

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第10期

Vol.39 No.10

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

我国典型城市环境大气挥发性有机物特征比值	王鸣, 陈文泰, 陆思华, 邵敏 (4393)
2015年北京大气 VOCs 时空分布及反应活性特征	张博韬, 安欣欣, 王琴, 闫贺, 刘保献, 张大伟 (4400)
北京市建筑类涂料 VOCs 排放清单编制技术方法及应用	邓子钰, 高美平, 王庆玮, 聂磊 (4408)
基于实测的建筑类涂料挥发性有机物 (VOCs) 含量水平及组分特征	高美平, 邓子钰, 聂磊, 邵霞, 安小栓 (4414)
2014~2016年京津冀沿山城市空气质量首要污染物特征分析	王晓彦, 王帅, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (4422)
北京市大气环境 PM _{2.5} 和 PM ₁ 及其碳质组分季节变化特征及来源分析	樊啸辰, 郎建奎, 程水源, 王晓琦, 吕喆 (4430)
南京春季北郊地区大气 PM _{2.5} 中主要化学组分及碳同位素特征	周一鸣, 韩珣, 王瑾瑾, 陈善莉, 沈潇雨, 章炎麟, 朱彬, 郭照冰 (4439)
热脱附法快速分析大气细颗粒物中非极性有机物	马英歌, 吴霞, 彭梦梦, 冯加良, 郁建珍, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 李莉 (4446)
杭州市空气细颗粒物浓度与哮喘就诊人次的关系	王安旭, 陈曦, 宋从波, 应颂敏, 李倩, 吴琳, 毛洪钧 (4457)
基于远程通讯技术的混动公交车 SCR 系统运行及 NO _x 排放特征	杨强, 胡馨遥, 黄成, 陈昀, 刘佳栋, 李莉, 熊忠亮, 唐伟 (4463)
基于环境风险排序的流域优先污染物筛选	李奇峰, 吕永龙, 王佩, 张悦清 (4472)
重庆远郊丰都雪玉洞流域大气无机氮湿沉降变化特征与来源分析	段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 胡刘婵, 曾泽, 吕现福 (4479)
黑龙江凉水国家级自然保护区大气氮沉降特征	宋蕾, 田鹏, 张金波, 金光泽 (4490)
脱甲河水系 N ₂ O 关键产生过程及氮素来源探讨	赵强, 吕成文, 秦晓波, 吴红宝, 万运帆, 廖育林, 鲁艳红, 李健陵 (4497)
生物炭添加对曝气人工湿地脱氮及氧化亚氮释放的影响	王宁, 黄磊, 罗星, 梁岩, 王燕, 陈玉成 (4505)
黑麦草对水体中镉-壬基酚复合污染的生理响应及修复	史广宇, 李中义, 张路, 程媛媛, 陈宏伟, 施维林 (4512)
城市黑臭水体的吸收特性分析	丁潇蕾, 李云梅, 吕恒, 朱利, 温爽, 雷少华 (4519)
岷江上游水体中 DOM 光谱特征的季节变化	范诗雨, 秦纪洪, 刘堰杨, 孙辉 (4530)
防渗型生物滞留中试系统降雨径流水质与三维荧光特征	林修咏, 王书敏, 李强, 谢云成 (4539)
基于δ ¹⁵ N和δ ¹⁸ O的农业区地下河硝酸盐污染来源	盛婷, 杨平恒, 谢国文, 洪爱花, 曹聪, 谢世友, 时伟宇 (4547)
垃圾填埋场地下水溶解性有机物光谱特征	彭莉, 虞敏达, 何小松, 刘思佳, 张鹏 (4556)
铅负载颗粒沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附行为	梁舒静, 林建伟, 詹艳慧, 汪振华, 李雅灵, 何思琪, 陈海洋, 唐凤霞, 李志强 (4565)
基于紫外光谱分析的腐殖质混凝控制	张北辰, 张晓蕾, 秦兰兰, 黄海鸥 (4576)
AAO 工艺联合臭氧削减污水中微量有机污染物及遗传毒性	李默, 汪震哲, 陈志强, 温沁雪 (4584)
抗生素抗性基因在两级废水处理系统中的分布和去除	李奥林, 陈吕军, 张衍, 代天娇, 田金平, 刘锐, 温东辉 (4593)
磁性壳聚糖凝胶球固定厌氧铁氨氧化菌对废水氨氮去除的影响	刘志文, 陈琛, 彭晓春, 谢武明, 黄镇扬, 韩庆吉 (4601)
海藻糖强化厌氧氨氧化耦合反硝化工艺处理高盐废水的脱氮除碳效能	杨振琳, 于德爽, 李津, 王晓霞, 冯莉 (4612)
低温下 A ² /O-BAF 反硝化除磷脱氮特性	黄剑明, 赵智超, 郑隆举, 邵兆伟, 安芳娇, 陈永志 (4621)
O ₃ -BAC 深度处理石化废水厂尾水的特性及菌群结构分析	张超, 单明皓, 许丹宁, 古明哲, 代蓓蓓, 纪轩, 孙井梅 (4628)
基于 MBR 不同种泥短程硝化启动的微生物群落结构分析	吴鹏, 陈亚, 张婷, 沈耀良, 徐乐中 (4636)
3 种不同工艺切换下活性污泥菌群结构及代谢产物对污泥沉降性能的影响	温丹丹, 袁林江, 陈希, 王洋, 申童童, 刘小博 (4644)
硫酸盐还原菌活性污泥胞外聚合物对环丙沙星的吸附机制	张会群, 贾妍艳, 方荷婷, 阴琳婉, 吕慧 (4653)
包埋活性污泥反硝化性能的快速提高及群落分析	杨宏, 徐富, 孟琛, 苏姗, 袁星 (4661)
中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析	尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 黄彩红 (4670)
典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价	马宏宏, 余涛, 杨忠芳, 侯青叶, 曾庆良, 王锐 (4684)
秸秆与化肥减量配施对菜地土壤温室气体排放的影响	黄容, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 吕盛, 罗梅 (4694)
不同肥料施用对设施蔬菜地 NH ₃ 挥发和 N ₂ O 排放的影响	山楠, 韩圣慧, 刘继培, 陈清, 袁玉玲, 王立刚, 李虎 (4705)
施肥类型和水热变化对农田土壤氮素矿化及可溶性有机氮动态变化的影响	田飞飞, 纪鸿飞, 王乐云, 郑西来, 辛佳, 能惠 (4717)
长期不同施肥量对全程氨氧化细菌丰度的影响	王梅, 王智慧, 石孝均, 蒋先军 (4727)
典型绿洲不同土壤类型有机碳含量及其稳定碳同位素分布特征	陈新, 贡璐, 李杨梅, 安申群, 赵晶晶 (4735)
凹凸棒石及其改性材料对土壤镉生物有效性的影响与机制	陈展祥, 陈传胜, 陈卫平, 焦文涛 (4744)
天然有机物活化过硫酸盐降解土壤有机污染物效果	刘琼枝, 廖晓勇, 李尤, 龚雪刚, 曹红英, 罗俊鹏 (4752)
水分管理和外源硒对水稻吸收累积铅的影响	万亚男, 刘哲, Aboubacar Younoussa Camara, 余垚, 王琪, 李花粉 (4759)
窖水中微生物降解污染物的关键细菌	杨浩, 杨晓妮, 张国珍, 王宝山, 张翔, 李健 (4766)
砷氧化菌对胡敏酸络合 As(Ⅲ) 的氧化作用	李泽姣, 崔岩山, 尹乃毅, 蔡晓琳, 都慧丽, 王鹏飞 (4778)
海域高温油田 1 株耐高温耐盐硫酸盐还原菌的筛选与生理特性及活性抑制	杨春璐, 苑美玉, 史荣久, 闫鹏举, 赵峰, 韩斯琴, 张颖 (4783)
1 株耐盐异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Zobellella</i> sp. B307 的分离及脱氮特性	白洁, 陈琳, 黄潇, 胡春辉, 赵阳国, 李岍然 (4793)
1 株镰刀菌属 KY123915 的分离及其对 17β-雌二醇的降解特性	吴蔓莉, 祝长成, 祁燕云, 时艺馨, 徐会宁, 杨瑾如 (4802)
氟喹诺酮对垂直流人工湿地性能及微生物群落的影响	李新慧, 郑权, 李静, 王晓慧, 海热提 (4809)
林可霉素菌渣堆肥微生物群落多样性分析	任省涛, 郭夏丽, 芦阿度, 张倩倩, 郭笑盈, 王岩, 王连忠, 张宝宝 (4817)
DEP 对蚯蚓抗氧化酶系的影响及 DNA 损伤	平令文, 李现旭, 张翠, 宋佩佩, 王金花, 朱鲁生, 王军 (4825)
生活垃圾焚烧灰灰矿物学特性及重金属分布	李建陶, 曾鸣 (4834)
《环境科学》征订启事 (4429) 《环境科学》征稿简则 (4471) 信息 (4529, 4777, 4816)	

