

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第6期

Vol.39 No.6

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

北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律	刘俊, 楚碧武, 贺泓 (2505)
太原冬季 PM _{2.5} 影响霾污染的关键尺度谱特征	杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 李义宇, 孙洪娉, 田芷洁, 李岩, 吴尚, 王梓航 (2512)
盘锦市冬季 PM _{2.5} 水溶性离子特征及来源分析	张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 赵静琦, 张军, 李越洋, 张伟 (2521)
广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析	古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 田智林, 李梅, 程鹏 (2528)
热带树木燃烧颗粒物中脱水糖和醋基烯的排放特征	金诚妙, 崔敏, 韩勇, 陈颖军, 唐娇, 李军, 张干 (2538)
天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用	蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 姚青, 刘敬乐 (2548)
亚热带农田和林地大气氨湿沉降与混合沉降比较	朱潇, 王杰飞, 沈健林, 肖润林, 王娟, 吴金水, 李勇 (2557)
京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估	卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强 (2566)
北京北运河河流生态系统健康评价	顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨 (2576)
长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析	董磊, 汤显强, 林莉, 郇超, 黎睿, 吴敏 (2588)
福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征	张丹丹, 郭亚平, 任红云, 周昕原, 黄福义, 张炯 (2600)
三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价	方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇 (2607)
三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征	潘婊娟, 黎睿, 汤显强, 夏振尧, 李青云, 杨文俊, 许文年 (2615)
基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源	孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 梁慧雅 (2624)
天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响	孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧赞 (2632)
重庆雪玉洞滴水水文地球化学时空变化特征及其环境意义	曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘焯, 雷佳琪 (2641)
岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源: 以金佛山碧潭河为例	刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 刘九继, 王正雄, 段世辉 (2651)
托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义	李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲桂, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟 (2661)
五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响	彭文杰, 李强, 宋昂, 靳振江 (2673)
西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例	张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典 (2680)
四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子	郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑志明, 朱津永 (2688)
营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金胞藻生长和竞争影响的原位实验	王梦梦, 张伟, 张军毅, 尚光霞, 杜彩丽, 王丽卿 (2698)
植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响	刘森, 陈开宁 (2706)
江汉平原水稻季灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险	华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 刘宏斌, 范先鹏, 王洪媛 (2715)
冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除	柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 王瑞, 柳蒙蒙, 郑嘉熹, 魏源送 (2724)
臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制	董秉直, 高昊旻, 胡孟柳 (2732)
中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性	于德爽, 唐佳佳, 张军, 王晓霞, 赵红, 韩长民, 孙捷 (2740)
海藻酸钙/聚 N-异丙基丙烯酰胺半互穿网络凝胶球的除磷性能	曾学阳, 骆华勇, 张耀坤, 荣宏伟, 曾子君, 钟广汇 (2748)
玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性	龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 杨靖新, 袁树森 (2756)
硝化细菌的培养及包埋固定化中试	杨宏, 胡银龙 (2763)
不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能	安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 邵兆伟, 赵智超, 黄剑明, 陈永志 (2770)
高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律	詹瑜, 施万胜, 赵明星, 许之扬, 阮文权, 宋联, 朱葛 (2778)
污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化	李玉, 方文, 祁光霞, 魏勇红, 刘建国, 李润东 (2786)
丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响	高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安 (2794)
同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析	孟璇, 潘杨, 章豪, 廖恒弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷 (2802)
四环素对人工粪堆好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响	时红蕾, 王晓昌, 李倩, 刘源 (2810)
长期定位有机物还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响	袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新 (2819)
菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响	祁乐, 高明, 周鹏, 王富华, 高泳钦, 陈仕奇, 吴思琪, 邓静霖, 文婷 (2827)
¹³ C 脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入	孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔 (2837)
西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响	杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军 (2845)
江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布	吕建树, 何华春 (2853)
黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布	于元赫, 吕建树, 王亚梦 (2865)
典型小城市土壤重金属空间异质性及其风险评价: 以临安市为例	郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林于也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军 (2875)
西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价	周艳, 陈楠, 邓绍坡, 王金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金 (2884)
典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及其风险评价	张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋 (2893)
生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响	黄磊, 陈玉成, 赵亚琦, 肖广全, 杨志敏 (2904)
厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响	王欣, 钟松雄, 陈志良, 何宏飞, 董家华, 陈晓丽 (2911)
矿业活动影响稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险	田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波 (2919)
硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响	刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 刘千钧, 钟松雄, 黄玲, 张建强 (2927)
吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征	李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 李红娜, 叶婧, 李峰, 吴翠霞 (2936)
喷施锌肥对油菜镉锌生物可给性的影响	王林, 谷朋磊, 李然, 徐应明, 孙约兵, 梁学峰, 代晶晶 (2944)
贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征	许议元, 曾玲霞, 何天容, 陈梦瑜, 钱晓莉, 李振吉 (2953)
废旧轮胎翻新过程中多环芳烃排放及健康风险	付建平, 赵波, 黎玉清, 刘沙沙, 尹文华, 黄锦琼, 周长风, 张素坤, 贺德春, 韩静磊 (2963)
县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态	孙秀峰, 施开放, 吴健平 (2971)
颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响	严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 王小明, 刘凡, 冯雄汉 (2982)
防晒剂的海洋环境行为与生物毒性	朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 杜永芬, 蔡中华 (2991)
《环境科学》征订启事 (2527)	《环境科学》征稿简则 (2723)
信息 (2826, 2852, 2910)	

生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响

黄磊^{1,2}, 陈玉成^{1,2}, 赵亚琦^{1,2}, 肖广全^{1,2}, 杨志敏^{1,2}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 农村清洁工程重庆市工程研究中心, 重庆 400716)

