

百方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.2
第40卷 第2期

目次

冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响 李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼 (513)

珠三角地区利用 PM_{2.5} 反演气溶胶数浓度谱方法 李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邹宇, 刘礼, 蔡明甫, 张芷言, 周声圳 (525)

广州冬季气溶胶中水溶性有机物和类腐殖质的吸光性和荧光光谱特性 范行军, 余旭芳, 操涛, 王艳, 肖新, 谢越, 李飞跃, 宋建中, 彭平安 (532)

扬州市 PM_{2.5} 中重金属来源及潜在健康风险评估 董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 史旭荣, 易睿, 史国良, 冯银厂 (540)

聊城市冬季 PM_{2.5} 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 衣雅男, 魏本杰, 伏梦璇 (548)

博斯腾湖流域大气多环芳烃污染特征、干沉降通量及来源 宋世杰, 黄韬, 赵留元, 毛潇萱, 穆熙, 高宏, 马建民 (558)

某集约化肉鸡饲养场 PM_{2.5} 中抗生素抗性基因的分布特征 刘菲, 许霞, 屠博文, 汪楚乔, 江晓栋, 王利平, 薛银刚 (567)

水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响 胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 刘强, 谢成玉, 张秀芳, 张文庆, 温学发, 刘寿东, 李旭辉 (573)

滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献 任加国, 贾海斌, 焦立新, 王一茹, 杨苏文, 武倩倩, 高秋生, 崔志丹, 郝子峰 (582)

基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 高光, 邵克强 (590)

湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响 余茂蕾, 洪国喜, 许海, 朱广伟, 朱梦圆, 权秋梅 (603)

异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险 李小林, 刘恩峰, 于真真, 张恩楼, 林祺, 王荣, 沈吉 (614)

珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素 杜佳, 王永红, 黄清辉, 戴琦, 杨远东 (625)

北运河粪源微生物分布特征及健康风险评估 陈磊, 李蕾芳, 郅晓沙, 张普, 戴莹, 肖月晨, 沈珍瑶 (633)

氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律 郝文超, 王从锋, 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 赵萍, 丹勇, 胡子龙 (640)

磁性赭铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响 王艳, 林建伟, 詹艳慧, 张宏华, 张志斌, 何思琪, 赵钰颖, 吴小龙, 俞阳 (649)

钙预处理对磁性赭铁改性膨润土吸附水中磷酸盐的影响 赵钰颖, 林建伟, 张宏华, 张志斌, 詹艳慧, 姜博汇, 何思琪, 俞阳, 吴小龙, 王艳, 陈璐, 李十盛 (658)

NH₄⁺ 对镁改性生物炭除磷效果的影响 郭蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 曹晶, 储昭升, 杨永哲 (669)

3种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较 吴露, 刘锋, 龙睿, 罗沛, 肖润林, 陈向, 吴金水 (677)

硝酸纤维素膜光降解水中对硝基苯酚的机制 代志峰, 赵同谦, 阴永光, 余加平, 武俐, 郅超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)

ZnTiO₂-TiO₂ 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析 张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (693)

高指数晶面 TiO₂ 对铬的吸附及光催化去除 钟德健, 张健峰, 李尧, 谢晓丹 (701)

Fe⁰/海藻酸钙微球还原-Fenton 氧化协同降解酸性红 B 张环, 李爽爽, 魏俊富, 傅敏, 李雪曦, 丁琦, 白蓉 (708)

不同滤料滤池启动期内对铁锰离子的去除机制 蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何静, 董杨, 王海港 (717)

SGO 改性复合纳滤膜的制备及分盐性能 张彦君, 张少峰, 赵长伟, 王军 (724)

一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制 薛文清, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)

臭氧-CNT 膜改性联用工艺通量及膜污染分析 王凯伦, 刘芳, 关羽琪, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马燕林, 栾桂荣, 郭瑾 (738)

多环芳烃及其衍生物在 SBR/MBBR 工艺中的分布与去除 刘淑惠, 田伟君, 周建仁, 赵婧, 王喆 (747)

微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程 刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊 (754)

从枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水 袁文清, 何皓, 宋文萍, 王曙光, 戴东伟 (761)

夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法 宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 刘锐, 陈吕军 (768)