生物炭添加对曝气人工湿地脱氮及氧化亚氮释放的影响

王宁^{1,2}, 黄磊^{1,2*}, 罗星¹, 梁岩¹, 王燕¹, 陈玉成^{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: 尽管增加曝气会提升潜流人工湿地中溶解氧(DO)浓度, 改善污染物去除效果, 但由于湿地中氧扩散条件差, 易引起DO分布不均, 导致氧化亚氮(N_2O)的排放。生物炭由于孔隙率大、比表面积大, 近年来逐渐被应用于传统湿地系统, 实现强化脱氮和温室气体减排。为了探讨生物炭对曝气潜流湿地的影响, 本实验在温室构建曝气生物炭潜流湿地(SW), 以常规曝气潜流湿地(CW)作为参照, 探究生物炭投加对湿地系统脱氮性能及 N_2O 排放的影响。结果表明, SW系统曝气段平均DO浓度为 $2.66\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 较CW提高了 $0.42\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。SW系统平均出水 NH_4^+-N 和总氮(TN)浓度为 $0.17\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.98\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率分别达到99.5%和95.0%, 较CW提高了5.1%和6.9%。生物炭的投加对湿地系统有机物污染去除效果无显著影响($P>0.05$), 出水化学需氧量(COD)稳定在 $25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率达到94.0%。SW系统中 N_2O 的平均释放速率为 $0.27\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 较CW系统降低了70.7%。因此, 生物炭投加可作为一种有效的控制手段来强化曝气湿地系统脱氮, 实现 N_2O 气体减排。

关键词: 生物炭; 潜流人工湿地; 间歇曝气; 脱氮; 氧化亚氮释放

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)10-4505-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201801302

Impact of Biochar on Nitrogen Removal and Nitrous Oxide Emission in Aerated Vertical Flow Constructed Wetland

WANG Ning^{1,2}, HUANG Lei^{1,2*}, LUO Xing¹, LIANG Yan¹, WANG Yan¹, CHEN Yu-cheng^{1,2}

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

Abstract: In an intermittent aerated vertical flow constructed wetland, the dissolved oxygen (DO) distribution tends to be inhomogeneous because of poor diffusivity resulting in the production and emission of nitrous oxide (N_2O). As a multifunctional environmental material with numerous porosities and a large specific area, biochar has been recently applied to enhance pollutant removal and reduce greenhouse gas emissions in traditional wetland systems. Using the conventional aerated vertical flow constructed wetlands (CW) as the comparison, biochar-amended wetland microcosms (SW) were built in greenhouses to investigate the influence of biochar on nitrogen removal and N_2O emissions. The results showed that DO concentration in the aeration stage increased by $0.42\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in SW. Furthermore, SW achieved higher removal efficiencies for NH_4^+-N (99.5%) and total nitrogen (TN; 95.0%) than CW. Similar removal rates of chemical oxygen demand (COD), close to 94%, were observed in CW and SW, indicating that no significant effects resulted from adding biochar ($P>0.05$). Additionally, N_2O emission fluxes of CW and SW were $0.92\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ and $0.27\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, respectively. The N_2O cumulative emission in SW was $6.58\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$, which was significantly lower than that in CW ($22.03\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$). Biochar addition could be an effective strategy to promote nitrogen removal and reduce N_2O emissions.

Key words: biochar; subsurface flow constructed wetland; intermittent aeration; nitrogen removal; nitrous oxide emission

人工湿地具有成本低、操作维护简单、二次污染小等优点, 被应用于各类废水处理^[1,2]。然而, DO的缺乏限制了人工湿地的广泛应用。人工曝气作为一种提高DO浓度的有效手段, 被用于提高湿地系统处理性能^[3,4]。由于持续曝气运行成本高, 且易引起硝化和反硝化的矛盾^[5], 因此, 间歇曝气作为一种降低运行成本的优化方法, 可以创造交替好氧和厌氧环境, 提高脱氮性能^[6]。

然而, 间歇曝气人工湿地中氧扩散效率较低^[7], 易造成系统DO分布不均, 导致温室气体 N_2O 的排放量增加^[8]。Schultness等^[9]发现当DO浓度由0升至 $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, N_2O 占气态产物的比率由0上升

至6%。生物炭作为一种多功能的环保材料, 近年来逐渐被应用于人工湿地污水处理过程。Sun等^[10]将生物炭和污泥基质应用于间歇曝气地下污水渗滤系统, 实现13.5% TN去除效果的提升。Zhou等^[11]将生物炭应用于垂直潜流人工湿地中, 提高了系统的脱氮性能, 降低了系统 N_2O 释放通量。尽管已有生物炭对传统潜流人工湿地污染物去除及温室气体排放

收稿日期: 2018-01-31; 修订日期: 2018-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408493); 重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2016jcyjA0523); 西南大学资源环境学院“光炯”创新项目(201717)

作者简介: 王宁(1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染治理与水生态修复, E-mail: 1037636552@qq.com

* 通信作者, E-mail: lei.huang@swu.edu.cn

的影响的相关研究,但国内外关于生物炭在间歇曝气人工湿地中的应用的研究还非常有限.故本实验通过构建曝气生物炭潜流人工湿地系统,探究了生物炭对系统脱氮及 N_2O 释放的影响,以期生物炭在人工湿地中进一步的应用提供依据.