摘要: 在传统潜流人工湿地中, 因氧气扩散过低, 导致 DO 长期处于较低水平. 当湿地植物长期处于缺氧甚至厌氧环境时, 可造成膜脂质过氧化及蛋白质和 DNA 损伤. 由于生物炭投加至人工湿地利于空气扩散进入湿地床体, 改善湿地内部环境, 为此, 本试验在温室内构建 5 组潜流人工湿地, 研究生物炭对湿地植物菖蒲 (*Acorus calamus* L., AC) 的影响特征和机制. 结果表明, 生物炭能够显著增加湿地中 AC 体内光合色素含量, 光合作用被激励, 利于植物体内可溶性蛋白 (SP) 的积累和植物生物量的增加, 同时生物炭能加强谷氨酰胺合酶 (GS) 的活力, 增强植物体内氨氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 的代谢, 进而增强 AC 的比吸收速率, 利于 AC 吸收去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$. AC 是一类对缺氧条件具有显著抵抗能力的湿地植物, 但湿地长期缺氧或厌氧能对 AC 体内造成膜脂被氧化的不良影响, 但生物炭添加能够缓解 AC 体内超氧化物和过氧化物的积累, 显著降低 AC 体内丙二醛 (MDA) 的含量.

关键词: 生物炭; 潜流人工湿地; 菖蒲; 植物生长; 氧化应激响应

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)06-2904-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201801061

Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands

HUANG Lei^{1,2}, CHEN Yu-cheng^{1,2}, ZHAO Ya-qi^{1,2}, XIAO Guang-quan^{1,2}, YANG Zhi-min^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Engineering Research Center of Rural Cleaning, Chongqing 400716, China)

Abstract: Constructed wetlands (CWs) have high potential for wastewater treatment in developing countries because of their operational convenience and low maintenance costs. However, rapid accumulation of macrophytes in these wetlands, as a result of plant litter recycling, can lead to lower removal efficiencies. Periodic harvesting is considered to be the effective measure to maintain the wastewater treatment performance, and so a lot of harvested plant waste needs to be properly disposed of. However, in China, plant waste is usually used for agricultural burning and the greenhouse gas emissions bring adverse effects on the atmospheric environment. In the traditional subsurface flow CW, the dissolved oxygen (DO) concentration is low, resulting in long-term anoxic or anaerobic conditions, which will bring damages to plant body, such as membrane lipid peroxidation and protein and DNA damage. Generally, the addition of biochar to CWs is beneficial for aeration, and improves the internal environment of wetlands. Hence, the effects of plant biochar on the pollutant purification efficiencies in CWs were studied, and the role of biochar in macrophyte growth and antioxidative response was investigated. Based on the results of biochar application in agricultural fields, the harvested wetland plant straw was pyrolyzed to biochar at 500 °C under a dynamic high-purity nitrogen atmosphere. The wetland plant *Acorus calamus* L. (AC) was chosen for this study. The impact characteristics of biochar on AC were studied in five independent CWs built in a greenhouse, by combining the analyses of growth and antioxidative responses of plants. Results showed that the removals of ammonium ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) and total nitrogen (TN) were significantly enhanced when biochar was added to CWs and that higher long-term nitrogen removal rates were achieved when the biochar application rate was increased. The photosynthetic pigment content in AC increased significantly with increasing biochar application rate. This stimulated photosynthesis and increased the soluble protein (SP) and plant biomass amounts. Further, glutamine synthetase (GS) activity was strengthened with the addition of biochar. This helped enhance the $\text{NH}_4^+\text{-N}$ metabolism and increased the relative uptake rate of AC. This study confirmed that long-term anoxic or anaerobic conditions in CWs cause membrane lipid oxidation in plants. However, the activity of the antioxidative response system was promoted with the addition of biochar, significantly decreasing the malonic dialdehyde (MDA) content in the plants.

Key words: biochar; subsurface flow constructed wetland; *Acorus calamus* L.; plant growth; antioxidative response

在潜流人工湿地中, 因氧气扩散过低, 导致溶解氧 (DO) 长期处于较低水平, 尤其是处理污水的潜流湿地. 在这种条件下, 微生物将会选择特殊的电子供体来氧化有机物. 这些特殊电子供体在失去电子后将会对植物造成毒害作用, 例如亚硝态氮、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 等^[1-3]. 当植物长期处于缺氧甚至厌氧

环境时, 具有强还原性的离子 Fe^{2+} 及 Mn^{2+} 将会在植物体内形成 O_2^- 和 H_2O_2 等毒副产物^[4], 可造成

收稿日期: 2018-01-07; 修订日期: 2018-02-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51408493)

作者简介: 黄磊 (1984 ~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为水污染治理与水环境修复, E-mail: leihuang@swu.edu.cn

膜脂质过氧化及蛋白质和 DNA 损伤等损害. 生物炭的灰分元素(如 K、Ca 和 Mg 等)含量较为丰富, 投加至湿地后作为可溶性养分被植物利用, 并能通过贮存营养元素、改善湿地基质的理化性质来促进湿地植物的生长^[5, 6]. 除此之外, 生物炭投加至人工湿地, 利于空气扩散进入湿地床体, 能改善湿地内部还原性环境以及局部缺氧(或厌氧)环境^[7]. 为此本研究拟通过对比不同生物炭投加比例对湿地植物的生理生态影响, 从植物生长、植物氮素吸收作用及植物体的过氧化应激反应等 3 个方面, 探讨生物炭投加对缓解湿地植物缺氧(或厌氧)胁迫可能具有的特殊作用.