硝化包埋菌颗粒氨吸附性能及动力学特性 于德爽, 吕廷廷, 陈光辉, 王晓霞, 唐鹏, 黄硕, 刘诚诚, 杜世明 (774)

乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性 毕春雪, 于德爽, 杜世明, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 巩秀珍, 都叶奇 (783)

DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性 杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建园, 张帆, 吕廷廷 (791)

间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷 赵智超, 黄剑明, 李健, 张为堂, 张力航, 吴雪晴, 陈永志 (799)

ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行 韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 朱琳, 刘文如, 沈耀良 (808)

进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响 都叶奇, 于德爽, 甄建园, 王晓霞, 陈光辉, 唐鹏, 王钧, 毕春雪, 巩秀珍, 黄硕, 刘诚诚 (816)

ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性 李田, 印雯, 王昕竹, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (823)

不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响 李冬, 高雪健, 张杰, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (829)

调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行 李海玲, 李冬, 张杰, 刘博, 李帅 (837)

C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响 张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 姜滢, 郭萌蕾, 陈重军, 沈耀良 (845)

基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性 王杨, 朱斌, 董俊, 白晓慧 (853)

黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征 姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 方炎明, 王良梅 (859)

基于高通量测序分析的生物修复石油污染土壤菌群结构变化 祁燕云, 吴蔓莉, 祝长成, 叶茜琼, 徐会宁 (869)

硝化作用对盐碱湿地 N₂O 排放的影响及其环境因子分析 杨曲, 高伟峰, 刘凤琴, 王文锋, 马建华, 徐卓, 梁红, 高大文 (876)

长期定位施用牛粪对夏玉米-冬小麦体系农田 N₂O 和 NO 排放的影响 聂皇华, 张家升, 和周明, 安梅, 杨学云, 顾江新 (885)

地膜覆盖和施肥对菜地 N₂O 排放的影响 倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 江长胜 (893)

双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系 肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 苏姗, 郭昱, 张浪, 唐剑武 (904)

多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响 李亚森, 丁松爽, 殷金玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺 (915)

桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征 丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 王奇岗, 闵佳 (924)

工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析 李锋, 刘思源, 李艳, 史舟 (934)

膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响 林海, 靳晓娜, 董颖博, 罗明科, 赵一鸣 (945)

缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征 陈仕奇, 吕盛, 高明, 黄容 (953)

复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献 张彦军, 郭胜利 (961)

不同水平外源碳在稻田土壤转化与分配的微生物响应特征 王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓悟悟, 葛东达, 吴金水 (970)

宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评估 张俊辉, 林青, 姜珊, 刘滨, 李东兴, 王彦虎 (978)

生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响 周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨滢, 张成 (987)

污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响 袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌 (994)

热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜粪混合物料及其甲烷高值化条件 卞爱琴, 远野, 张璐璐, 付强, 陈天明, 何磊, 丁成, 王爱杰 (1003)

《环境科学》征订启事(547) 《环境科学》征稿简则(828) 信息(581, 933, 952)

硝化作用对盐碱湿地 N_2O 排放的影响及其环境因子分析

杨曲¹, 高伟峰¹, 刘凤琴², 王文锋³, 马建华³, 徐卓³, 梁红^{2*}, 高大文^{1,2*}

(1. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040; 2. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090; 3. 黑龙江扎龙国家级自然保护区管理局, 齐齐哈尔 161000)

摘要: 湿地是温室气体氧化亚氮(N_2O)重要的源或汇, 盐碱湿地作为湿地的重要组成部分, 研究其 N_2O 排放对于探究盐碱湿地 N_2O 产生的硝化作用机制及评估其在温室效应中的作用具有重要意义. 本文对代表性盐碱湿地——扎龙芦苇沼泽湿地生长季的 N_2O 释放量及相关环境因子进行了研究. 结果表明, 生长季 N_2O 通量呈波动性下降趋势, 最大值出现在7月中旬, 平均排放通量为 $(37.49 \pm 15.75) \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 表现为 N_2O 的释放“源”. N_2O 通量与不同深度土层温度存在显著正相关关系($P < 0.05$), 且上层土温对 N_2O 排放的影响程度高于深层土; 淹水期间 N_2O 通量与积水深度呈显著负相关关系($P < 0.05$); 且土壤TOC和TN含量较低, N_2O 通量与0~40 cm土层 NH_4^+ -N含量呈显著正相关关系($P < 0.05$), 而与 NO_3^- -N含量没有关系, 硝化作用程度要比反硝化强; 此外, 土壤氨氧化菌活性与0~20 cm土层温度存在极显著正相关关系($P < 0.01$), 且 N_2O 通量与氨氧化菌活性也呈极显著的线性正相关关系($P < 0.001$), 表明盐碱湿地的 N_2O 释放受硝化作用影响巨大.

