

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力

李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年12月

第42卷 第12期

Vol.42 No.12

目次(卷终)

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力 李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培(5563)

汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策 王海林, 杨涛, 聂磊, 方莉, 张中申, 郝郑平(5574)

西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单 高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 林宇, 杨益(5585)

新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析 陈军辉, 冯小球, 李媛, 王书肖(5594)

基于 iLME + Geoi-RF 模型的四川省 PM_{2.5} 浓度估算 吴宇宏, 杜宁, 王莉, 蔡宏, 周彬, 吴磊, 敖迪(5602)

《大气污染防治行动计划》后期成都大气 PM_{2.5} 中水溶性无机离子特征 李佳琪, 张军科, 董贵明, 邓嘉琳, 刘子锐, 王跃思(5616)

洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析 孙佳侯, 董喆, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹(5624)

北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素 曹阳, 安欣欣, 刘保献, 景宽, 王琴, 罗霄旭(5633)

天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析 王艺璇, 刘保双, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂(5644)

沈阳市挥发性有机物污染特征及反应活性 杜寒冰, 王男, 任万辉, 苏枞枞, 胡建林, 于兴娜(5656)

典型化工集中区环境空气 SVOCs 污染特征及来源解析 葛祥, 吴健, 高松, 冯加良, 陈俊伟, 张舒惟, 焦正(5663)

南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估 张子金, 林煜棋, 张煜烟, 曹梦瑶, 章炎麟(5673)

基于排放清单和实地测试的工业 VOCs 排放特征:以郑州市高新区为例 任何, 卢轩, 刘洋, 尹沙沙, 胡鹤霄(5687)

我国水性建筑涂料 VOCs 排放特征及其环境影响 高美平, 王海林, 刘文文, 聂磊, 李国昊, 安小拴(5698)

VOCs 源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析 王峰, 汪健伟, 杨宁, 翟菁, 侯灿(5713)

山东省 O₃ 时空分布及影响因素分析 张森, 丁椿, 李彦, 王桂霞, 林晶晶, 孟赫, 许杨(5723)

2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性 钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王成辉, 李英杰, 王波, 刘政(5736)

基于高分辨率在线测量的轻型汽油车含氧挥发性有机物排放模型构建 郝钰琦, 袁自冰, 王梦雷, 沙青娥, 杜新悦, 刘元向, 刘学辉, 段乐君, 袁斌, 郑君瑜, 邵敏, 闫宇(5747)

三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析 张凯, 吴凤平, 成长春(5757)

长江流域总氮排放量预测 丁肇慰, 郑华(5768)

1980~2015 年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征 姚梦雅, 胡敏娟, 陈丁江(5777)

黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布 韩语, 潘保柱, 陈越, 刘亚平, 侯易明(5786)

基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源 邢子康, 余钟波, 衣鹏, 钱睿智, 王嘉毅(5796)

水源水库真核微生物种群结构季相演替特征 张海涵, 黄鑫, 黄廷林, 刘凯文, 马曼丽, 刘祥, 苗雨甜, 宗容容(5804)

达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异 李文宝, 郭鑫, 张博亮, 杜蕾, 田雅楠(5814)

尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制 王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞(5826)

武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估 张坤锋, 付青, 涂响, 昌盛, 樊月婷, 孙兴滨, 王山军(5836)

上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系 徐慕, 李世豪, 马巾, 王丽卿, 张玮(5848)

曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素 李琳琳, 李荣涛, 孔维静, 杨苹果, 杜志超, 毕斌, 卢少勇(5857)

水平潜流人工湿地对畜禽养殖废水中特征污染物的去除 赵伟, 范增增, 杨新萍(5865)

木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水滞留改良影响 孟依柯, 王媛, 汪传跃, 王报(5876)

黑臭河道中聚乙烯醇/海藻酸钠固定微米沸石粉去除氨氮 魏超, 陈涛, 江桥, 王姝, 邱伟建, 成小英(5884)

玉米秸秆生物炭对灰钙土吸附金霉素的影响 南志江, 蒋煜峰, 毛欢欢, 梁新茹, 邓雪儒(5896)

饮用水砂滤池中微生物对微量污染物的降解潜力与途径 周洁, 王东麟, 林慧, 柏耀辉(5905)

污水分析方法监测城市毒品滥用长期趋势 曹禹, 董小棠, 邵雪婷, 刘琳, 王德高(5912)

阿奇霉素和铜对活性污泥古菌群落和 ARGs 的胁迫影响及后效应 高玉玺, 李星, 赵君如, 张忠兴, 樊晓燕(5921)

典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析 李强, 曹莹, 何连生, 王耀锋, 龚成, 何书涵(5930)

我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价 王耀锋, 何连生, 姜登岭, 曹莹, 李强, 官健(5938)

浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险 王敏, 董佳琦, 白龙龙, 张勇, 蒋仲龙, 姜霓雯, 吴家森, 张璐瑶, 方嘉, 傅伟军(5949)

北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探 管伟豆, 郭堤, 王萍, 张增强, 李荣华(5958)

典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价 强瑛, 李英菊, 罗谦, 陈美凤, 李海燕, 黄先飞, 秦樊鑫(5967)

雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应 周亚龙, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟, 杨志斌(5977)

铜仁土壤-水稻重金属累积效应与安全种植区划 朱亮亮, 吴勇, 周浪, 唐乐斌, 宋波(5988)

干湿交替对铈锰改性生物炭固定红壤 As 的影响 黄晓雅, 李莲芳, 朱昌雄, 黄金丽, 吴翠霞, 叶婧(5997)

铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除 王冰清, 阳琴, 李虹颖, 熊启中, 徐刚, 孙瑞波, 田达, 李军利, 郜红建, 叶新新(6006)

稻田灌溉河流 CH₄ 和 N₂O 排放特征及影响因素 吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 方贤滔, 张天睿, 胡靖, 刘树伟, 邹建文(6014)

节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 王永明, 徐永记, 纪洋, 冯彦房(6025)

有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N₂O 的排放特征及微生物特性 王楷, 史雷, 马龙, 王书婷, 张然, 郑伟, 李紫燕, 翟丙年(6038)

不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响 孔培君, 郑洁, 栾璐, 陈紫云, 薛敬荣, 孙波, 蒋瑞霖(6047)

氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响 杨建强, 刁华杰, 胡姝姝, 陈晓鹏, 王常慧(6058)

化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响 向书江, 余砾, 熊子怡, 罗东海, 王莹燕, 邓正昕, 王子芳, 高明(6067)

浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油菜产量 王正, 孙兆军, Sameh El-Sawy, 王珍, 何俊, 韩磊, 邹本涛(6078)

《环境科学》第42卷(2021年)总目录 (6091)

《环境科学》征订启事(5593) 《环境科学》征稿简则(5623) 信息(5643, 5835, 5883)

曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素

李琳琳^{1,2}, 李荣涛^{1,3}, 孔维静¹, 杨萍果^{3*}, 杜志超^{1,4}, 毕斌¹, 卢少勇^{1*}

(1. 中国环境科学研究院国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 国家环境保护洞庭湖科学观测研究站, 北京 100012; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 3. 山西师范大学生命科学学院, 临汾 041000; 4. 辽宁工程技术大学土木工程学院, 阜新 123000)

摘要: 低污染水由于排放量大、来源范围广, 成为地表水体中氮的重要贡献者。为探究人工湿地对低污染水脱氮时的影响因素, 构建曝气人工湿地, 分析其在不同运行工况下对低污染水中不同形态氮的去除效果。结果表明, 低污染水中 TN 和 NO_3^- -N 去除率与水力停留时间 (HRT)、碳氮比 (C/N) 和温度显著正相关 ($r > 0.65$, $P < 0.01$), 与溶解氧 (DO) 极显著负相关 ($r < -0.85$, $P < 0.01$); NH_4^+ -N 去除率与各因素之间相关性不显著 ($P > 0.05$)。曝气量和 HRT 的改变, 可以调节湿地内 DO 环境, 为湿地内营造交替好-缺氧环境, 利于硝化与反硝化过程。在曝气量为 $0.2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 、HRT 为 1 d 时, 曝气人工湿地对低污染水中 TN、 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 去除率分别可达 90.15%、98.25% 和 86.22%, 实现了 TN、 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 同步高效去除。C/N 和温度是影响 TN 和 NO_3^- -N 去除效果的重要因子。随 C/N 增加, TN 和 NO_3^- -N 去除率明显提升; 在进水 C/N 为 5 时, TN 和 NO_3^- -N 去除率达到最高, 分别为 68.49% 和 50.48%, 其中 TN 去除率较无碳源时提高了 37.43%。此外, 温度从 8~12℃ 升高至 28~32℃ 时, 曝气 CW 脱氮速率逐步增大。相较于低温 (8~12℃), 在高温 (28~32℃) 时 CW 对 TN 和 NO_3^- -N 去除率分别提高了 29.37% 和 50.24%; 而 NH_4^+ -N 去除率受 C/N 和温度影响不大。

关键词: 曝气人工湿地; 低污染水; 脱氮; 曝气量; 碳氮比

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)12-5857-08 DOI: 10.13227/j.hjks.202101294

Influencing Factors of Nitrogen Removal from Low-Pollution Water by Aerated Constructed Wetland

LI Lin-lin^{1,2}, LI Rong-tao^{1,3}, KONG Wei-jing¹, YANG Ping-guo^{3*}, DU Zhi-chao^{1,4}, BI Bin¹, LU Shao-yong^{1*}

(1. State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, State Environmental Protection Scientific Observation and Research Station for Lake Dongting, Beijing 100012, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. College of Life Sciences, Shanxi Normal University, Linfen 041000, China; 4. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Low-pollution water has become an important contributor of nitrogen in surface water due to its large discharge volume and wide range of sources. To investigate the influencing factors of nitrogen removal from low-pollution water by constructed wetlands (CW), aerated CW was constructed, and the removal effects of different forms of nitrogen in low-pollution water under different operating conditions were analyzed. The results showed that the removals of TN and NO_3^- -N were positively correlated with hydraulic retention time (HRT), C/N ratio, and temperature ($r > 0.65$, $P < 0.01$) and negatively correlated with DO concentration ($r < -0.85$, $P < 0.01$). However, there was no significant correlation between the removal of NH_4^+ -N and these factors ($P > 0.05$). The change in aeration rate and HRT adjusted the DO concentration in the wetland, so as to create alternate aerobic and anoxic environments, which was conducive to the nitrification and denitrification process. When the aeration rate was $0.2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ and HRT was 1 d, the removal rates of TN, NH_4^+ -N, and NO_3^- -N from the low-pollution water by the aerated CW were 90.15%, 98.25%, and 86.22% respectively, which realized the simultaneous and efficient removal of TN, NH_4^+ -N, and NO_3^- -N. C/N ratio and temperature played important roles in the removal of TN and NO_3^- -N. The TN and NO_3^- -N removal efficiency increased with increasing C/N ratio. When the influent C/N was 5, the removal rates of TN and NO_3^- -N reached their peak, 68.49% and 50.48% respectively, and the TN removal rate was 37.43% higher than that with no influent carbon source (C/N = 0). In addition, when the temperature increased from 8-12℃ to 28-32℃, the nitrogen removal rate of the aerated CW increased gradually. Compared with those at low temperatures (8-12℃), the removal rates of TN and NO_3^- -N increased by 29.37% and 50.24%, respectively, at high temperatures (28-32℃), whereas the removal rate of NH_4^+ -N was not affected by C/N ratio and temperature.

Key words: aerated constructed wetland; low pollution water; denitrification; aeration rate; C/N ratio

目前常认为低污染水是指主要污染物浓度超过地表水环境质量标准 (GB 3838-2002) IV 类水质标准限值, 但不高于城镇污水处理厂污染物排放标准 (GB 18918-2002) 中二级标准限值的微污染河水、达标排放的污水厂出水及类似性质的水体^[1]。主要包括污染源工程治理后但对湖泊水体来讲仍为污染源的尾水、地表径流以及污染物浓度较低的农田排水、雨季村落地表径流等^[2,3]。虽然低污染水中氮浓度较低, 但其来

源范围广且排放总量大, 一旦直排进入受纳水体, 将直接影响地表水环境质量提升, 甚至导致水体富营养

收稿日期: 2021-01-31; 修订日期: 2021-05-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41877409); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2013ZX07101-014-04); 国家重点研发计划项目 (2018YFE0112300); 湖南省环境保护科研课题项目

作者简介: 李琳琳 (1990~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为湿地生态学, E-mail: stullinlin@163.com

* 通信作者, E-mail: lfyg@126.com; lushy2000@163.com

化或者藻华暴发,亟需重视与治理^[4,5].