1 材料与方法

1.1 生物炭潜流人工湿地

本研究的湿地反应器采用圆筒形聚乙烯容器, 每个容器表面积为 0.1 m², 深为 35 cm. 按照生物炭 40%、30%、20%、10% 和 0% 的添加比例分别构建一组微型系统(分别命名为 BW-40、BW-30、BW-20、BW-10 和 CW-K), 为保证试验数据可靠有效, 本研究设置一组平行反应器. 湿地反应器采用潜流湿地形式, 下部按照比例填充碎石(粒径为 1~2 cm), 上部按照比例填充生物炭(采用芦竹作为原材料于 500℃ 条件自制, 长度为 1~2 cm)^[8], 生物炭的比表面积为 345.92 m²·g⁻¹, 孔径为 1.95 nm, 孔容为 0.2467 cm³·g⁻¹. 在表层铺一层约 3 cm 碎石以防止生物炭轻质填料上浮, 填充总高度 33 cm, 湿地栽种植物选用菖蒲(AC). 在每个湿地反应器中央设置一根直径为 3 cm, 长度为 35 cm 的穿孔管, 用于虹吸排水、取样、测定各种物理和化学参数.

植物经驯化扩培后, 选取长势好且根叶相似的 AC, 分别栽入湿地中(对应湿地名称分别命名为 AC-40、AC-30、AC-20、AC-10、AC-K), 栽种密度为 30 株·m⁻², 试验装置如图 1 所示. 所有湿地试验均置于温室中进行, 温度(25±2)℃, 光照强度

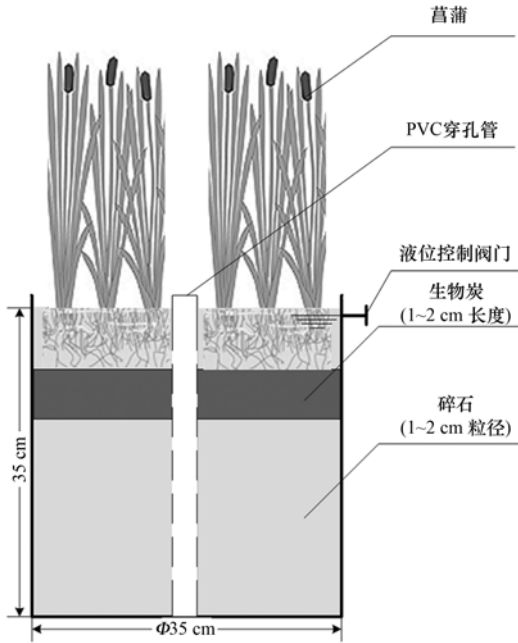


图 1 试验装置示意

Fig. 1 Scheme of the experimental microcosm

(3 000±300) lx, 光暗比 12 h: 12 h.

人工湿地进水采用自来水配置, 每升进水包括: 390 mg C₆H₁₂O₆; 220 mg KNO₃; 75 mg NH₄Cl; 200 mg NaHCO₃; 11 mg KH₂PO₄; 18 mg K₂HPO₄·3H₂O; 10 mg MgSO₄·7H₂O; 10 mg FeSO₄·7H₂O; 7.6 mg CaCl₂ 和 1 mL 微量元素液. 每升微量元素液包括: 0.15 g H₃BO₃; 0.03 g CuSO₄·5H₂O; 0.18 g KI; 0.12 g MnCl₂·4H₂O; 0.06 g Na₂MoO₄·2H₂O; 0.12 g ZnSO₄·7H₂O; 0.15 g CoCl₂·6H₂O 和 10 g EDTA-Na₂. 配好的进水包括 420 mg·L⁻¹ 化学需氧量(COD), 20 mg·L⁻¹ NH₄⁺-N, 30 mg·L⁻¹ 硝态氮(NO₃⁻-N)和 5 mg·L⁻¹ 总磷, 进水 pH 控制为 7.5±0.3, DO 控制为(2.0±0.5)mg·L⁻¹. 湿地停留时间为 2 d, 处理负荷设定为 0.05 m³·(m²·d)⁻¹, 有效进水量为 10 L, 进水水位可由顶部水位控制阀门调整. 经过 150 d 左右稳定运行后, 湿地污染物去除效果如表 1 所示.

表 1 试验期内不同湿地的污染物去除效果

Table 1 Treatment performance of different constructed wetlands during the experimental period						
污染物 ¹⁾	进水 /mg·L ⁻¹	出水/mg·L ⁻¹				
		BW-40	BW-30	BW-20	BW-10	CW-K
COD	414.12±10.67	39.73±8.77	44.71±12.96	45.75±14.03	50.51±11.77	49.63±14.86
NH ₄ ⁺ -N	19.67±1.57	8.04±2.54	9.40±2.71	9.93±2.20	11.23±3.03	12.71±3.21
NO ₃ ⁻ -N	31.40±1.02	ND ²⁾	ND	ND	ND	ND
TN	50.08±1.88	9.85±1.61	10.78±3.01	11.56±1.78	12.00±2.57	14.53±2.55

1) 污染物测定采用标准分析方法^[9]; 2) ND 表示未检出

1.2 植物叶片生长及鲜重

根据 Ibarra-Obando 等^[10]对水生植物叶片生长的测定方法,栽入湿地前,用防水笔在 AC 的根部顶端做上标记,待测定时取出 AC 并洗净,测出叶片根部顶端与标记之间的长度,即为该叶片生长量.每株 AC 标记 3 处,测其生长量后求平均值.AC 鲜重测定采用文献^[11,12]中的测定方法进行,具体方法如下:将 AC 从湿地中取出后,用自来水冲洗 2~3 遍,自由滤水 5 min,滤纸吸水 5 min 后,立即称量.

1.3 植物酶液提取、可溶性蛋白及光合色素测定

取新鲜的中等长度叶片,擦去叶片上的污物,截取距叶片尖端 10~20 cm 部分获得粗酶提取液^[13].可溶性蛋白(SP)含量参照 Bradford 法测定^[14],光合色素采用乙醇作为提取溶剂,参照植物生理学方法在 665、649、470 nm 下测定提取液吸光度值(A).利用如下公式计算叶绿素 a (Chla)、叶绿素 b (Chlb)、类胡萝卜素 (Car) 和总叶绿素 (Chlt)^[15,16]含量: $Chla = (13.95 \times A_{665}) - (6.68 \times A_{649})$, $Chlb = (24.96 \times A_{649}) - (7.32 \times A_{665})$, $Car = (1000 \times A_{470}) - (2.05 \times Chla) - (114.8 \times Chlb) / 245$, $Chlt = Chla + Chlb$.