1 材料与方法

1.1 实验装置

本实验装置为聚乙烯塑料圆筒(图1),每个容器表面积为 0.1 m^2 ,深为 35 cm .根据侯洁^[12]的研究结果,按40%的体积比投加生物炭构建微型湿地系统,并以无生物炭添加的常规湿地系统作为对比,分别命名为SW和CW.湿地系统中,按照比例填充砾石(平均粒径 2 mm)和生物炭.系统中两根PVC穿孔管用于虹吸排水、取样及各种物理和化学参数的测定.系统外壁设 5 cm 水浴层,并利用加热棒加热保持室温(26 ± 1) $^\circ\text{C}$.系统底部设有曝气头,利用气泵进行人工曝气增氧,利用气体质量流量控制器(AST10-DX,阿斯特,北京)精确控制流量(660 ± 5) $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$,时间开关控制曝气时间.

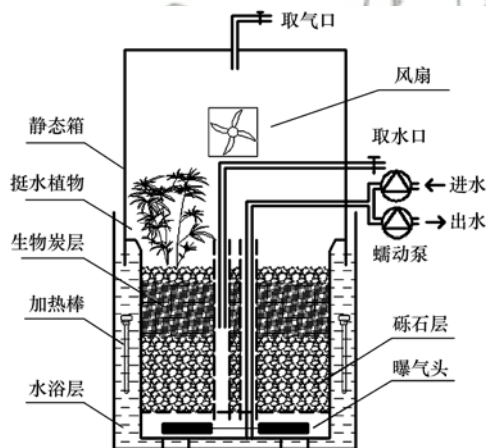


图1 实验装置示意

Fig. 1 Scheme of the experimental microcosm

本实验生物炭原料为芦竹秸秆,洗净烘干后置于气氛炉(SMX1100-20,上海尚群,中国)中,以 $10\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的升温速率,在终温 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 热解炭化 2 h 获得.所获得生物炭的比表面积为 $345.92\text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,孔径为 1.95 nm ,孔容为 $0.2467\text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$.湿地植物选用旱伞草(*Cyperus alternifolius* L.),经实验室驯化后以 $36\text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$ 的种植密度植入湿地系统.污泥取自某生活污水处理厂,经实验室驯化后接种湿地系统.

1.2 系统运行

人工湿地进水采用自来水配置,并经蠕动泵

(BT-300EA,重庆杰恒,中国)进行周期进出水,每升进水包括:蔗糖 114 mg ;蛋白胨 7.5 mg ; $233\text{ mg C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$; $160\text{ mg NH}_4\text{Cl}$; 200 mg NaHCO_3 ; $11\text{ mg KH}_2\text{PO}_4$; $18\text{ mg K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$; $10\text{ mg MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; $10\text{ mg FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; 7.6 mg CaCl_2 和 1 mL 微量元素液.每升微量元素液包括: $0.15\text{ g H}_3\text{BO}_3$; $0.03\text{ g CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; 0.18 g KI ; $0.12\text{ g MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; $0.06\text{ g Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; $0.12\text{ g ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; $0.15\text{ g CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 10 g EDTA-Na_2 .进水水质包括: $(405 \pm 9)\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}\text{ COD}$, $(35.5 \pm 0.6)\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}\text{ NH}_4^+-\text{N}$, $(39.4 \pm 0.6)\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}\text{ TN}$,进水pH控制为 7.6 ± 0.3 .曝气方式为间歇曝气,停留时间 24 h ,包括4个阶段,每个阶段曝气 3 h (曝气段)、闲置 3 h (闲置段),曝气段DO控制为 $(2.0 \pm 0.3)\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.湿地有效进水量为 12 L .

1.3 样品收集及测定方法

1.3.1 水质分析

本实验为期半年,系统稳定运行期间每 $2 \sim 3\text{ d}$ 进行一次水质测定;典型周期内水质测定在系统稳定定期进行,时间间隔为 $0.5 \sim 3\text{ h}$ (视反应情况而定).其中,进出水污染物COD、 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、硝态氮(NO_3^--N)、总氮(TN)浓度均按照标准方法进行测定^[13];DO和水温(T)使用溶解氧仪(YSI-550A,美国DAKODA公司)测定;pH值使用pH计(PB-10,德国Sartorius公司)测定.

1.3.2 N_2O 采集与测定

根据姜秀丽^[14]的研究方法,气态 N_2O 采集采用静态箱法:在反应周期的闲置段保证反应器完全密闭,曝气段采样口开放以排气;每间隔 $10 \sim 30\text{ min}$ 抽取反应器上部空间混合器于气体采样袋中.溶解态 N_2O 采用上部空间法:于反应器内取 30 mL 混合液缓慢加入顶空瓶中,立即加入 $1\text{ mL } 3\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HgCl_2 溶液(抑制微生物活性),通入氮气排尽空气后迅速塞好橡胶塞,置于恒温振荡器(ZWYR-2101,上海智城,中国)上振荡 1 h ,取出后稳定 15 min ,抽取上部空间气体于采样袋中.收集后的气体 24 h 内经气相色谱仪(7890D, Agilent, 美国)测定.计算公式如下.

缺氧段:

$$W = \frac{P \times V_{\text{air}} \times M \times (C_n - C_{n-1})}{R \times T \times \Delta t \times A_s} \quad (1)$$

好氧段:

$$W = \frac{P \times Q \times M \times C}{R \times T \times A_s} \quad (2)$$

累积释放量:

$$m = \sum_{n=2}^n \frac{W_{n-1} + W_n}{2} \times \Delta t \frac{\ddot{O}}{\ddot{O}} \quad (3)$$

溶解态浓度:

$$c_{\text{dis}} = \left(K_0 + \frac{\beta}{22.4} \right) \times P \times M \times C' / (R \times T) \quad (4)$$

式中, W : N_2O 释放速率, $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1}$; P : 大气压强, Pa; V_{air} : 反应器内上部空间体积, L; M : N_2O 摩尔质量, $44.02 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$; C_n : 第 n 次采样 N_2O 的体积分数; R : 气体常数, 为 $8308.65 \text{ L} \cdot \text{Pa} \cdot (\text{K} \cdot \text{mol})^{-1}$; T : 气体温度, K; Δt : 第 n 次和第 $n-1$ 次采样的时间间隔, min; A_s : 湿地床表面积, m^2 ; Q : 曝气流量, $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$; C : 气样中 N_2O 的体积分数; M : 周期内 N_2O 的释放量, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$; W_n : 第 n 次采样相应的释放速率, $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1}$; c_{dis} : 溶解态 N_2O 的浓度, $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; K_0 : N_2O 的 Ostwald 系数; β : 顶空瓶内空气体积与溶液体积的比值; C' : 平衡状态下气相中 N_2O 的体积分数。

1.4 数据统计与分析

全部样品水质和气体分析测试平行 3 次, 数据表达采用平均值 $\pm$ 标准差. 本实验数据通过 Origin 8.1 整理作图, 并由 SPSS 18.0 进行数据分析. 对象之间的差异性分析采用单因素方差分析 (one-way

ANOVA, 水平包括显著 $P < 0.05$ 和极显著 $P < 0.01$), 相关性分析采用 Pearson 检验 (水平包括显著 $P < 0.05$ 和极显著 $P < 0.01$).