人工湿地(CW)是20世纪70年代发展起来的新型污水处理和水环境修复技术^[6].它具有建设和运行成本低、耐冲击负荷、营养物去除能力强、出水水质稳定和适于处理间歇排放水的优点,在低污染水脱氮领域受到广泛关注^[7].CW脱氮过程复杂,包括硝化与反硝化、植物吸收、微生物新陈代谢、基质吸附、沉淀和挥发等,其中硝化与反硝化对氮去除至关重要^[8~10].微生物硝化常在好氧环境进行,异养反硝化在厌氧环境进行,间歇曝气产生的交替有氧和缺氧可同时促进硝化和反硝化过程.因此,如果实现了硝化与反硝化间的协调与平衡,则曝气可同时提高 NH_4^+-N 和TN去除率,但一旦破坏平衡,氮去除率受干扰.曝气CW对低污染水脱氮受许多环境因素影响,包括水力停留时间(HRT)、温度、pH、碳源和溶解氧(DO)等^[11~15].温度对CW脱氮过程发挥重要作用,直接影响湿地系统中微生物活性.有文献报道,当温度范围在28~36℃时,CW进行硝化作用,温度低于6℃或高于40℃时,硝化作用几乎完全受抑制.同样,在低温下反硝化速率减缓^[1].刘哲^[16]的研究表明,亚硝化细菌适宜偏碱性环境,其在pH值为8.0~8.4条件下表现出较高的活性,硝化细菌和反硝化细菌则较适宜中性环境,两者分别在pH值为6.7~7.5和7.0~7.5时反应较为活跃,且在过酸性环境(pH<6.0)和过碱性环境(pH>8.0)条件下,硝化-反硝化将受到抑制,甚至停止.由于低污染水碳氮比(C/N)较低,不能为污水中的微生物提供足够碳源,作为CW微生物代谢的能量来源,碳源的缺乏会极大限制微生物的生长繁殖,从而降低反硝化速率,影响 NO_3^--N 去除^[17,18].DO是影响曝气CW脱氮的重要因素之一,高DO会抑制反硝化,DO浓度低于 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,不会发生氨氧化^[19~21].分析这些环境因素与污染物去除率之间的关系并提出优化措施对提高曝气CW的脱氮效率至关重要.

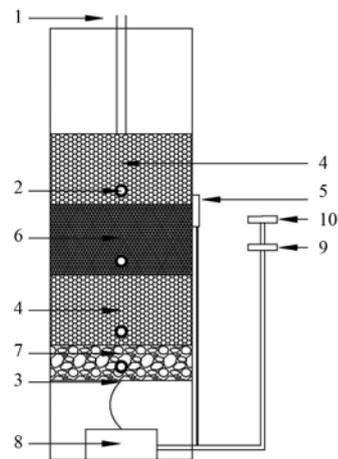
本研究通过构建曝气CWs系统,探究其在对低污染水脱氮过程中的重要影响因素.通过改变曝气量和HRT等运行参数,寻求曝气CW的最佳运行工

况.在此工况下,探讨温度和C/N等影响因素对不同形态氮去除效果的影响,以期为建设 and 运行更高效的曝气型CW低污染水处理系统提供理论依据和科学指导.

1 材料与方法

1.1 实验装置

本实验场地设在国家环境保护洞庭湖科学观测研究站(位于湖南省岳阳市东洞庭湖与采桑湖之间).曝气CW模拟系统为有机玻璃制作的湿地系统,长×宽×高($L\times W\times H$)= $40\text{ cm}\times 40\text{ cm}\times 100\text{ cm}$,系统填料分为两层,下层为高度10 cm,直径10~20 mm的沸石,作为承托层.上层为60 cm厚的处理层,从下到上依次填充直径4~8 mm的沸石20 cm,芦苇生物炭20 cm,直径4~8 mm的沸石20 cm.承托层底部安装曝气头,连接空气压缩泵与转子流量计,便于调整曝气量(图1).



1. 进水口, 2. 取样口, 3. 曝气头, 4. 小颗粒沸石, 5. 流量计, 6. 生物炭, 7. 大颗粒沸石, 8. 空气压缩泵, 9. 时控器, 10. 电源

图1 曝气人工湿地系统装置示意

Fig. 1 Installation diagram of aeration constructed wetland system

1.2 实验进水水质

实验进水为人工模拟低污染水,其浓度介于地表水环境质量标准(GB 3838-2002)V类水与城镇污水处理厂污染物排放标准(GB 18918-2002)一级(B)标准之间.将蔗糖、氯化铵、硝酸钾和磷酸二氢钾溶解在自来水中配置而成,水质情况见表1.

表1 人工湿地进水水质¹⁾

Table 1 Quality of inflow water in wetlands

水质指标	$\rho(\text{COD})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho(\text{NO}_3^--\text{N})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho(\text{TN})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	pH
进水浓度	0*~60.57	5.08~10.46	3.61~6.74	8.86~15.57	7~8
平均值	36.45	6.89	4.77	11.70	—

1) *表示没有添加碳源的情况下,进水 ρ (有机物)为 $0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$

1.3 实验设计

CW运行条件见表2.湿地类型为VFCWs,运行

方式为连续进水,曝气方式为间歇曝气,每天曝气1 h(11:30~12:30).每套系统内部基质相同,且在

底部安装曝气装置,不设置回流.根据曝气量与 HRT 不同,设置 A 组实验,通过改变进水 C/N 与温度,设置 B 组与 C 组实验,以考察不同因子变化对处理效果的影响.

1.4 实验方法

装置从 2019 年 8 月开始运行调试,启动和稳定运行 3 个月后开始取样监测.前期 1 d 一测,后期 3 d 一测.早上 08:00 取湿地进出水水样.将取样阀门打开 1 min 待出水稳定后,取 500 mL 水样带回实验室测定水质参数(表 3).实验数据均通过 Spss 23.0 分析和 Origin 2018 整理作图.

表 3 实验检测方法及使用仪器

Table 3 Experimental detection methods and instruments used

检测项目	检测方法	检测仪器
COD	高锰酸钾法	美国 HACH DR 2008 TM
TN	碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定	高压蒸汽灭菌锅和紫外分光光度计,紫外分光光度计
NH ₄ ⁺ -N	纳氏试剂分光光度法	紫外分光光度计
NO ₃ ⁻ -N	氨基磺酸紫外分光光度法	紫外分光光度计
DO	—	美国 HACH 多参数水质分析仪
pH	—	美国 HACH 多参数水质分析仪
ORP	—	美国 HACH 多参数水质分析仪

2 结果与讨论

2.1 曝气 CW 脱氮效果影响因素分析

曝气 CW 中不同影响因素与污染物去除率之间的皮尔逊相关系数如表 4 所示.结果表明,TN 和 NO₃⁻-N 去除率与 HRT、C/N 和温度显著正相关($r > 0.65, P < 0.01$),与 DO 显著负相关($r < -0.85, P < 0.01$); NH₄⁺-N 去除率与各个影响因素之间无相关关系($P > 0.05$).有机物去除率与 C/N 有较强的相关性($r = 0.713, P < 0.01$),与 pH($r = 0.444, P < 0.05$)和 ORP($r = 0.353, P < 0.05$)存在弱相关性.综上,曝气 CW 对低污染水进行脱氮处理时,优化 DO 供给、HRT、C/N 和温度极为重要.