1.4 SOD、POD、GS 活力及 MDA 含量测定

SOD 活力、POD 活力和 MDA 含量的测定参照文献^[17]的测定方法;谷氨酰胺合成酶(GS)活力的分析参照文献^[18]的改进方法.在 37℃ 条件下,每 mg 组织蛋白每分钟催化 1 μg 愈创木酚的酶量定义为一个 POD 活力单位;每 mg 组织蛋白在 1 mL 反应液中 SOD 抑制率达 50% 时所对应的 SOD 量为一个 SOD 活力单位;以每小时 37℃ 反应生成的 γ-谷氨酰氧肟酸的 1 μmol 的量为一个 GS 活力单位.

1.5 植物吸收氮素能力的测定

将 AC 从湿地中取出并且冲洗干净,然后迅速置于 1.2 L 的湿地进水中,将其放置于温室中[温度(25±2)℃,光照强度(3000±300)lx,光暗比 12 h:12 h],间隔一定的时间(0、8、12、16、20 和 24 h)取水样,并测其 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N. NH₄⁺-N 测定采用纳氏试剂分光光度法,NO₃⁻-N 测定采用紫外分光光度法.分别做出溶液中 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量与时间变化的线性拟合方程,得到斜率,再除以鲜重得到 AC 对 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的比吸收速率.

1.6 数据分析

全部分析测试均平行 3 次试验,试验数据通过 Origin 8.5 整理作图,并由 PASW Statistics 18.0 进

行数据分析.试验数据表达均采用平均值加或减标准差.对象之间相互关系采用相关性分析,并经 Pearson 检验(水平包括显著 $P < 0.05$ 和极显著 $P < 0.01$).对象之间的差异性分析采用 One-way ANOVA (水平包括显著 $P < 0.05$ 和极显著 $P < 0.01$).

2 结果与讨论

2.1 鲜重及叶片长度

相同时间内,不同生物炭湿地中,AC 的鲜重增长量如图 2 所示.相对于空白湿地中的 AC 而言,生物炭湿地中的 AC,其鲜重增长量均有所增高,但是增高幅度不同,AC 鲜重增长量均随生物炭添加量的增加而增加.经过单因素方差分析,随着生物炭添加量的增加,AC 的鲜重增长量显著增加.根据相关性检验,AC 的鲜重增长量与生物炭的添加量呈极显著正相关关系($R^2 = 0.992$, $P < 0.01$).

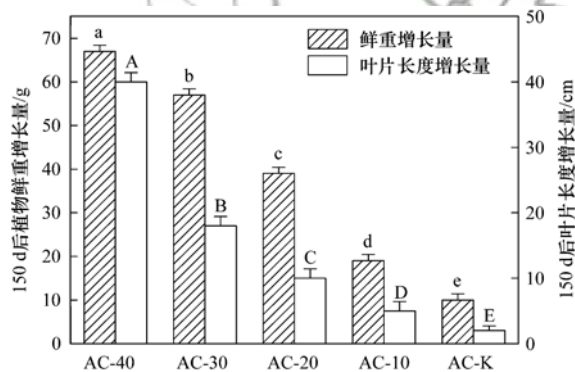


图2 不同湿地中 AC 鲜重和叶片长度增长量

Fig. 2 Increase in fresh weight and leaf length of AC in different constructed wetlands

相对于空白湿地中的 AC 而言,生物炭湿地中的 AC 叶片增长量均有所增高,但是增高幅度不同,AC 叶片增长量均随生物炭添加量的增加而增加(图 2).经过单因素方差分析,随着生物炭添加量的增加,AC 的叶片增长量显著增加.根据相关性检验,AC 的叶片增长量与生物炭的添加量呈显著正相关关系($R^2 = 0.924$, $P < 0.05$).

作为无机肥料的提供者,生物炭被报道能改善局部营养环境,为植物提供营养元素,提高植物产量^[19].根据现有土壤生态系统对生物炭的应用研究发现,通过添加生物炭,植物产量的响应范围为 -29%~324%^[19].在本研究中,生物炭添加对 AC 生长具有显著的促进作用,可能的原因包括:增强营养盐的保持^[20];改善离子交换能力^[21];增加孔隙率,改善基质环境,利于植物根系的生长发

育^[22]等.

2.2 光合色素、SP 含量和 GS 活力

湿地运行 150 d 后, 生物炭添加对湿地植物光合色素 (Chl_t、Chl_a、Chl_b 和 Car) 的影响如图 3 所示. 相对于 CW-K 而言, 生物炭湿地中 AC 的 Chl_a、Chl_b 和 Car 含量均有所增高, 但是增高幅度不同, AC 叶片内 Chl_a、Chl_b 和 Car 含量均随生物炭添加量的增加而增加. 经过单因素方差分析可知, 生物炭湿地中 AC 叶片 Car 含量的变化不显著, Chl_a、Chl_b 及 Chl_t 的含量在高生物炭添加比例 (30% ~ 40%) 的湿地之间变化不显著, 而在低生物炭添加比例 (0 ~ 20%) 的湿地之间变化显著. 根据相关性检验可知, Chl_t 和 Chl_b 的含量与生物炭的添加比例呈极显著正相关关系 ($R_1^2 = 0.960$, $R_2^2 = 0.970$, $P < 0.01$), Chl_a 和 Car 的含量与生物炭的添加比例呈显著正相关关系 ($R_1^2 = 0.953$, $R_2^2 = 0.924$, $P < 0.05$).