2 结果与讨论

2.1 系统有机物污染去除效果及脱氮效果

系统稳定运行期间运行效果如图 2 所示. SW 系统曝气段平均 DO 浓度为 $2.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 较 CW 系统提高了 $0.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [图 2(a)], 生物炭的投加改善了系统 DO 条件. 由图 2(b) 可知, CW 和 SW 系统出水 COD 浓度在 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 去除率接近 95.0%, 生物炭的投加对系统 COD 去除效果无显著影响 ($P > 0.05$). 这是由于曝气潜流人工湿地系统 COD 去除能力强, 生物炭的投加对系统 COD 去除的促进作用并不明显.

SW 系统出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 稳定低于 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均去除率为 99.5%, 较 CW 提高了 5.1% [图 2(c)]. 另外, CW 和 SW 系统稳定运行期间, 出水中均无 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 检出, SW 系统 TN 平均去除率 (95.0%) 较 CW (88.1%) 降低了 6.9% [图 2(d)], 与 Gupta 等^[15] 结果相一致. 生物炭具有较大的孔隙率和比表面积, 其添加可促进系统内气水充分接触, 改善系统 DO 条件, 并强化生物膜的附着

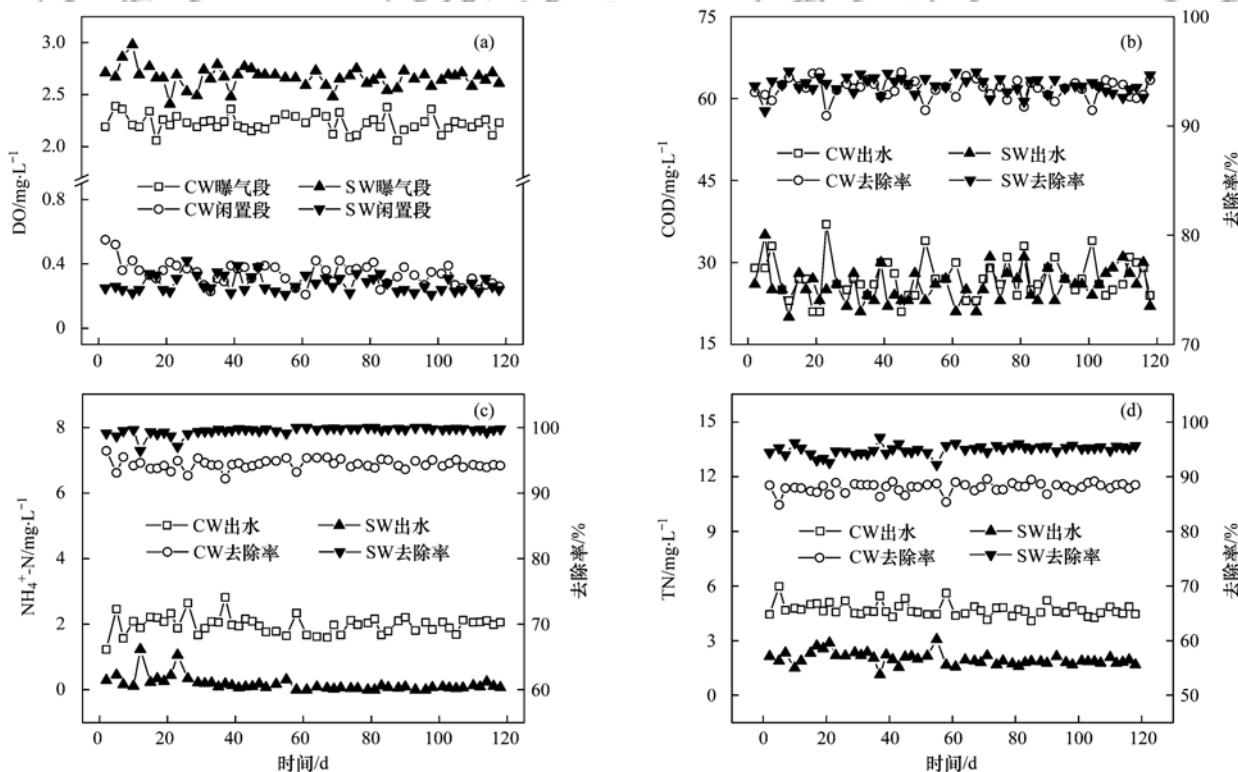


图 2 不同湿地系统 DO 条件及污染物去除效果

Fig. 2 DO levels and pollutant removal efficiencies in different CWs

能力及微生物的活性,促进硝化作用,从而提升系统脱氮性能^[16].

2.2 典型周期内有机物污染去除效果及脱氮效果

系统周期内水质跟踪测定结果如图3所示. CW和SW进水后半小时内系统DO迅速降至 $2.11\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.67\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,随后CW和SW系统曝气段DO稳定在 $2.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,闲置段DO水平约为 $0.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 闲置段初期,SW系统DO下降速度明显快于CW系统. 生物炭相对砾石来说,其发达的空隙结构和比表面积不仅改善了系统通气性,促进了气水的充分接触;其较强的生物膜附着能力及较大的微生物附着量,也有助于水中DO被微生物充分利用. 两系统典型周期内COD变化无显著差异($P>0.05$),好氧-厌氧的交替环境为微生物提供了良好的生活环境.

湿地系统脱氮主要依靠完整硝化反硝化作用,而系统内不同DO条件和充足碳源是保证硝化反硝化进行的关键^[17]. 由图3(c)可知,SW系统

NH_4^+-N 降解速率明显快于CW. SW系统在进水15 h后 NH_4^+-N 浓度已基本稳定在 $0.03\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,24 h后出水 NH_4^+-N 降解率达到99.9%;而CW系统在进水21 h后才趋于稳定,出水 NH_4^+-N 浓度 $1.72\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,降解率为95.0%. CW和SW系统运行初期,充足的DO和碳源为硝化反硝化反应提供了有利条件, NH_4^+-N 被快速转化,同时反硝化微生物进行厌氧/缺氧反硝化和好氧反硝化去除 NO_3^--N . CW系统周期运行过程中无 NO_2^--N 和 NO_3^--N 积累,SW只有少量 NO_3^--N 积累[图3(c)和3(d)]. CW和SW系统TN去除效果同 NH_4^+-N 类似,周期出水TN浓度分别为 $4.59\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.85\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,生物炭的投加强化了湿地系统脱氮效果. CW和SW系统脱氮主要通过曝气段同步的硝化反硝化过程,这与现有的相关研究^[18,19]吻合. 在间歇曝气潜流人工湿中同时存在好氧、缺氧和厌氧区^[20,21],而生物炭的投加不仅能够促进系统通气性能,生物炭层内部形成的不同DO梯度也能够改善系统好氧厌氧环境^[22],有利于系统脱氮.