表 4 影响曝气 CW 脱氮效果的因素和污染物去除率之间的 Pearson 相关系数¹⁾

Table 4 Pearson's correlation coefficient of factors affecting the denitrification of aerated CW and the removal rate of pollutants				
项目	氨氮去除率	总氮去除率	硝氮去除率	有机物去除率
pH	0.093	0.246	0.229	0.444 *
ORP	-0.112	0.362 *	0.400 *	0.353 *
DO	0.047	-0.850 **	-0.855 **	0.023
HRT	0.033	0.898 **	0.652 **	0.047
C/N	-0.147	0.971 **	0.959 **	0.713 **
温度	-0.022	0.990 **	0.747 **	-0.305

1) ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$; 因曝气 CW 中曝气量大小决定 DO 浓度,所以此处 DO 指代前后文中的曝气量

表 2 湿地系统运行条件¹⁾

Table 2 Operating conditions of wetland system

组别	系统	曝气量 /L·min ⁻¹	HRT/d	C/N	温度/°C
A	A1	0.2	1、2、3	5	—
	A2	0.3	1、2、3	5	—
	A3	0.4	1、2、3	5	—
	A4	0.6	1、2、3	5	—
	A5	0.8	1、2、3	5	—
B	B1	0.2	1	0	—
	B2	0.2	1	1	—
	B3	0.2	1	2.5	—
	B4	0.2	1	5	—
C	C1	0.2	1	5	8~12
	C2	0.2	1	5	28~32

1) 基质:沸石和芦苇生物炭;“—”表示在同一温度条件下

2.2 HRT 和曝气量对低污染水中不同形态氮去除效果的影响

2.2.1 曝气前后,VFCWs 中 DO 浓度变化

曝气量是改变湿地 DO 浓度的最直接因素.曝气量过小达不到氨氧化和有机物分解所需 DO,过大则会破坏湿地反硝化菌的生存环境,导致出水 NO₃⁻-N 浓度过高,因此合适的曝气量对湿地氮净化效果至关重要.本研究中,湿地系统设置了不同的曝气量,探究间歇曝气时,不同曝气量对湿地内部 DO 浓度变化影响.

图 2 显示间歇曝气 1 h(11:30~12:30)前后湿

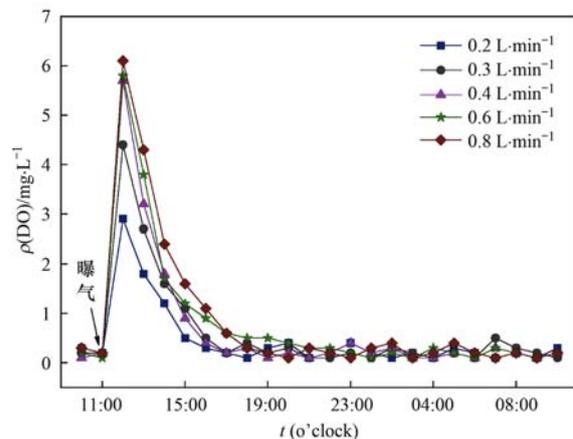


图 2 间歇曝气湿地不同曝气量时 DO 浓度随时间变化

Fig. 2 DO concentration changes with time under different aeration rates in intermittent CW

地系统内部 DO 浓度变化. 曝气前, 湿地 $\rho(\text{DO})$ 均低于 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 处于厌氧状态. 曝气后, $\rho(\text{DO})$ 迅速升高至 $2.9 \sim 6.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 停止曝气后, 湿地内 $\rho(\text{DO})$ 开始缓慢下降, 在 $3 \sim 5 \text{ h}$ 后降至 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 在湿地内部营造了交替好-缺氧环境, 有利于硝化与反硝化反应的进行^[22].

2.2.2 HRT 和曝气量对 VFCWs 中 NH_4^+ -N 的去除效果影响

不同 HRT 和曝气量对氨氮的去除效果如图 3(a) 和 3(b). 在 HRT 为 1、2 和 3 d, 曝气量分别为 0.2 、 0.3 、 0.4 、 0.6 和 $0.8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 出水

$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 均低于 $0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率均达 98% 以上. NH_4^+-N 去除率随 HRT 延长和曝气量增加变化不显著. 这是因为低污染水中本身 NH_4^+-N 浓度较低, 当曝气量为 $0.2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 湿地内 $\rho(\text{DO})$ 水平已达 $2.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 2), 此时湿地内 DO 量足以去除大部分 NH_4^+-N . 因此, 当处理 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 较低的低污染水时, 在曝气量满足 NH_4^+-N 氧化所需后, 继续增大曝气量并不会对 NH_4^+-N 去除率产生显著影响. 而继续增大曝气量或延长 HRT, 反而会增加动力费或者减少处理量.

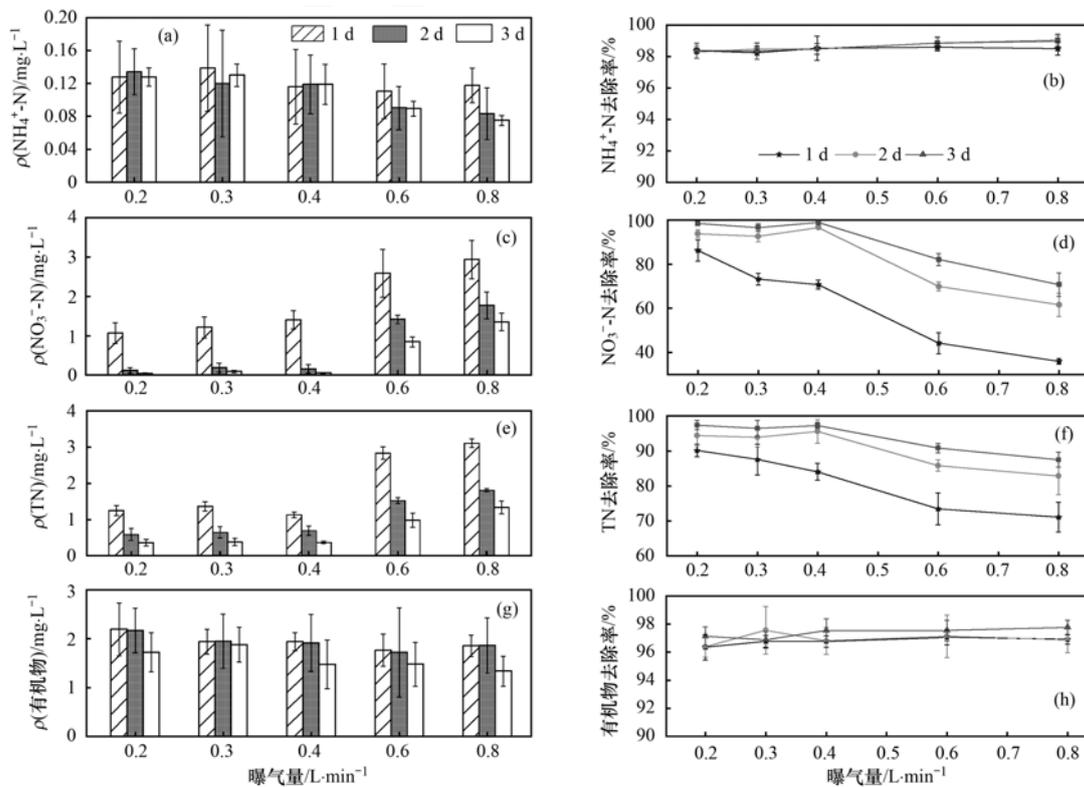


图 3 HRT 和曝气量对低污染水中 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、TN 和有机物去除效果的影响