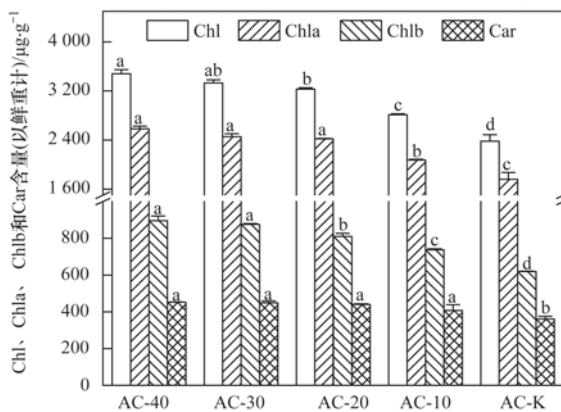


图3 不同湿地中 AC 光合色素含量

Fig. 3 Photosynthetic pigment content in AC in different constructed wetlands

除了 AC-10 中 SP 含量与 AC-K 无显著差异外, 其余湿地中 AC 的 SP 含量随生物炭添加比例的增大显著增加 (图 4), 并呈极显著正相关关系 ($R^2 = 0.981$, $P < 0.01$). 光合色素作为绿色植物光合系统中的重要部分对植物的代谢具有显著影响. 在本研究中, 生物炭添加显著增加了 AC 体内的 Chl_a 和 Chl_b 含量, 增强光合作用, 利于植物体内 SP 的积累和植物生物量的增加. Car 是一大类脂溶性抗氧化剂, 可以作为自由基清除剂, 并能替代过氧化物酶, 保护植物体内的叶绿体. 因此, 生物炭湿地 AC 中 Car 的增加, 有利于增强叶绿体进行光合作用的能力, 促进植物代谢, 加速碳水化合物的合成, 表现出对 SP 的正效应.

生物炭湿地中 AC 的 GS 活力显著高于空白湿

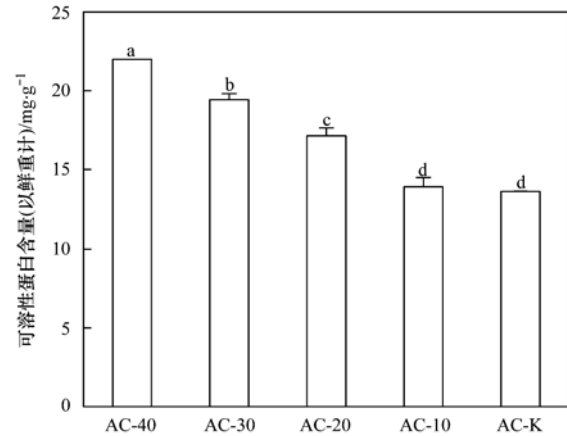


图4 不同湿地中 AC 的 SP 含量

Fig. 4 SP content in AC in different constructed wetlands

地 CW-K, 且随着生物炭添加量的增加, 逐渐呈显著增大的趋势 (图 5). GS 作为连接植物体内碳氮代谢的关键酶, 在无机氮转化为有机氮的过程中起重要作用. 在 ATP 存在的情况下, GS 负责将 NH_4^+ -N 和谷氨酸合成谷氨酰胺^[18]. 在本研究中, 5 组人工湿地的出水 NH_4^+ -N 浓度均超过 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 不会对 AC 造成 NH_4^+ -N 限制^[23], 因此, 通过添加生物炭能够促进植物生长, 同时加强 GS 活力, 增强植物体内 NH_4^+ -N 的合成代谢, 利于 AC 吸收去除 NH_4^+ -N. 另外, 根据相关性检验可知, AC 叶片中的 GS 活性与生物炭的添加量呈显著正相关关系 ($R^2 = 0.944$, $P < 0.05$).

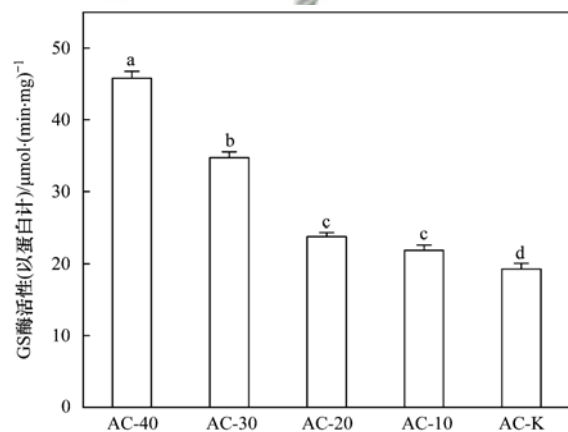


图5 不同湿地中 AC 的 GS 活力

Fig. 5 GS activities of AC in different constructed wetlands

2.3 植物吸收 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 能力

生物炭湿地中 AC 对 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的比吸收速率显著高于空白湿地 CW-K, 且随着生物炭添加量的增加, 逐渐呈显著增大的态势 (表 2 和图 6). 这与 GS 活性的变化趋势是一致的, 生物炭的添加增强了 GS 的活性, 而 GS 在植物体内氮代谢过程中

具有重要作用, GS 活性的增强促进了植物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸收. 另外, 相关性分析可知, 植物对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的比吸收速率与生物炭的添加量呈显著正相关关系 ($R^2 = 0.950$, $P < 0.05$), 植物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的比吸收速率与生物炭的添加量呈极显著正相关关系 ($R^2 = 0.996$, $P < 0.01$).