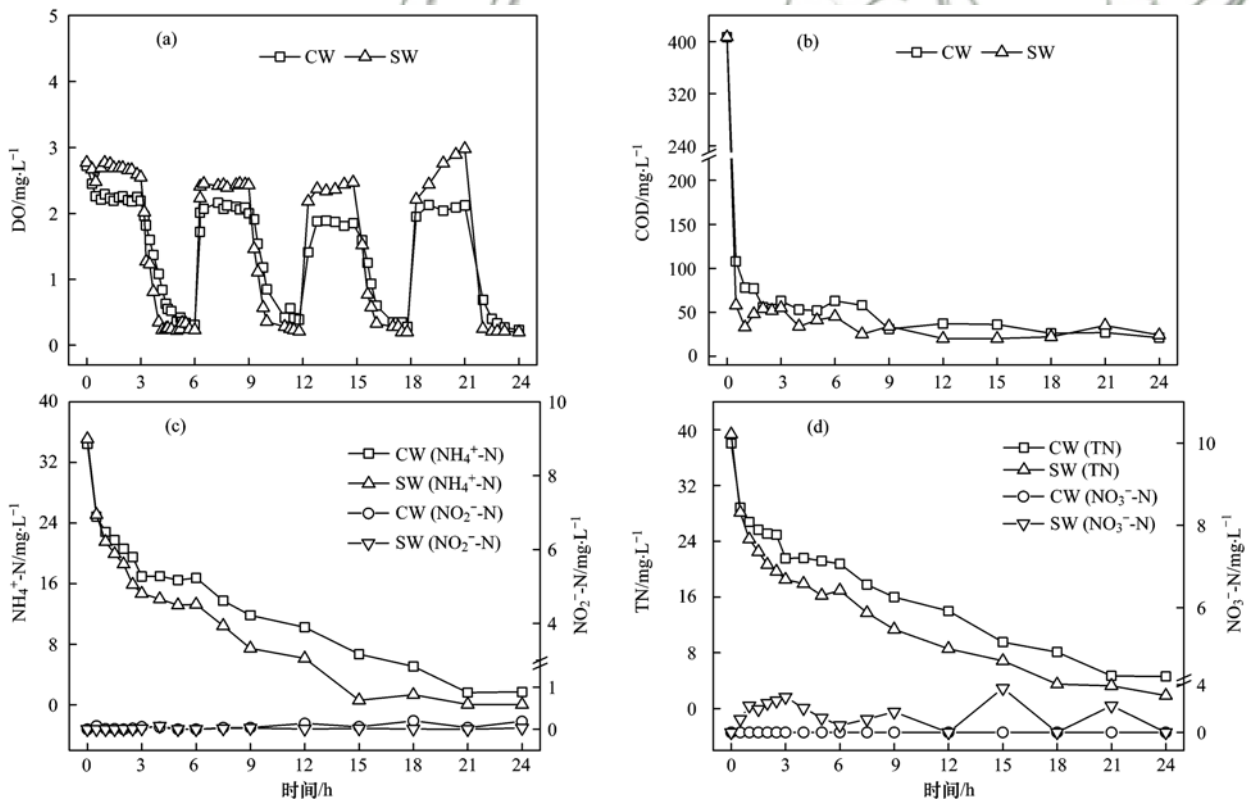


图3 不同湿地系统典型周期内DO、COD、 NH_4^+-N 及TN浓度变化
Fig. 3 DO, COD, NH_4^+-N and TN changed with the time in different CWs under a typical cycle

2.3 生物炭对系统 N_2O 排放的影响

由图4可知,CW和SW系统的 N_2O 释放主要集中在曝气段,且SW系统各阶段 N_2O 释放速率与

积累量均显著低于CW. 其中,CW和SW系统 N_2O 最高释放速率分别为 $53.92\text{ }\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{min})^{-1}$ 和 $17.62\text{ }\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{min})^{-1}$;相较于CW系统24 h的

N_2O 累积释放量 ($22.03 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$), SW 系统 ($6.58 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$) 减排达到 70.0%. CW 和 SW 系统 N_2O 平均释放速率分别为 $0.92 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $0.27 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$. Zhou 等^[23] 的研究发现, 在进水 COD 和 NH_4^+-N 浓度分别为 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下, 生物炭曝气湿地 N_2O 平均释放速率为 $0.27 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 与本实验的结果一致.

不完全的硝化反硝化是人工湿地系统中 N_2O 产生的主要途径^[24]. 在 CW 中, 局部低氧条件导致自养氨氧化细菌 (AOB) 好氧反硝化产生 N_2O , 而闲置段高 DO 浓度抑制了 Nos 的活性, 造成 N_2O 的释放^[25, 26]. 在 SW 中, N_2O 释放速率与系统内 $\text{NO}_3^- - \text{N}$

浓度呈显著正相关 ($R^2 = 0.754, P < 0.05$). 曝气段高 DO 浓度抑制了细菌 Nos 的活性, 导致 N_2O 的积累^[27]. 然而, 生物炭的投加增加了系统通气性, 改善了系统内部低氧区的 DO 条件, 减少了 AOB 好氧反硝化过程, 实现 N_2O 的减排. 在闲置段, 生物炭的投加使 DO 迅速降低 [图 3(a)], 利于厌氧反硝化过程的完全进行, 降低 N_2O 释放量. 有研究发现, 生物炭的添加还能增加 Nos 基因丰度, 促进 N_2O 还原为 N_2 ^[28]. 另外, 生物炭作为潜在的碳源, 也可以促进反硝化过程中 N_2O 还原为 N_2 , 减少 N_2O 的排放^[29].