关键词: 盐碱湿地; N_2O 通量; 硝化作用; 环境因子; 氨氧化菌活性

中图分类号: X144; X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0876-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201806132

Effect of Nitrification on N_2O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands

YANG Qu¹, GAO Wei-feng¹, LIU Feng-qin², WANG Wen-feng³, MA Jian-hua³, XU Zhuo³, LIANG Hong^{2*}, GAO Da-wen^{1,2*}

(1. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Water Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. Heilongjiang Zhalong National Nature Reserve Administration, Qiqihar 161000, China)

Abstract: Wetlands are important sources and sinks for N_2O . Exploring the role of N_2O emissions in saline-alkali wetlands has great significance in understanding the nitrification mechanism of N_2O production and assessing the role of saline-alkali wetlands in the greenhouse effect. The present study examined the N_2O fluxes and environmental factors of a typical Zhalong reed wetland during the growing season. The results suggested that the N_2O fluxes tended to decrease in volatility, with the highest value in mid-July. The mean flux of N_2O was $(37.49 \pm 15.75) \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, indicating that the typical Zhalong reed wetland was a source of N_2O . The N_2O fluxes exhibited a significantly positive correlation with soil temperature at different depths ($P < 0.05$), and the impact of the upper soil temperature on N_2O flux was higher than that of deep soil. In the flooding period, the relationship between N_2O fluxes and water table depth was negatively correlated ($P < 0.05$). Meanwhile, the TOC and TN contents were lower, and the N_2O flux was significantly positively correlated with the NH_4^+ -N content in the 0-40 cm soil layer ($P < 0.05$), but it was not related to NO_3^- -N content. Nitrification was stronger than denitrification. There was a significant positive correlation between ammonia-oxidizing bacterial activity and soil temperature in 0-20 cm layer ($P < 0.01$). Additionally, the activity of ammonia-oxidizing bacteria also presented significantly positive linear correlation with the N_2O fluxes ($P < 0.001$), which indicated that the release of N_2O in saline-alkali wetlands was greatly affected by nitrification.

Key words: saline-alkali wetlands; N_2O flux; nitrification; environmental factors; ammonia oxidizing bacteria activity

全球大气中60%~70%的 N_2O 来自于土壤的硝化与反硝化过程^[1]. 湿地作为陆地生态系统的重要组成部分, 其土壤温度、湿度、pH、总有机碳(TOC)和总氮(TN)等土壤理化性质的变化都会影响微生物群落结构及多样性和以微生物为媒介的硝化和反硝化作用, 从而影响湿地 N_2O 的排放^[2]. 当前国内外学者已经在湿地 N_2O 的排放特征、影响因素以及生成机制等方面开展了大量研究^[3~5]. 不同类型湿地由于其影响因子的不同 N_2O 排放也有所差异, 依照地域特点, 典型湿地类型包括: 淡水

沼泽湿地、典型河口滨海湿地、典型高原湿地以及盐碱湿地. 其中淡水沼泽湿地 N_2O 的排放通量一般在非冰冻期表现为以排放为主, 多呈现波动性双峰型变化趋势, 排放峰值常出现在5月和7~8月, 且在冰雪覆盖时 N_2O 通常会呈现微弱的

收稿日期: 2018-06-13; 修订日期: 2018-08-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(31470543)

作者简介: 杨曲(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湿地温室气体排放, E-mail: 2431808048@qq.com