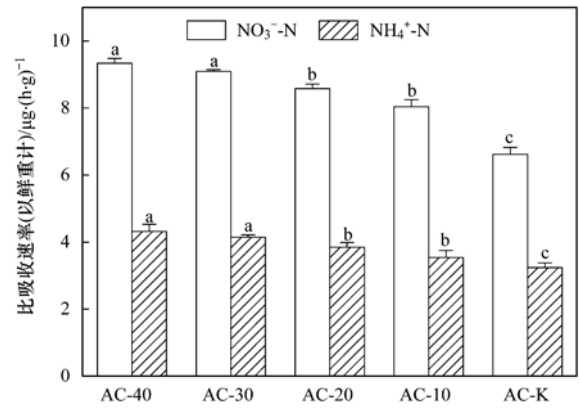


图6 不同湿地植物的比吸收速率

Fig. 6 Relative uptake rates of AC in different constructed wetlands

表2 湿地植物吸收 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的拟合方程、决定系数和比吸收速率(以鲜重计)

Table 2 Fitting equations, determination coefficients, and relative $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ uptake rates of wetland plants				
吸收种类	植物	拟合方程	R^2	比吸收速率 $/\mu\text{g}\cdot(\text{h}\cdot\text{g})^{-1}$
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	AC-40	$y = -1.53x + 29.78$	0.975	9.339
	AC-30	$y = -1.11x + 32.49$	0.981	9.092
	AC-20	$y = -0.96x + 32.42$	0.982	8.581
	AC-10	$y = -0.86x + 33.58$	0.814	8.037
	AC-K	$y = -0.50x + 32.37$	0.745	6.617
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	AC-40	$y = -0.67x + 22.20$	0.982	4.321
	AC-30	$y = -0.51x + 22.44$	0.994	4.148
	AC-20	$y = -0.43x + 22.69$	0.981	3.848
	AC-10	$y = -0.45x + 21.45$	0.954	3.541
	AC-K	$y = -0.35x + 22.56$	0.963	3.241

2.4 湿地植物的氧化应激响应

不同生物炭湿地中, AC 的 SOD 和 POD 活性如图 7 所示. 相对于 CW-K 而言, 生物炭湿地中 AC 的 SOD 活性均有所降低, 但是降低的幅度不同, AC 的 SOD 活性均随生物炭添加比例的增加而降低. 经过单因素方差分析可知, 随着生物炭添加量的变化, AC 的 SOD 活性变化显著. 根据相关性检验可知, AC 的 SOD 活性与生物炭的添加比例呈极显著负相关关系 ($R^2 = -0.966$, $P < 0.01$).

相对于 CW-K 而言, 生物炭湿地中 AC 的 POD 活性均有所降低, 但是降低的幅度不同, AC 的

POD 活性均随生物炭添加比例的增加而降低. 经过单因素方差分析可知, 在高生物炭添加比例的湿地之间, AC 的 POD 活性变化不显著, 但是在低生物炭添加比例的湿地之间变化显著. 根据相关性检验可知, AC 的 POD 活性与生物炭的添加比例呈极显著负相关关系 ($R^2 = -0.992$, $P < 0.01$).

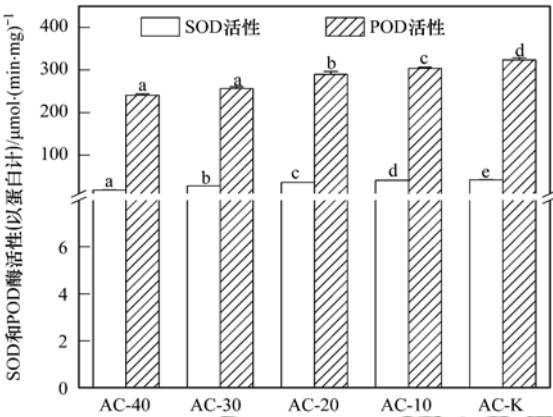


图7 不同湿地中 AC 的 SOD 和 POD 活力

Fig. 7 SOD and POD activities of AC in different constructed wetlands

当植物处于过氧化胁迫阶段, 植物体内对适应和生存极为重要的几个功能相关的抗氧化系统将去除体内多余的 ROS^[24]. SOD 是抗氧化防御系统的重要组成部分, 最先承担着将超氧化物(如 O_2^-)催化为 H_2O_2 的任务^[25]. 因此, 高 SOD 活性意味着植物承受的胁迫压力更大^[26]. 本试验结果表明, 因湿地长期处于缺氧(或厌氧)的环境, AC 体内可能发生前述的过氧化应激反应, 而随着生物炭添加量的增大, SOD 活力显著降低. 生物炭有利于缓解 AC 体内超氧化物的积累, 减少植物的过氧化应激反应. SOD 催化产生的 H_2O_2 需要经 POD 进一步催化分解, 因此, POD 活力变化与 SOD 相对应, 表现出一致的变化规律 ($R^2 = 0.971$, $P < 0.01$). 生物炭对 POD 也具有同样的影响. 在高生物炭添加比例下(40%和30%), 生物炭的添加降低植物体内 SOD 活力同时, 代谢产生的 H_2O_2 未有明显变化, 并未对 POD 活力有根本改变. 由于在不同湿地中 AC 体内 SOD 和 POD 活力水平同步变化, 体内的 O_2^- 和 H_2O_2 是否能被全部催化降解需要结合 MDA 变化进一步讨论.