Fig. 3 Effect of hydraulic retention time and aeration rate on the removal of NH_4^+ -N, NO_3^- -N, TN, and organic matter in low-pollution water

2.2.3 HRT 和曝气量对 VFCWs 中 NO_3^- -N 的去除效果影响

HRT 和曝气量对 NO_3^- -N 的去除效果如图 3(c) 和图 3(d). 在 HRT 为 1 d 时, 曝气量为 0.2 、 0.3 、 0.4 、 0.6 和 $0.8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, NO_3^- -N 去除率分别为 86.22%、73.22%、70.69%、44.21% 和 36.00%; HRT 为 2 d, 曝气量为 0.2 、 0.3 、 0.4 、 0.6 和 $0.8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, NO_3^- -N 去除率分别为 93.74%、92.60%、96.57%、69.92% 和 61.61%; HRT 为 3 d, 曝气量为 0.2 、 0.3 、 0.4 、 0.6 和 $0.8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, NO_3^- -N 去除率分别为 98.38%、96.57%、98.93%、82.07% 和 70.71%. 随 HRT 延长, 不同曝气量对 NO_3^- -N 的去除

率均有所提升. HRT 为 1 d、曝气量为 $0.2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, NO_3^- -N 去除率最高为 86.22%, 此时随曝气量增大, 出水 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 升高, 去除率随之降低, 当曝气量从 $0.4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 升到 $0.6 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 出水 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 从 $1.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增至 $2.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 增了 85.7%. 因在低曝气条件下, 湿地进水后有机物浓度较高, 适于反硝化菌生存繁殖, 故氨氮硝化产生的 NO_3^- -N 大部分可经反硝化去除; 随曝气量增加, 有机物在曝气阶段迅速降解, 减少了反硝化所需碳源, 而湿地内 DO 富余, 又破坏了反硝化菌生存环境, 反硝化减弱, 导致出水 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 升高. HRT 为 2 d、曝

气量为 $0.2 \sim 0.4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, NO_3^- -N 去除率均达 90% 以上; HRT 为 3 d, 曝气量为 $0.2 \sim 0.4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, NO_3^- -N 去除率均达 96% 以上. 随 HRT 延长, 在一定浓度范围内即使增大曝气量, NO_3^- -N 去除率也会提升, 可见, HRT 延长也会对反硝化作用起到一定促进效果.

2.2.4 HRT 和曝气量对 VFCWs 中 TN 的去除效果影响

HRT 和曝气量对 TN 的去除效果如图 3(e) 和图 3(f). 在 HRT 相同条件下, TN 去除率随曝气量增加而降低, 不同 HRT, 其最优曝气量不同, 且与 NO_3^- -N 呈相同变化规律. 在 HRT 为 1 d, 曝气量从 $0.2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 上升至 $0.8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, TN 去除率从 90.15% 下降至 71.08%, 去除率降低了 20%. 随曝气量增大, 湿地内部 $\rho(\text{DO})$ 升高, 部分厌氧环境逐渐向好氧环境转变, 充足的 DO 使硝化完全, 出水氨氮浓度很低; 但充分好氧不利于反硝化^[9], 造成 NO_3^- -N 积累, 最终导致 TN 去除率下降^[22]. 这说明 TN 去除受硝化与反硝化共同作用影响, 任一过程受限, TN 去除都将受到显著影响. 另外, 在 HRT 为 1 d, 曝气量为 $0.2 \sim 0.4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, TN 去除率均达 70% 以上; HRT 为 2 d, 曝气量为 $0.2 \sim 0.4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, TN 去除率均达 90% 以上; HRT 为 3 d 时, 曝气量为 $0.2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1} \sim 0.4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, TN 去除率均达 95% 以上. 随 HRT 延长, TN 去除率提升. 这与 Butterworth 等^[21] 的研究结果一致, 随着水力停留时间延长, 污水中的氮与湿地内的微生物及基质发生充分接触, 脱氮效率随之上升.

2.2.5 HRT 和曝气量对 VFCWs 中有机物的去除效果影响

HRT 和曝气量对有机物的去除效果如图 3(g) 和图 3(h). 在 HRT 为 1、2 和 3 d, 曝气量分别为 0.2 、 0.3 、 0.4 、 0.6 和 $0.8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 出水 $\rho(\text{有机物})$ 均低于 $2.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率均达 96% 以上. 有机物的去除率随 HRT 延长和曝气量增加不显著.

综上, 随 HRT 延长和曝气量增加, 湿地对 TN 和 NO_3^- -N 的去除呈相同趋势, 即在曝气量相同条件下, TN 和 NO_3^- -N 去除率随 HRT 延长而升高. 在 HRT 相同条件下, TN 和 NO_3^- -N 去除率随曝气量增加而降低. 低浓度的 NH_4^+ -N 在曝气量为 $0.2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, HRT 为 1 d 时, 去除率就达到 98% 以上, 且受曝气量增加与 HRT 延长影响不明显. 当 HRT 为 1 d, 曝气量为 $0.2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 湿地对低污染水中 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 TN 去除率都在 85% 以上, 当 HRT 为 3 d, 曝气量为 $0.4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 湿地对低污染水中 NH_4^+ -N、

NO_3^- -N 和 TN 去除率都达 95% 以上. 未来, 利用曝气人工湿地脱除低污染水中的氮时, 适当延长 HRT, 增大曝气量, 可达更好的去除率. 但延长 HRT 会降低系统处理规模, 增大曝气量会增加系统动力费, 在实际应用中, 研究者可按需选择.

2.3 C/N 对低污染水中不同形态氮去除效果的影响

碳氮比(C/N)是影响反硝化过程的关键因素. 在反硝化过程中, 微生物利用有机碳作为电子供体, 以硝化作用的产物 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 作为电子受体, 将 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 还原为氮气排出 CW 系统^[22~24]. 赵联芳等^[25] 的研究使用芦苇碎石床复合 VFCWs 处理污染河水时, 利用葡萄糖作为外加碳源, 将污染河水的 C/N 由 2 提高到 8, TN 去除率由未补充碳源前的 55% 上升到 89%. Lin 等^[26] 的研究使用果糖作为 CW 反硝化碳源, 在进水 $\rho(\text{NO}_3^-$ -N) 为 $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 随果糖投加量增加, 湿地中 NO_3^- -N 的去除率显著提高, 当进水 C/N 为 3.5 时, NO_3^- -N 去除率达到 90% 以上. 由此可见, 在生物反硝化过程中利用外加碳源的方式, 增大 C/N, 可提高湿地反硝化速率, 增强脱氮效果. 本研究中, C/N 对低污染水中不同形态氮的去除效果如图 4.