CW 和 SW 各阶段末端溶解态 N_2O 浓度如图 5 所示. CW 和 SW 系统平均溶解态 N_2O 浓度分别为

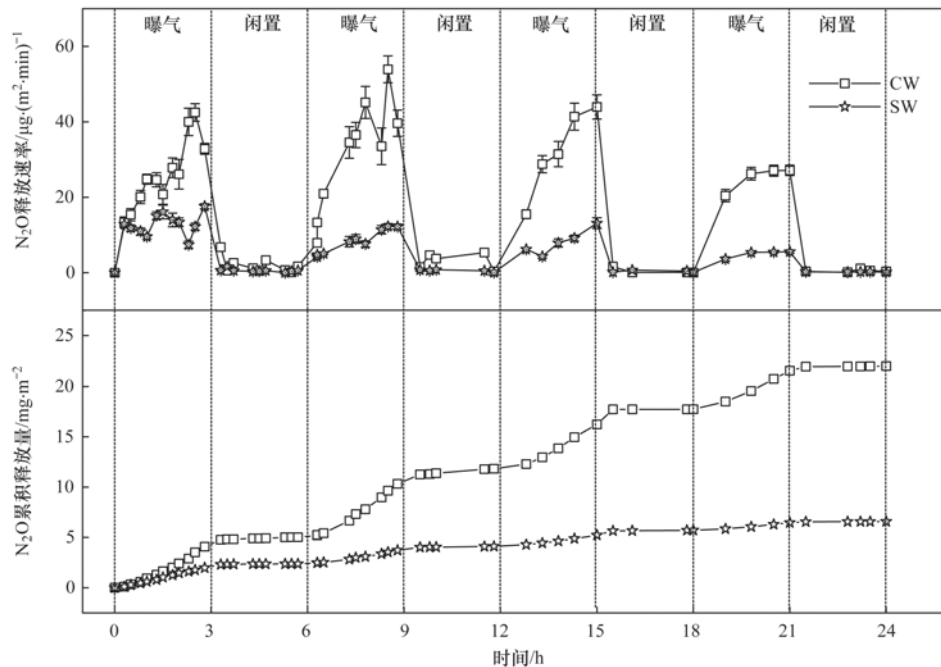
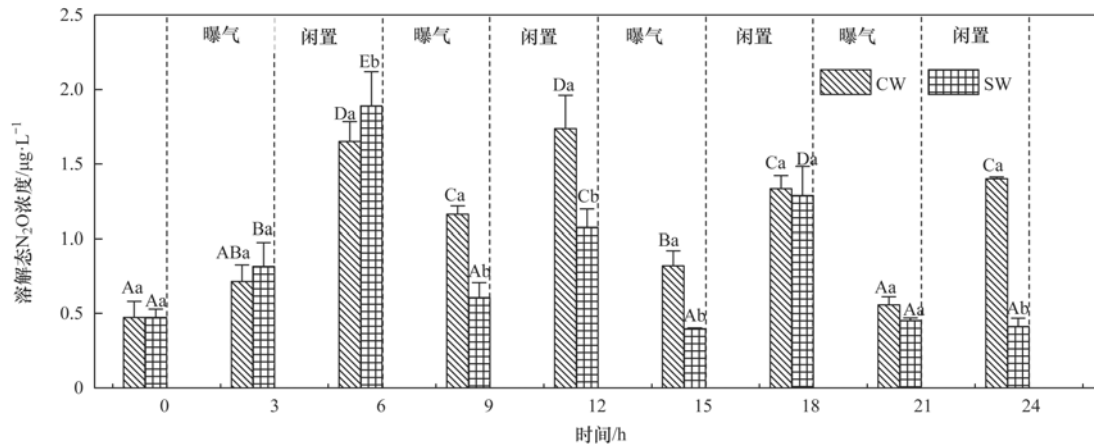


图 4 不同湿地系统典型周期内 N_2O 释放速率及累积释放量

Fig. 4 N_2O fluxes and cumulative emissions changed with the time in different CWs under a typical cycle



图中不同字母揭示不同处理的差异性 ($P < 0.05$), 其中大写字母揭示不同阶段之间差异, 小写字母揭示不同湿地之间差异

图 5 不同湿地各阶段末端溶解态 N_2O 浓度

Fig. 5 Concentration of dissolved N_2O at various stages in different CWs under a typical cycle

1.05 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和0.83 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 闲置段末端各系统溶解态 N_2O 浓度明显高于曝气段末端,这是由于闲置段溶解于水中的 N_2O 在曝气过程中被吹脱释放所致. 由于水中 N_2O 溶解度有限,反应初期各湿地 N_2O 释放速率均较大,CW和SW内部溶解态 N_2O 含量差异不显著($P>0.05$);随着反应进行,SW较低的 N_2O 释放速率使得其内部溶解态 N_2O 浓度低于CW. 系统 N_2O 排放主要集中在曝气段,而产生的 N_2O 溶解于水中又被吹脱出来,故系统中溶解态 N_2O 只占释放总量的极少部分.

3 结论

(1)生物炭湿地系统曝气段DO较对照组湿地提高了0.43 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,且生物炭湿地系统闲置段DO下降速度快于对照组湿地.

(2)各系统COD去除效果无明显差异,去除率接近95.0%. 生物炭的投加提高了系统5.1%的 NH_4^+-N 和6.9%的TN去除效果.

(3)生物炭湿地系统 N_2O 平均释放速率为0.27 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,24 h累积释放量为6.58 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$,较对照组湿地实现 N_2O 减排70.0%.

参考文献:

- [1] Chen G Q, Shao L, Chen Z M, *et al.* Low-carbon assessment for ecological wastewater treatment by a constructed wetland in Beijing[J]. *Ecological Engineering*, 2011, **37**(4): 622-628.
- [2] Wang W, Ding Y, Wang Y H, *et al.* Intensified nitrogen removal in immobilized nitrifier enhanced constructed wetlands with external carbon addition[J]. *Bioresource Technology*, 2016, **218**: 1261-1265.
- [3] Fan J L, Wang W G, Zhang B, *et al.* Nitrogen removal in intermittently aerated vertical flow constructed wetlands: impact of influent COD/N ratios[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **143**: 461-466.
- [4] Ding Y, Song X S, Wang Y H, *et al.* Effects of dissolved oxygen and influent COD/N ratios on nitrogen removal in horizontal subsurface flow constructed wetland[J]. *Ecological Engineering*, 2012, **46**: 107-111.
- [5] Hu Y S, Zhao Y Q, Zhao X H, *et al.* High rate nitrogen removal in an alum sludge-based intermittent aeration constructed wetland[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(8): 4583-4590.
- [6] Fan J L, Zhang B, Zhang J, *et al.* Intermittent aeration strategy to enhance organics and nitrogen removal in subsurface flow constructed wetlands[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **141**: 117-122.
- [7] Wu H M, Fan J L, Zhang J, *et al.* Intensified organics and nitrogen removal in the intermittent-aerated constructed wetland using a novel sludge-ceramsite as substrate[J]. *Bioresource Technology*, 2016, **210**: 101-107.
- [8] Bonin P, Tamburini C, Michotey V. Determination of the bacterial processes which are sources of nitrous oxide production in marine samples[J]. *Water Research*, 2002, **36**(3): 722-732.
- [9] Schulthess R V, Kühni M, Gujer W. Release of nitric and nitrous oxides from denitrifying activated sludge[J]. *Water Research*, 1995, **29**(1): 215-226.
- [10] Sun Y F, Qi S Y, Zheng F P, *et al.* Organics removal, nitrogen removal and N_2O emission in subsurface wastewater infiltration systems amended with/without biochar and sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2018, **249**: 57-61.
- [11] 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.
- [12] 侯洁. 生物炭对潜流人工湿地生物脱氮影响机理研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- [13] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater[M]. 21st ed. Washington, DC: APHA, AWWA, WEF, 2005.
- [14] 姜丽秀. 好氧亚硝化颗粒污泥工艺及其 N_2O 释放的研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [15] Gupta P, Ann T W, Lee S M. Use of biochar to enhance constructed wetland performance in wastewater reclamation[J]. *Environmental Engineering Research*, 2016, **21**(1): 36-44.
- [16] Brassard P, Godbout S, Raghavan V. Soil biochar amendment as a climate change mitigation tool: Key parameters and mechanisms involved[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, **181**: 484-497.
- [17] Pelissari C, Sezerino P H, Decezaro S T, *et al.* Nitrogen transformation in horizontal and vertical flow constructed wetlands applied for dairy cattle wastewater treatment in southern Brazil[J]. *Ecological Engineering*, 2014, **73**: 307-310.
- [18] Wu H M, Fan J L, Zhang J, *et al.* Optimization of organics and nitrogen removal in intermittently aerated vertical flow constructed wetlands: Effects of aeration time and aeration rate[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2016, **113**: 139-145.
- [19] Hu Z, Zhang J, Li S P, *et al.* Effect of aeration rate on the emission of N_2O in anoxic-aerobic sequencing batch reactors (A/O SBRs)[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2010, **109**(5): 487-491.
- [20] Dong H Y, Qiang Z M, Li T G, *et al.* Effect of artificial aeration on the performance of vertical-flow constructed wetland treating heavily polluted river water[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(4): 596-601.
- [21] Liu L, Zhao X H, Zhao N, *et al.* Effect of aeration modes and influent COD/N ratios on the nitrogen removal performance of vertical flow constructed wetland[J]. *Ecological Engineering*, 2013, **57**: 10-16.
- [22] 崔延瑞, 邱鑫, 张庆荣, 等. 生物活性炭对不同C/N比废水同步硝化反硝化脱氮效果的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4296-4301.
- [23] Cui Y R, Qiu X, Zhang Q R, *et al.* Influence of biological activated carbon on simultaneous nitrification and denitrification in inflow with different C/N Ratios. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4296-4301.
- [23] Zhou X, Jia L X, Liang C L, *et al.* Simultaneous enhancement