从图 8 中可以发现, 5 组湿地植物 AC 体内 MDA 含量(以蛋白计)均超过 $6\text{ nmol}\cdot\text{mg}^{-1}$, 说明在 5 组菖蒲体内 O_2^- 和 H_2O_2 并未完全被 SOD 和 POD 催化降解. 尽管有报道 AC 是一类对缺氧条件具有显著抵抗能力的湿地植物, 但湿地长期的缺氧(或

厌氧)环境会对 AC 体内造成膜脂被氧化的不良影响。生物炭添加(添加量 20% ~ 40%)虽然能缓解 AC 体内超氧化物和过氧化物的积累,显著降低 AC 体内 MDA 含量,但仍无法完全消除湿地长期缺氧(或厌氧)带来的过氧化胁迫。

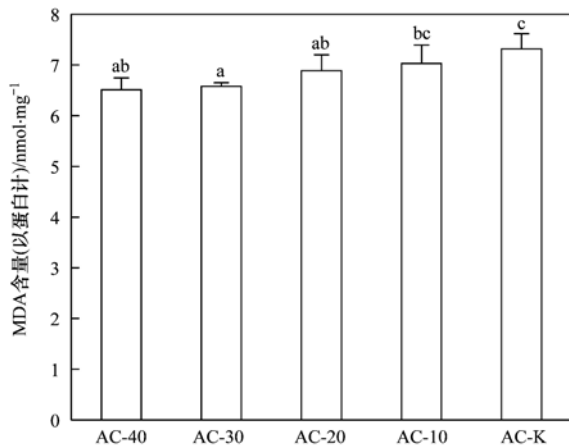


图 8 不同湿地中 AC 的 MDA 含量

Fig. 8 MDA content in AC in different constructed wetlands

3 结论

(1)生物炭能够促进湿地中菖蒲的新陈代谢,增加菖蒲体内光合色素含量,利于植物体内可溶性蛋白的积累和植物生物量的增加。

(2)生物炭可以提高菖蒲的谷氨酰胺合酶活性,增强植物体内氮氮的合成代谢,增加菖蒲对氮氮的比吸收速率。

(3)湿地长期缺氧或厌氧环境会对菖蒲体内造成膜脂氧化,MDA 含量(以蛋白计)均超过 6 nmol·mg⁻¹。20% ~ 40% 生物炭添加虽然能缓解菖蒲体内超氧化物和过氧化物的积累,显著降低菖蒲体内丙二醛含量,但仍无法完全消除湿地长期缺氧(或厌氧)带来的过氧化胁迫。

参考文献:

- [1] Pezeshki S R. Wetland plant responses to soil flooding[J]. Environmental and Experimental Botany, 2001, **46**(3): 299-312.
- [2] Armstrong J, Jones R E, Armstrong W. Rhizome phyllosphere oxygenation in *Phragmites* and other species in relation to redox potential, convective gas flow, submergence and aeration pathways[J]. New Phytologist, 2006, **172**(4): 719-731.
- [3] Ribaud C, Bartoli M, Racchetti E, et al. Seasonal fluxes of O₂, DIC and CH₄ in sediments with *Vallisneria spiralis*: indications for radial oxygen loss[J]. Aquatic Botany, 2011, **94**(3): 134-142.
- [4] Lemoine D G, Mermillod-Blondin F, Barrat-Segretain M H, et al. The ability of aquatic macrophytes to increase root porosity and radial oxygen loss determines their resistance to sediment anoxia[J]. Aquatic Ecology, 2012, **46**(2): 191-200.
- [5] Piccolo A, Pietramellara G, Mbagwu J S C. Effects of coal derived humic substances on water retention and structural stability of Mediterranean soils[J]. Soil Use and Management, 1996, **12**(4): 209-213.
- [6] Graber E R, Harel Y M, Kolton M, et al. Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media[J]. Plant and Soil, 2010, **337**(1-2): 481-496.
- [7] Zhou X, Liang C L, Jia L X, et al. An innovative biochar-amended substrate vertical flow constructed wetland for low C/N wastewater treatment: Impact of influent strengths [J]. Bioresource Technology, 2018, **247**: 844-850.
- [8] Huang L, Chen Y C, Liu G, et al. Non-isothermal pyrolysis characteristics of giant reed (*Arundo donax* L.) using thermogravimetric analysis[J]. Energy, 2015, **87**: 31-40.
- [9] 国家环境保护总局. 水和废水检测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [10] Ibarra-Obando S E, Boudouresque C F. An improvement of the Zieman leaf marking technique for *Zostera marina* growth and production assessment[J]. Aquatic Botany, 1994, **47**(3-4): 293-302.
- [11] Bergmann B A, Cheng J, Classen J, et al. Nutrient removal from swine lagoon effluent by duckweed [J]. Transactions of the ASAE, 2000, **43**(2): 263-269.
- [12] Reinhold D M, Saunders F M. Phytoremediation of fluorinated agrochemicals by duckweed[J]. Transactions of the ASABE, 2006, **49**(6): 2077-2083.
- [13] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. Analytical Biochemistry, 1976, **72**(1-2): 248-254.
- [15] Xiong Z T, Liu C, Geng B. Phytotoxic effects of copper on nitrogen metabolism and plant growth in *Brassica pekinensis* Rupr [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2006, **64**(3): 273-280.
- [16] Song G L, Hou W H, Wang Q H, et al. Effect of low temperature on eutrophicated waterbody restoration by *Spirodela polyrhiza* [J]. Bioresource Technology, 2006, **97**(15): 1865-1869.
- [17] Wang C, Zhang S H, Wang P F, et al. Effects of ammonium on the antioxidative response in *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle plants[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2010, **73**(2): 189-195.
- [18] Hong H S, Wang Y J, Wang D Z. Response of phytoplankton to nitrogen addition in the Taiwan strait upwelling region: Nitrate reductase and glutamine synthetase activities [J]. Continental Shelf Research, 2011, **31**(S6): S57-S66.
- [19] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal-a review[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, **35**(4): 219-230.
- [20] Lehmann J, De Silva Jr J P, Steiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. Plant and Soil, 2003, **249**(2): 343-