2.3.1 C/N 对 NH_4^+ -N 去除效果的影响

不同 C/N 条件下, CW 对 NH_4^+ -N 的去除效果如图 4(a). 在碳氮比为 0(无进水碳源)、1、2.5 和 5 时, 平均出水 $\rho(\text{NH}_4^+$ -N) 分别为 0.15、0.19、0.16 和 $0.19 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 对应的平均去除率分别为 98.62%、98.68%、98.64% 和 98.88%. NH_4^+ -N 的去除率不受 C/N 影响, 一直维持在一个较高水平.

2.3.2 C/N 对 NO_3^- -N 去除效果的影响

不同 C/N 条件下, CW 对 NO_3^- -N 的去除效果如图 4(b). 在碳氮比为 0(无进水碳源)、1、2.5 和 5 时, 平均出水 $\rho(\text{NO}_3^-$ -N) 分别为 7.23、6.46、4.21 和 $2.40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 随 C/N 增加, NO_3^- -N 出水浓度呈现明显下降趋势. 在低 C/N(C/N 为 0 和 1) 时, 出水 $\rho(\text{NO}_3^-$ -N) 高于进水. 这是因为 NH_4^+ -N 硝化后的主要产物是 NO_3^- -N; 在 DO 充足的曝气 CW 中, 98% 以上的 NH_4^+ -N 都已被转化[图 4(a)], 产生大量 NO_3^- -N. 而 NO_3^- -N 去除主要通过反硝化作用, 这个过程需要有机碳源作为电子供体, 才能将 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 还原为氮气排出湿地^[27]. 过低的 C/N 比, 不能提供足够的电子供体将 NH_4^+ -N 转化和湿地进水带来的 NO_3^- -N 转化完全, 造成了 NO_3^- -N 累积. 当碳氮比为 5 时, NO_3^- -N 的去除率升高至 50.48%. 说明曝气 CW 处理低污染水时, 碳源不足是造成 NO_3^- -N 去

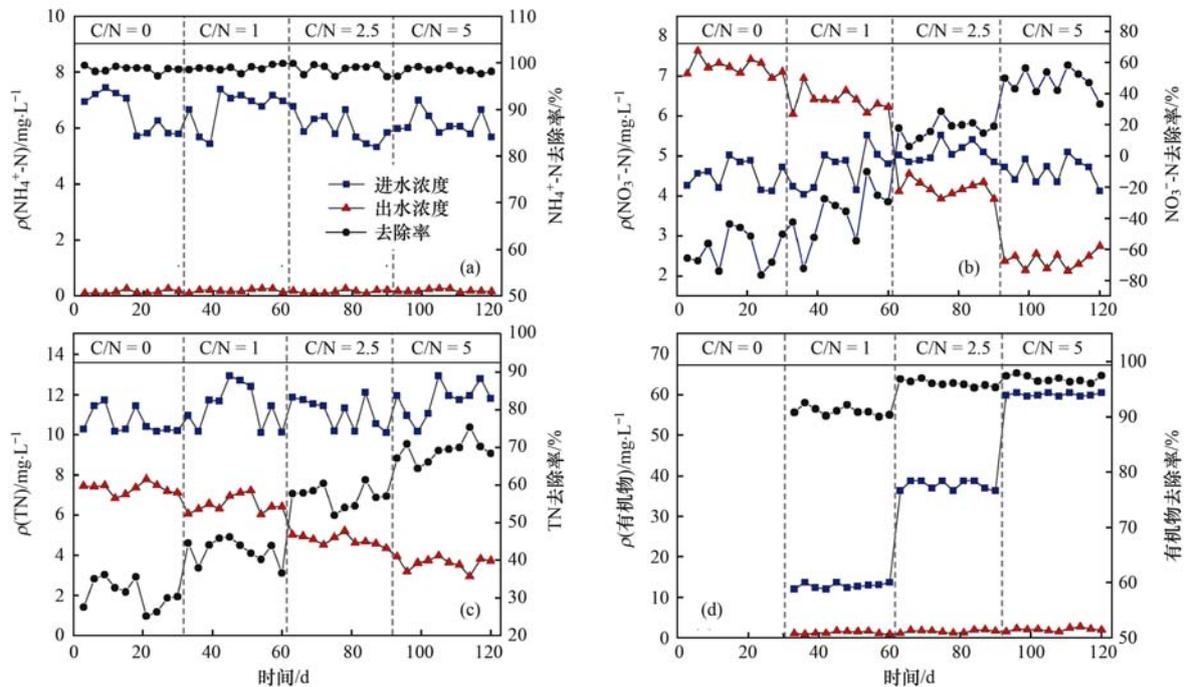


图4 碳氮比对低污染水中氮素去除效果的影响

Fig. 4 Effect of carbon-nitrogen ratio on the removal of nitrogen in low-pollution water

除率不高的主要原因. 通过调节 C/N, 减小反硝化作用限制, 可有效提高 CW 对 NO_3^- -N 的去除效果.

2.3.3 C/N 对 TN 去除效果的影响

不同 C/N 条件下, 人工湿地对 TN 的去除效果如图 4(c). 在进水碳氮比为 0 (无进水碳源)、1、2.5 和 5 时, TN 平均出水浓度分别为 7.32、6.54、4.76 和 3.69 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 对应的平均去除率分别为 31.06%、42.57%、57.02% 和 68.49%. 随 C/N 增加, TN 去除率显著提高. 在 C/N 比为 2.5 和 5 时, TN 去除率均达到 50% 以上; 较无碳源时, 其去除率分别提高了 25.96% 和 37.43%. TN 的去除是 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 去除的综合体现. 间歇曝气湿地中 DO 充足, 而硝化过程又不受 C/N 影响, 因此, 曝气 CW 对低污染水脱氮的主要限制是反硝化作用. 因此可以通过适当提高 C/N 的方式, 来提高曝气 CW 对低污染水的脱氮能力.

2.3.4 C/N 对有机物去除效果的影响

不同 C/N 条件下, CW 对有机物的去除效果如图 4(d). 在碳氮比为 1、2.5 和 5 时, 平均 ρ (有机物) 分别为 12.24、30.52 和 60.57 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 对应的去除率分别为 91.08%、95.84% 和 96.72%. 随 C/N 增加, 该曝气 CW 有机物去除率渐升, 且较好.

2.4 温度对低污染水中不同形态氮去除效果的影响

前人研究表明, 温度对湿地的净化效果影响较大^[28], 通过对 2019 年 12 月 (低温, 8 ~ 12 $^{\circ}\text{C}$) 与 2020 年 7 月 (高温, 28 ~ 32 $^{\circ}\text{C}$) 运行数据的比较, 得

到温度对曝气湿地处理低污染水效果的影响 (图 5).