* 通信作者, E-mail: hongliang@nefu.edu.cn; gaodw@nefu.edu.cn

吸收现象^[6-9]; 而典型的河口滨海湿地即使在冬季也仍有 N_2O 释放现象, 甚至会在冬季达到 N_2O 排放通量的最大值^[10-13]; 与之相比, 典型高原湿地的 N_2O 通量则呈现较大的波动性变化, 一般无明显的时间变化规律^[14, 15]; 而作为我国内陆独有的湿地类型——盐碱湿地, 其 N_2O 通量的研究还普遍较少. 在研究的各影响因素中土壤水分和土壤温度通常被认为是影响 N_2O 排放的主要控制因素^[16, 17]. 而对于盐碱湿地来说, 其土壤有机质含量相对较少, 且氨氧化菌的丰富度和多样性比较高, 会很大程度地影响微生物硝化作用的强度, 而目前针对于盐碱湿地 N_2O 生成排放中硝化作用对其的影响研究还尚不多见.

扎龙湿地是我国北方典型的盐碱湿地, 位于黑龙江省西部的松嫩平原, 乌裕尔河下游, 占地面积约 21 万公顷, 是我国北方同纬度地区保留最完善、景观最原始、物种最丰富的沼泽湿地生态系统. 芦苇(*Phragmites communis*)是该地最为典型的植被类型, 且扎龙湿地偏碱性土壤更适宜氨氧化菌的生存, 是潜在的温室气体排放源或汇. 目前, 科学家对扎龙湿地芦苇种群的生长特征及影响因子^[18, 19]、土壤中营养盐的时空变化规律^[20, 21]以及土壤微生物的分布特征^[22]都已进行了研究. 然而在其温室

气体排放方面, 国内学者以往的研究多集中在 CH_4 和 CO_2 上^[23, 24], 而对于扎龙湿地氨氧化菌在氨氧化过程中会释放的重要温室气体—— N_2O 的研究目前还鲜见报道.

本文采用静态暗箱-气相色谱法对扎龙芦苇湿地生长季的 N_2O 排放通量特征和影响因素进行了观测和研究, 分析其 N_2O 产生的硝化作用机制, 以便填补扎龙芦苇湿地 N_2O 释放规律的数据空白, 同时也可探讨硝化作用对盐碱湿地 N_2O 排放的影响, 以及正确评估盐碱湿地在全球温室效应中的作用提供科学的参考依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省齐齐哈尔市东南 30 km 处的扎龙国家级自然保护区内, 地理坐标为 $47^{\circ}10'30''N$, $124^{\circ}14'28''E$ (图 1), 平均海拔 144 m. 扎龙湿地属于典型的中温带大陆性季风气候, 年平均气温 $2 \sim 4.2^{\circ}C$, 年均降水量 428 mm 左右, 且降水多集中在 6~8 月, 约占全年降水量的 67%. 试验区地势低洼平坦, 芦苇是其中的优势代表植物, 土壤盐碱性偏高, 地表明显发白, pH 值在 7.7~8.9 之间.