- 357.
- [21] Liang B, Lehmann J, Solomon D, *et al.* Black carbon increases cation exchange capacity in soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, **70**(5): 1719-1730.
- [22] Chan K Y, Van Zwieten L, Meszaros I, *et al.* Using poultry litter biochars as soil amendments [J]. Australian Journal of Soil Research, 2008, **46**(5): 437-444.
- [23] Huang L, Lu Y Y, Gao X, *et al.* Ammonium-induced oxidative stress on plant growth and antioxidative response of duckweed (*Lemna minor* L.) [J]. Ecological Engineering, 2013, **58**: 355-362.
- [24] Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance[J]. Trends in Plant Science, 2002, **7**(9): 405-410.
- [25] Davies L C, Cabrita G J M, Ferreira R A, *et al.* Integrated study of the role of *Phragmites australis* in azo-dye treatment in a constructed wetland: From pilot to molecular scale [J]. Ecological Engineering, 2009, **35**(6): 961-970.
- [26] Apel K, Hirt H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction [J]. Annual Review of Plant Biology, 2004, **55**: 373-399.
-

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2017年10月31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2016年度中国科技论文统计结果.统计结果显示《环境科学》2015年度总被引频次10 024,影响因子1.878,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

Diurnal Variation of SOA Formation Potential from Ambient Air at an Urban Site in Beijing	LIU Jun, CHU Bi-wu, HE Hong (2505)
Characteristics of Key Size Spectrum of PM _{2.5} Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan	YANG Su-ying, YU Xin-yang, ZHAO Xiu-yong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Panjin	ZHANG Lei, JI Ya-qin, WANG Shi-bao, <i>et al.</i> (2521)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in the Rainy Season of Guangzhou City	GU Ying-gang, YU Xiao-fang, YANG Wen-da, <i>et al.</i> (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning	JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, <i>et al.</i> (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin	CAI Zi-ying, HAN Su-qin, ZHANG Min, <i>et al.</i> (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China	ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region	LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, <i>et al.</i> (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China	GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, <i>et al.</i> (2576)
Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters During High Water Level Periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China	DONG Lei, TANG Xian-qiang, LIN Li, <i>et al.</i> (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province	ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, <i>et al.</i> (2600)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China	FANG Zhi-qing, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2607)
Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m	PAN Chan-juan, LI Rui, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2615)
Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, DING fei, <i>et al.</i> (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (2632)
Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drip Water Hydrogeochemistry in the Xueyu Cave of Chongqing and Its Implications for Environmental Research	ZENG Ze, JIANG Yong-jun, LÜ Xian-fu, <i>et al.</i> (2641)
Distinguishing the Compositions and Sources of the Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River During the Dry Season; A Case Study in Bitan River, Jinfo Mountain	LIU Yue, HE Qiu-fang, LIU Ning-kun, <i>et al.</i> (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin	LI Yong-ge, LI Zong-xing, GAO Hao-yang, FENG Qi, <i>et al.</i> (2661)
Spatial-Temporal Variations of CO ₂ and CH ₄ Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir	PENG Wen-jie, LI Qiang, SONG Ang, <i>et al.</i> (2673)
Spatiotemporal Succession Characteristics of Algal Functional Groups and Its Impact Factors for a Typical Channel-Type Reservoir in a Southwest Mountainous Area	ZHANG Yao-wen, LI Hong, LI Jia, <i>et al.</i> (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir	ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, <i>et al.</i> (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium <i>Chrysosporum ovalisporum</i> ; An In-situ Experiment	WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, <i>et al.</i> (2698)
Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios	LIU Miao, CHEN Kai-ning (2706)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Concentration Dynamics in Natural Ditches Under an Irrigation-Drainage Unit in the Jiangnan Plain	HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China	CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, <i>et al.</i> (2724)
Effects and Mechanism of the Combination of Ozone-PAC as a Pretreatment for the Reduction of Membrane Fouling	DONG Bing-zhi, GAO Hao-yang, HU Meng-liu (2732)
Start-up and Process Characteristics of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) in a Pilot-scale Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR)	YU De-shuang, TANG Jia-jia, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly(<i>N</i> -isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network	ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, <i>et al.</i> (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater	LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (2756)
Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization	YANG Hong, HU Yin-long (2763)
Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies	AN Fang-jiao, PENG Yong-zhen, DONG Zhi-long, <i>et al.</i> (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion	ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (2778)
Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere	LI Yu, FANG Wen, QI Guang-xia, <i>et al.</i> (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria	GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, <i>et al.</i> (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate	MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Elevated Tetracycline Concentrations on Aerobic Composting of Human Feces: Composting Behavior and Microbial Community Succession	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian, <i>et al.</i> (2810)
Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain	YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, <i>et al.</i> (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, <i>et al.</i> (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via ¹³ C Pulse-labeling	SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China	YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, <i>et al.</i> (2845)
Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in the Soils of the Jiangsu Coast	LÜ Jian-shu, HE Hua-chun (2853)
Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River	YU Yuan-he, LÜ Jian-shu, WANG Ya-meng (2865)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation	ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, <i>et al.</i> (2875)
Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China	ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, <i>et al.</i> (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical <i>Carya cathayensis</i> Production Area	ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (2893)
Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands	HUANG Lei, CHEN Yu-cheng, ZHAO Ya-qi, <i>et al.</i> (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils	WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (2919)
Effect of Calcium Silicate-biological Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil	LIU De-ling, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province	LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-hai, <i>et al.</i> (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi	WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, <i>et al.</i> (2944)
Mercury Distribution of Benthonic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province	XU Yi-yuan, ZENG Ling-xia, HE Tian-rong, <i>et al.</i> (2953)
Discussion of Emissions and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from the Retreading Process of Waste Tires	FU Jian-ping, ZHAO Bo, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (2963)
Spatiotemporal Dynamics of CO ₂ Emissions in Chongqing: An Empirical Analysis at the County Level	SUN Xiu-feng, SHI Kai-fang, WU Jian-ping (2971)
Impact of Size on Environmental Behavior of Metal Oxide Nanoparticles	YAN Yu-peng, TANG Ya-dong, WAN Biao, <i>et al.</i> (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments	ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, <i>et al.</i> (2991)