- of nitrogen removal and nitrous oxide reduction by a saturated biochar-based intermittent aeration vertical flow constructed wetland: Effects of influent strength[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, **334**: 1842-1850.
- [24] Kong H N, Kimochi Y, Mizuochi M, *et al.* Study of the characteristics of CH_4 and N_2O emission and methods of controlling their emission in the soil-trench wastewater treatment process[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, **290** (1-3): 59-67.
- [25] Mannina G, Ekama G A, Capodici M, *et al.* Influence of carbon to nitrogen ratio on nitrous oxide emission in an Integrated Fixed Film Activated Sludge Membrane BioReactor plant[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **176**: 1078-1090.
- [26] Todt D, Dörsch P. Mechanism leading to N_2O production in wastewater treating biofilm systems [J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/technology*, 2016, **15**(3): 355-378.
- [27] Kampschreur M J, Temmink H, Kleerebezem R, *et al.* Nitrous oxide emission during wastewater treatment[J]. *Water Research*, 2009, **43**(17): 4093-4103.
- [28] 陈晨, 许欣, 毕智超, 等. 生物炭和有机肥对菜地土壤 N_2O 排放及硝化、反硝化微生物功能基因丰度的影响[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(5): 1912-1920.
- Chen C, Xu X, Bi Z C, *et al.* Effects of biochar and organic manure on N_2O emissions and the functional gene abundance of nitrification and denitrification microbes under intensive vegetable production[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(5): 1912-1920.
- [29] Feng Z J, Zhu L Z. Impact of biochar on soil N_2O emissions under different biochar-carbon/fertilizer-nitrogen ratios at a constant moisture condition on a silt loam soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **584-585**: 776-782.