皮尔逊相关分析表明, 温度与 NH_4^+ -N 和有机物的去除率相关性不显著 ($P > 0.05$); 温度与 TN 和 NO_3^- -N 的去除率显著相关 ($P < 0.01$), 见表 4. 由图 5 可知, 在低温 (8 ~ 12 $^{\circ}\text{C}$) 和高温 (28 ~ 32 $^{\circ}\text{C}$) 时, 平均出水 $\rho(\text{NH}_4^+$ -N) 分别为 0.19 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.18 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其去除率几乎没有差别. 可见, 在 8 ~ 32 $^{\circ}\text{C}$ 范围内, 温度对 NH_4^+ -N 净化效果没有影响. 而 NO_3^- -N 和 TN 的去除率均随温度升高而变大, 尤其是 NO_3^- -N. 在低温 (8 ~ 12 $^{\circ}\text{C}$) 和高温 (28 ~ 32 $^{\circ}\text{C}$) 时, 平均出水 $\rho(\text{NO}_3^-$ -N) 分别为 2.42 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.08 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 高温时 NO_3^- -N 去除率较低温提高了 50.24%. 在低温 (8 ~ 12 $^{\circ}\text{C}$) 和高温 (28 ~ 32 $^{\circ}\text{C}$) 时平均出水 $\rho(\text{TN})$ 分别为 3.73 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.33 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 高温时 TN 去除率较低温时提高了 29.37%. 由此可知, 温度主要是通过影响 NO_3^- -N 的去除率, 进而影响脱氮效果. 通常认为湿地中 NO_3^- -N 的去除受反硝化作用限制. 有研究表明反硝化作用的最佳温度范围是 15 ~ 30 $^{\circ}\text{C}$, 反硝化速率在 15 $^{\circ}\text{C}$ 以下会急剧下降^[29]; 而范围内温度每增高 10 $^{\circ}\text{C}$, 反硝化速率则增加 1.35 倍^[30]. 因此当温度从 8 ~ 12 $^{\circ}\text{C}$ 升高到 28 ~ 32 $^{\circ}\text{C}$ 时, NO_3^- -N 去除率有明显提升. 在低温 (8 ~ 12 $^{\circ}\text{C}$) 和高温 (28 ~ 32 $^{\circ}\text{C}$) 时, 平均出水 ρ (有机物) 分别为 1.86 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 2.06 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其去除率分别为 96.91% 和 96.67%, 差别不明显. 黄翔峰等^[31] 的

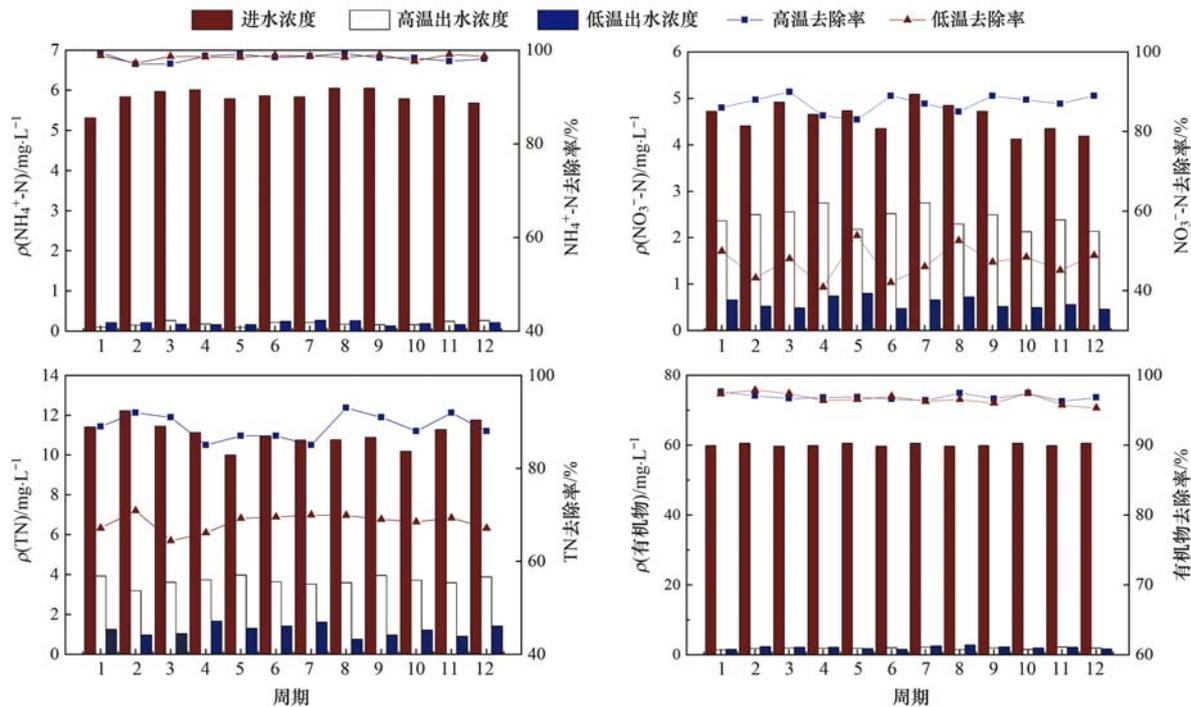


图5 温度对低污染水中氮素去除效果的影响

Fig. 5 Effect of temperature on the removal of nitrogen in low-pollution water

研究也显示,在冬季低温条件下,CW对废水中有机的去除效率几乎不受影响。

3 结论

(1)间歇曝气运行可显著提升湿地内部DO水平,曝气时 $\rho(\text{DO})$ 约为 $2.9 \sim 6.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;停曝后, $\rho(\text{DO})$ 降至 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,在湿地内营造了交替好-缺氧环境,分别促进湿地内好氧硝化和缺氧反硝化。

(2)在HRT为1 d,曝气量为 $0.2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的工作下,间歇曝气湿地对低污染水中TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 去除率分别可达90.15%、98.47%和86.22%,整体效果较好。

(3)低污染水中有机物、TN和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 去除率随C/N增大而增加, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率不受碳氮比影响。在碳氮比为5时,有机物、TN和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 去除率最大,分别为96.72%、68.49%和50.00%。

(4)曝气CW对TN和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 去除效果受温度影响显著;相较于低温($8 \sim 12^\circ\text{C}$),曝气CW在高温($28 \sim 32^\circ\text{C}$)时对TN和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 去除率分别提高了29.37%和50.24%。 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和有机物去除率受温度影响不大。

参考文献:

[1] 王宇娜, 国晓春, 卢少勇, 等. 人工湿地对低污染水中氮去除的研究进展: 效果、机制和影响因素[J]. 农业资源与环境学报, 2020, doi: 10.13254/j.jare.2020.0499.
Wang Y N, Guo X C, Lu S Y, et al. Review of nitrogen removal

in low-polluted water by constructed wetlands: performance, mechanism, and influencing factors[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, doi: 10.13254/j.jare.2020.0499.