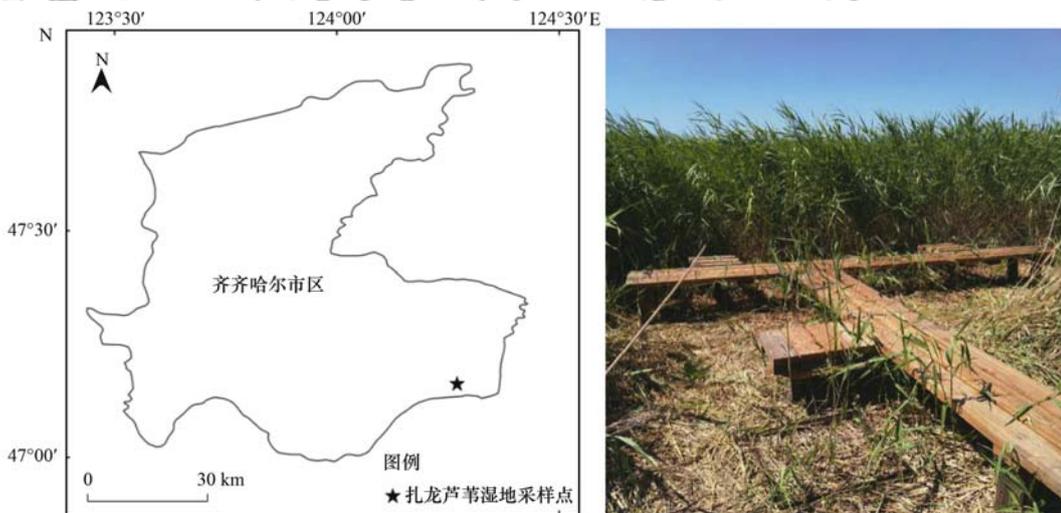


图 1 采样点位置示意

Fig. 1 Map of sampling site

1.2 气体采集与分析

采用静态箱-气相色谱法测定 N_2O 通量. 静态箱为 $50\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ 四面和顶部均封闭的不锈钢材质装置. 箱内顶部装有两个小风扇和一个可连接便携式数字温度计的热电偶探头(JM-624), 并设有气样采集孔和风扇接线孔于箱顶; 箱体外部包裹泡沫, 以减少采样时箱内温度的波动. 箱底基座采

用不锈钢槽架($50\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 20\text{ cm}$), 采样前数天插入地下 20 cm 固定. 为了减少采样时对基座和周围环境的扰动, 在取样点架设了木制栈桥. 采样时间为 2017 年 7 月 4 日至 10 月 29 日, 采样频率为每月 3 次, 约 10 d 取一次, 每次采样时间为当日的 09:00~11:00. 试验设计 3 个平行重复, 同时采集气体样品, 采样时需将底座凹槽注

水密封,用 50 mL 医用注射器在 45 min 时间段内每隔 15 min 采集 1 次气体样品(共抽取 4 次气体样品). 气体样品储存于铝箔采样袋中,带回实验室用 Shimadzu GC2010 气相色谱仪电子捕获检测器(ECD)进行分析,色谱仪设置如下:柱箱温度 70℃,电子捕获检测器工作温度 250℃,色谱柱采用长度为 1 m 内径 2 mm 的 80~100 目 Porapak Q 填充物来分离 N₂O,载气为高纯氮气,流速 20 mL·min⁻¹. 采集气体的同时,同步测定箱内温度、土壤温度和积水深度.

N₂O 的排放通量表示单位时间、单位面积观测箱内 N₂O 质量的变化,可采用下述公式进行计算:

$$F = \frac{dc}{dt} \times \frac{M}{V_0} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \times H$$

式中, F 为 N₂O 的排放通量 [$\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], dc/dt 为采样过程中箱内气体浓度随时间的变化率, M 为 N₂O 的摩尔质量 ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$), P 为采样点气压 (Pa), T 为采样时绝对温度 (K), V_0 、 P_0 、 T_0 分别为标准状态下的气体摩尔体积 ($\text{mL} \cdot \text{mol}^{-1}$)、空气气压 (Pa) 和绝对温度 (K), H 为水面以上采样箱高度 (m).

1.3 土壤样品的采集与测定

土壤采集时间为 2017 年 7~10 月,采样频率为每月两次,采集时间与每月 3 次气体采集中的两次时间相对应,在采集气体的同时采集土壤样品,现场测定 5 个层次(0、5、20、40、60 cm)土壤温度,每次采集 3 个层次(0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm)土壤样品. 将采集到的土样过 2 mm 筛以去除其中的石块、植物残根等杂物,用于相应土壤理化指标和微生物活性的测定.

土壤 pH 值采用电位法(水土比 2.5:1)测定;土壤含水率采用 105℃ 烘干比重法测定;水位深度使用米尺进行现场测量;TOC、TN 含量需将样品自然风干,磨碎后采用元素分析仪检测;NH₄⁺、NO₃⁻ 含量使用 1 mol·L⁻¹ KCl 浸提(水土比 5:1),振荡离心过滤后,采用连续流动分析仪(Seal Analytical AA3, Norderstedt, Germany)检测;土壤中氨氧化菌的潜在氨氧化速率(potential ammonia oxidation rate, PAO)需取 25 g 鲜土样品,在 (25 ± 2)℃, 175 r·min⁻¹ 下进行避光培养,采用氯酸盐抑制的方法快速检测(ISO15685, 2012).

1.4 数据统计分析

采用线性回归分析 N₂O 通量与土温、水深以及 PAO 等影响因素的相关关系,所有数据均采用 SPSS 20.0 软件进行相关统计分析,并运用 Origin 2016 软件进行绘图.