CONTENTS

Ratios of Volatile Organic Compounds in Ambient Air of Various Cities of China	WANG Ming, CHEN Wen-tai, LU Si-hua, <i>et al.</i> (4393)
Temporal Variation, Spatial Distribution, and Reactivity Characteristics of Air VOCs in Beijing 2015	ZHANG Bo-tao, AN Xin-xin, WANG Qin, <i>et al.</i> (4400)
Research and Application of the Technical Method for the Compilation of VOCs Emission Inventories from Architectural Coatings in Beijing	DENG Zi-yu, GAO Mei-ping, WANG Qing-wei, <i>et al.</i> (4408)
Content Levels and Compositions Characteristics of Volatile Organic Compounds(VOCs) Emission from Architectural Coatings Based on Actual Measurement	GAO Mei-ping, DENG Zi-yu, NIE Lei, <i>et al.</i> (4414)
Characteristics of Primary Pollutants of Air Quality in Cities Along the Taihang Mountains in Beijing-Tianjin-Hebei Region During 2014-2016	WANG Xiao-yan, WANG Shuai, ZHU Li-li, <i>et al.</i> (4422)
Seasonal Variation and Source Analysis for PM _{2.5} , PM ₁ and Their Carbonaceous Components in Beijing	FAN Xiao-chen, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4430)
Chemical Constitution and Carbon Isotopic Compositions of PM _{2.5} in the Northern Suburb of Nanjing in Spring	ZHOU Yi-ming, HAN Xun, WANG Jin-jin, <i>et al.</i> (4439)
Analysis of Non-polar Organic Compounds in PM _{2.5} by Rapid Thermo-desorption Method Coupled with GC/MS	MA Ying-ge, WU Xia, PENG Meng-meng, <i>et al.</i> (4446)
Association Between Fine Particulate Matter and Asthma Hospital Outpatient Visits in Hangzhou	WANG An-xu, CHEN Xi, SONG Cong-bo, <i>et al.</i> (4457)
Hybrid Electric Bus SCR System Operation and NO _x Emission Characteristics Based on Remote Communication Technology	YANG Qiang, HU Qing-yao, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (4463)
Selection of Priority Contaminants in a Watershed Using Risk Ranking Methodology	LI Qi-feng, LÜ Yong-long, WANG Pei, <i>et al.</i> (4472)
Characteristics and Sources of Atmospheric Inorganic Nitrogen Wet Deposition in Xueyu Cave Watershed, Outer Suburbs of Chongqing City	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (4479)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve	SONG Lei, TIAN Peng, ZHANG Jin-bo, <i>et al.</i> (4490)
Key Production Process of Nitrous Oxide and Nitrogen Sources in Tuojia River	ZHAO Qiang, LÜ Cheng-wen, QIN Xiao-bo, <i>et al.</i> (4497)
Impact of Biochar on Nitrogen Removal and Nitrous Oxide Emission in Aerated Vertical Flow Constructed Wetland	WANG Ning, HUANG Lei, LUO Xing, <i>et al.</i> (4505)
Physiological Responses of Ryegrass in Cadmium-Nonylphenol Co-contaminated Water and the Phytoremediation Effects	SHI Guang-yu, LI Zhong-yi, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (4512)
Analysis of Absorption Characteristics of Urban Black-odor Water	DING Xiao-lei, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (4519)
Seasonal Variations of DOM Spectral Characteristics in the Surface Water of the Upstream Minjiang River	FAN Shi-yu, QIN Ji-hong, LIU Yan-yang, <i>et al.</i> (4530)
Water Quality and Three-Dimensional Fluorescence of Stormwater Runoff from Lined Bioretention Field Cells	LIN Xiu-yong, WANG Shu-min, LI Qiang, <i>et al.</i> (4539)
Nitrate-Nitrogen Pollution Sources of an Underground River in Karst Agricultural Area Using ¹⁵ N and ¹⁸ O Isotope Technique	SHENG Ting, YANG Ping-heng, XIE Guo-wen, <i>et al.</i> (4547)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Landfill Groundwater	PENG Li, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4556)
Adsorption Behavior of Phosphate from Water on Zirconium-loaded Granular Zeolite-amended Sediment	LIANG Shu-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (4565)
Control of Coagulant Dosing for Humic Substances Based on Ultraviolet Spectrum Analysis	ZHANG Bei-chen, ZHANG Xiao-lei, QIN Lan-lan, <i>et al.</i> (4576)
Reduction of Wastewater Organic Micro-pollutants and Genotoxicity in a Hybrid Process Involving Anaerobic-anoxic-oxic and Ozonation Treatments	LI Mo, WANG Zhen-zhe, CHEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4584)
Distribution and Removal of Antibiotic Resistance Genes in Two Sequential Wastewater Treatment Plants	LI Ao-lin, CHEN Li-jun, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (4593)
Effect of Magnetic Chitosan Hydrogel Beads with Immobilized Feamox Bacteria on the Removal of Ammonium from Wastewater	LIU Zhi-wen, CHEN Chen, PENG Xiao-chun, <i>et al.</i> (4601)
Enhanced Nitrogen and Carbon Removal Performance of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) with Trehalose Addition Treating Saline Wastewater	YANG Zhen-lin, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (4612)
Characteristics of Denitrifying Phosphorus Removal by A ² /O-BAF at Low Temperatures	HUANG Jian-ming, ZHAO Zhi-chao, ZHENG Long-ju, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics of Advanced Treatment of Treated Petrochemical Water by O ₃ -BAC and Analysis of Consortium Structure	ZHANG Chao, SHAN Ming-hao, XU Dan-ning, <i>et al.</i> (4628)
Microbial Community Characteristics of Shortcut Nitrification Start-up in Different MBR-Inoculated Sludges	WU Peng, CHEN Ya, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (4636)
Effect of Microbial Community Structure and Metabolites on Sludge Settling Ability Under Three Different Switching Condition Processes	WEN Dan-dan, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4644)
Adsorption Mechanisms of Ciprofloxacin by Extracellular Polymeric Substances of Sulfate-reducing Bacteria Sludge	ZHANG Hui-qun, JIA Yan-yan, FANG He-ting, <i>et al.</i> (4653)
Rapid Improvement of Denitrification Performance of Embedded Activated Sludge and Community Analysis	YANG Hong, XU Fu, MENG Chen, <i>et al.</i> (4661)
Spatial-Temporal Trends and Pollution Source Analysis for Heavy Metal Contamination of Cultivated Soils in Five Major Grain Producing Regions of China	SHANG Er-ping, XU Er-qi, ZHANG Hong-qi, <i>et al.</i> (4670)
Spatial Interpolation Methods and Pollution Assessment of Heavy Metals of Soil in Typical Areas	MA Hong-hong, YU Tao, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i> (4684)
Effect of Straw Residues in Combination with Reduced Fertilization Rate on Greenhouse Gas Emissions from a Vegetable Field	HUANG Rong, GAO Ming, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (4694)
Emission of NH ₃ and N ₂ O from Spinach Field Treated with Different Fertilizers	SHAN Nan, HAN Sheng-hui, LIU Ji-pei, <i>et al.</i> (4705)
Effects of Various Combinations of Fertilizer, Soil Moisture, and Temperature on Nitrogen Mineralization and Soluble Organic Nitrogen in Agricultural Soil	TIAN Fei-fei, JI Hong-fei, WANG Le-yun, <i>et al.</i> (4717)
Long-term Fertilization Effects on the Abundance of Complete Ammonia Oxidizing Bacteria(<i>Comammox Nitrospira</i>) in a Neutral Paddy Soil	WANG Mei, WANG Zhi-hui, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4727)
Spatial Variation of Soil Organic Carbon and Stable Isotopes in Different Soil Types of a Typical Oasis	CHEN Xin, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i> (4735)
Effect and Mechanism of Attapulgite and Its Modified Materials on Bioavailability of Cadmium in Soil	CHEN Zhan-xiang, CHEN Chuan-sheng, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4744)
Persulfate Oxidation Effect of Soil Organic Pollutants by Natural Organic Matters	LIU Qiong-zhi, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4752)
Lead Uptake and Accumulation in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) with Water Management and Selenite Fertilization	WAN Ya-nan, LIU Zhe, Aboubacar Younoussa Camara, <i>et al.</i> (4759)
Key Bacteria for the Microbial Degradation of Pollutants in Cellar Water	YANG Hao, YANG Xiao-ni, ZHANG Guo-zhen, <i>et al.</i> (4766)
Oxidation of Humic Acid Complexing As(III) by As(III)-Oxidizing Bacteria	LI Ze-jiao, CUI Yan-shan, YIN Nai-yi, <i>et al.</i> (4778)
A Thermotolerant and Halotolerant Sulfate-reducing Bacterium in Produced Water from an Offshore High-temperature Oilfield in Bohai Bay, China: Isolation, Phenotypic Characterization, and Inhibition	YANG Chun-lu, YUAN Mei-yu, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> (4783)
Isolation and Nitrogen Removal Characteristics of Salt-tolerant Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacteria <i>Zobellella</i> sp. B307	BAI Jie, CHEN Lin, HUANG Xiao, <i>et al.</i> (4793)
Isolation, Identification and Degradation Characteristics of a 17 β -estradiol Degrading Strain <i>Fusarium</i> sp. KY123915	WU Man-li, ZHU Chang-cheng, QI Yan-yun, <i>et al.</i> (4802)
Effect of Fluoroquinolones on Performance and Microbial Community of a Vertical Flow Constructed Wetland	LI Xin-hui, ZHENG Quan, LI Jing, <i>et al.</i> (4809)
Microbial Community Diversity Analysis During Lincomycin Mycelia Dreg with Manure	REN Sheng-tao, GUO Xia-li, LU A-qian, <i>et al.</i> (4817)
Oxidative Stress and DNA Damage Induced by DEP Exposure in Earthworms	PING Ling-wen, LI Xian-xu, ZHANG Cui, <i>et al.</i> (4825)
Mineralogy Characteristics and Heavy Metal Distribution of MSWI Fly Ash	LI Jian-tao, ZENG Ming (4834)