- [2] 白献宇, 胡小贞, 庞燕. 洱河流域低污染水类型、污染负荷及分布[J]. 湖泊科学, 2015, 27(2): 200-207.
Bai X Y, Hu X Z, Pang Y. Pollution load, distribution and characteristics of low-polluted water in Lake Erhai watershed[J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(2): 200-207.
- [3] Bednarek A, Szklarek S, Zalewski M. Nitrogen pollution removal from areas of intensive farming—comparison of various denitrification biotechnologies [J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2014, 14(2): 132-141.
- [4] Liu Y, Liu X H, Li K, et al. Removal of nitrogen from low pollution water by long-term operation of an integrated vertical-flow constructed wetland: performance and mechanism [J]. Science of the Total Environment, 2019, 652: 977-988.
- [5] Zhang L, Cui B H, Yuan B X, et al. Denitrification mechanism and artificial neural networks modeling for low-pollution water purification using a denitrification biological filter process [J]. Separation and Purification Technology, 2021, 257, doi: 10.1016/J.SEPUR.2020.117918.
- [6] 卢少勇, 张彭义, 余刚, 等. 人工湿地处理农业径流的研究进展[J]. 生态学报, 2007, 27(6): 2627-2635.
Lu S Y, Zhang P Y, Yu G, et al. Research progress of constructed wetland treating agricultural runoff [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(6): 2627-2635.
- [7] Wu H M, Zhang J, Ngo H H, et al. A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: design and operation [J]. Bioresource Technology, 2015, 175: 594-601.
- [8] 金相灿, 胡小贞. 湖泊流域清水产流机制修复方法及其修复策略[J]. 中国环境科学, 2010, 30(3): 374-379.
Jin X C, Hu X Z. Concept and tactic of clean water runoff generation mechanism restoration in lake watershed [J]. China

- Environmental Science, 2010, **30**(3): 374-379.
- [9] Lu S Y, Zhang P Y, Jin X C, *et al.* Nitrogen removal from agricultural runoff by full-scale constructed wetland in China[J]. Hydrobiologia, 2009, **621**(1): 115-126.
- [10] 卢少勇, 金相灿, 余刚. 人工湿地的氮去除机理[J]. 生态学报, 2006, **26**(8): 2670-2677.
Lu S Y, Jin X C, Yu G, *et al.* Nitrogen removal mechanism of constructed wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, **26**(8): 2670-2677.
- [11] Chang M D, Wang Y Z, Pan Y, *et al.* Nitrogen removal from wastewater via simultaneous nitrification and denitrification using a biological folded non-aerated filter [J]. Bioresource Technology, 2019, **289**, doi: 10.1016/j.biortech.2019.121696.
- [12] 汪健, 李怀正, 甄葆崇, 等. 间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 980-987.
Wang J, Li H Z, Zhen B C, *et al.* Effect of intermittent aeration on nitrogen removal efficiency in vertical subsurface flow constructed wetland[J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 980-987.
- [13] 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.
- [14] 郑冰冰, 吴怡伟, 李云辉, 等. 不同碳氮比对海水养殖废水脱氮效果的影响[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(8): 1848-1856.
Zheng B B, Wu Y W, Li Y H, *et al.* Effect of different C/N ratio on nitrogen removal of mariculture wastewater[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(8): 1848-1856.
- [15] Li X J, Wang R G, Feng L K, *et al.* Intensified nitrogen removal in intermittently-aerated vertical flow constructed wetlands with agricultural biomass: effect of influent C/N ratios[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, **345**: 22-30.
- [16] 刘哲. 空间与时间曝气对垂直潜流人工湿地氮净化能力影响[D]. 南京: 南京大学, 2019.
Liu Z. Effects of spatiotemporal aeration on nitrogen removal in vertical flow constructed wetlands [D]. Nanjing: Nanjing University, 2019.
- [17] Saeed T, Sun G Z. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media[J]. Journal of Environmental Management, 2012, **112**: 429-448.
- [18] 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.
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[J]. Environmental Science, 2016, **37**(11): 4296-4301.
- [19] Wang J, Hou J, Xia L, *et al.* The combined effect of dissolved oxygen and COD/N on nitrogen removal and the corresponding mechanisms in intermittent aeration constructed wetlands [J]. Biochemical Engineering Journal, 2020, **153**, doi: 10.1016/j.bej.2019.107400.
- [20] Li J, Hu Z, Li F Z, *et al.* Effect of oxygen supply strategy on nitrogen removal of biochar-based vertical subsurface flow constructed wetland: intermittent aeration and tidal flow [J]. Chemosphere, 2019, **223**: 366-374.
- [21] Butterworth E, Dotro G, Jones M, *et al.* Effect of artificial aeration on tertiary nitrification in a full-scale subsurface horizontal flow constructed wetland[J]. Ecological Engineering, 2013, **54**: 236-244.
- [22] Lai X S, Zhao Y Q, Pan F X, *et al.* Enhanced optimal removal of nitrogen and organics from intermittently aerated vertical flow constructed wetlands: relative COD/N ratios and microbial responses [J]. Chemosphere, 2020, **244**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125556.
- [23] 周旭. 生物炭联合曝气强化人工湿地处理低碳氮比污水的效能及其过程研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
Zhou X. Enhancement of nitrogen removal of low C/N wastewater using a biochar-amended aerated vertical flow constructed wetland [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.
- [24] 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.
- [25] 赵联芳, 朱伟, 赵建. 人工湿地处理低碳氮比污染河水时的脱氮机理[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(11): 1821-1827.
Zhao L F, Zhu W, Zhao J. Nitrogen removal mechanism in constructed wetland used for treating polluted river water with lower ratio of carbon to nitrogen [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, **26**(11): 1821-1827.
- [26] Lin Y F, Jing S R, Wang T W, *et al.* Effects of macrophytes and external carbon sources on nitrate removal from groundwater in constructed wetlands [J]. Environmental Pollution, 2002, **119**(3): 413-420.
- [27] 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.
- [28] 康晓荣, 刘亚利, 周友新, 等. 间歇曝气强化人工湿地低温脱氮研究[J]. 森林工程, 2019, **35**(3): 74-77.
Kang X R, Liu Y L, Zhou Y X, *et al.* Studies on intermittent aeration enhancing nitrogen removal of constructed wetland at low temperature[J]. Forest Engineering, 2019, **35**(3): 74-77.
- [29] 尹晓雪, 徐圣君, 郑效旭, 等. 低温条件下人工湿地中微生物脱氮的强化措施[J]. 湿地科学, 2020, **18**(4): 482-487.
- [30] Yin X X, Xu S J, Zheng X X, *et al.* Enhanced measures of microbial nitrogen removal in constructed wetlands under low temperature[J]. Wetland Sciences, 2020, **18**(4): 482-487.
- [31] Werker A G, Dougherty J M, McHenry J L, *et al.* Treatment variability for wetland wastewater treatment design in cold climates[J]. Ecological Engineering, 2002, **19**(1): 1-11.
- [32] 黄翔峰, 谢良林, 陆丽君, 等. 人工湿地在冬季低温地区的应用研究进展[J]. 环境污染与防治, 2008, **30**(11): 84-89.
Huang X F, Xie L L, Lu L J, *et al.* Literature review of winter performance of the constructed wetlands located in low-temperate areas[J]. Environmental Pollution and Control, 2008, **30**(11): 84-89.

CONTENTS

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