui, CHAO Jian-ying, <i>et al.</i>	(3179)
Effect of Biochar on Root Morphological Characteristics of Wetland Plants and Purification Capacity of Constructed Wetland	XU De-fu, PAN Qian-cheng, LI Ying-xue, <i>et al.</i>	(3187)
Preparation of Mn-Co/Ceramic Honeycomb Catalyst and Its Performance on Catalytic Ozonation of Hydroquinone	ZHANG Lan-he, GAO Wei-wei, CHEN Zi-cheng, <i>et al.</i>	(3194)
Degradation Mechanism of Tetracycline Using Fe/Cu Oxides as Heterogeneous Activators of Peroxymonosulfate	LI Jing, BAO Jian-guo, DU Jiang-kun, <i>et al.</i>	(3203)
Behavior and Mechanisms of Cd(II) Adsorption from Water by Niobate-Modified Titanate Nanosheets	KANG Li, LIU Wen, LIU Xiao-na, <i>et al.</i>	(3212)
Trace Amounts of Phosphorus Removal Based on the in-suit Oxidation Products of Iron or Manganese in a Biofilter	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i>	(3222)
Effect of Preparation Methods on Phosphate Adsorption by Iron-Titanium Binary Oxide: Coprecipitation and Physical Mixing	ZHONG Yan, WANG Jiang-yan, CHEN Jing, <i>et al.</i>	(3230)
Effects of Conductivity on Performance of a Combined System of Anaerobic Acidification, Forward Osmosis, and a Microbial Fuel Cell	LU Yu-qin, LIU Jin-meng, WANG Xin-hua, <i>et al.</i>	(3240)
COD Requirement for Biological Phosphorus Removal Granule System Under Different Phosphorus Concentrations	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(3247)
Effect of Substrate Concentration on SAD Collaborative Nitrogen and Carbon Removal Efficiency in an ABR Reactor	ZHANG Min, JIANG Ying, WANG Yao-qi, <i>et al.</i>	(3254)
Evaluation of Advanced Nitrogen Removal from Coking Wastewater Using Sulfide Iron-containing Sludge as a Denitrification Electron Donor	FU Bing-bing, PAN Jian-xin, MA Jing-de, <i>et al.</i>	(3262)
Stability of Nitrification Combined with Limited Filamentous Bulking Under Intermittent Aeration	GAO Chun-di, SUN Da-yang, AN Ran, <i>et al.</i>	(3271)
Filamentous Sludge Microbial Community of a SBR Reactor Based on High-throughput Sequencing	HONG Ying, YAO Jun-qin, MA Bin, <i>et al.</i>	(3279)
Impact of Nano Zero-Valent Iron (NZVI) on Methanogenic Activity, Physiological Traits, and Microbial Community Structure in Anaerobic Digestion	SU Run-hua, DING Li-li, REN Hong-qiang	(3286)
Effects of Gas/Water Ratio on the Characteristics of Nitrogen Removal and the Microbial Community in Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	ZHANG Qian, JI Fang-ying, FU Xu-fang, <i>et al.</i>	(3297)
Comparison of Extraction Methods of Extracellular Polymeric Substances from Activated Sludge	SUN Xiu-yue, TANG Zhu, YANG Xin-ping	(3306)
Identification and Characterization of a Hypothermic Alkaliphilic Aerobic Denitrifying Bacterium <i>Pseudomonas monteilii</i> Strain H97	CAI Xi, HE Teng-xia, YE Qing, <i>et al.</i>	(3314)
Isolation, Identification, and Biodegradation Behaviors of a Perfluorooctane Sulfonic Acid Precursor (PreFOSs) Degrading Bacterium from Contaminated Soil	ZHAO Shu-yan, ZHOU Tao, WANG Bo-hui, <i>et al.</i>	(3321)
Microbial Community Distributions in Soils of an Oil Exploitation Site	CAI Ping-ping, NING Zhuo, HE Ze, <i>et al.</i>	(3329)
Characteristics of Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities over Different Reclaimed Years in a Copper Tailings Dam	WANG Rui-hong, JIA Tong, CAO Miao-wen, <i>et al.</i>	(3339)
Risk Analysis of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil Around a Bauxite Residue Disposal Area in Guangxi	GUO Ying, LI Yu-bing, XUE Sheng-guo, <i>et al.</i>	(3349)
Occurrence and Distribution of Phthalate Esters in Urban Soils of Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i>	(3358)
Profile Distribution of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Chengdu Plain	LI Shan, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i>	(3365)
Correlation Between Soil Organic and Inorganic Carbon and Environmental Factors in Cotton Fields in Different Continuous Cropping Years in the Oasis of the Northern Tarim Basin	ZHAO Jing-jing, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i>	(3373)
Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Soil Physicochemical Factors in Four Different Land Use Types of the Northern Tarim Basin	AN Shen-qun, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i>	(3382)
Short-term Mechanism of Warming-induced Stability for Organic Carbon in the Karst Plateau Soil	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i>	(3391)
Effects of Boron Treatment on Arsenic Uptake and Efflux in Rice Seedlings	ZHU Yi, SUN Guo-xin, CHEN Zheng, <i>et al.</i>	(3400)
Comparative Analysis of Different Soil Amendment Treatments on Rice Heavy Metal Accumulation and Yield Effect in Pb and Cd Contaminated Farmland	HU Xue-fang, TIAN Zhi-qing, LIANG liang, <i>et al.</i>	(3409)
Seasonal Variation in Surface Ozone and Its Effect on the Winter Wheat and Rice in Nanjing, China	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, WEI Li, <i>et al.</i>	(3418)
Hair Mercury Concentrations in Residents of Fuling and Zhongxian in the Three Gorges Reservoir Region and Their Influence Factors	CHENG Nan, XIE Qing, FAN Yu-fei, <i>et al.</i>	(3426)
Removal of Typical Antibiotics During Aerobic Composting of Human Feces	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian	(3434)
Effect of COD/SO ₄ ²⁻ Ratio on Anaerobic Digestion of Penicillin Bacterial Residues	QIANG Hong, LI Yu-you, PEI Meng-fu	(3443)
Characteristics of Odor Emissions from Fresh Compost During Storage and Application	HE Pin-jing, JIANG Ning-ling, XU Xian, <i>et al.</i>	(3452)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on Ammonia Volatilization from a Paddy Field Treated with Conventional Synthetic Fertilizer and Manure	PANG Bing-kun, ZHANG Jing-sha, WU Jie, <i>et al.</i>	(3460)