2 结果与分析

2.1 N₂O 排放特征

扎龙芦苇沼泽湿地生长季 N₂O 排放通量具有明显的动态变化特征,呈现波动性下降变化趋势(图 2). 观测期间, N₂O 通量变化范围为 -24.48 ~ 91.52 $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 最大值出现在 7 月中旬,最小值出现在生长季末,此时 N₂O 出现较弱的吸收现象,但平均通量为 (37.49 ± 15.75) $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 总体上仍然表现为 N₂O 的释放. 这表明,扎龙芦苇湿地生长季为 N₂O 的排放源. 在观测初期(7 月), N₂O 排放通量较高,8 月以后逐渐下降,尤其 9~10 月通量下降显著且波动性较大,甚至在 10 月中下旬出现了负值. 对比前人研究的同为盐碱地的白洋淀芦苇湿地^[25],两地区 7~8 月的 N₂O 通量都明显较高,之后白洋淀湿地 N₂O 通量虽也下降,但直至 10 月末仍有少量 N₂O 释放,而扎龙湿地在生长季末则出现吸收现象. 这可能与不同地区的环境因子差异有关,使得扎龙芦苇湿地 N₂O 排放变化明显.

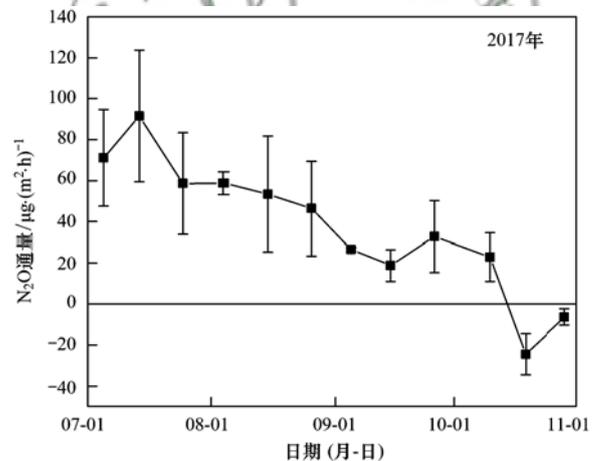


图 2 扎龙芦苇湿地 N₂O 排放通量(平均值 ± 标准误差)

Fig. 2 Dynamic change of N₂O flux in the Zhalong reed wetland (Mean ± SE)

2.2 土壤环境因子与养分含量的变化

2.2.1 土壤温度的变化

扎龙芦苇湿地随着土层深度的增加,土壤温度逐渐降低(图 3). 观测初期土壤温度较高,7 月中旬表层土最高土温可达到 25.0℃,且不同土层深度温度变化幅度较大. 扎龙湿地 0~60 cm 整体土壤温度的最高值出现在 7 月上旬,平均土温 20.2℃,8 月以后土温呈现逐渐下降的趋势,且不同土层温度差异不大. 直至 10 月末,土壤温度已大幅度降至 6.2℃.

2.2.2 湿地积水变化

扎龙芦苇湿地在 8 月中旬出现持续积水情况,

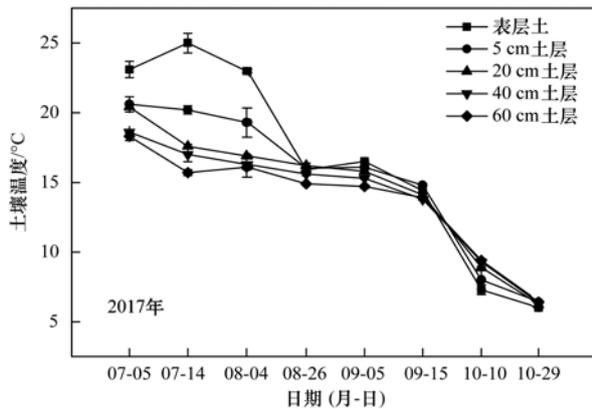


图3 扎龙芦苇湿地不同土层深度土壤温度(平均值±标准误)

Fig. 3 Soil temperature at different soil depths of the Zhalong reed wetland (Mean ± SE)

水位深度越来越高,从最初的 3.3 cm 逐渐升至 9 月末的 27.0 cm,其中 8 月下旬至 9 月上旬水位涨势最大,升高了 8.5 cm. 10 月湿地水位出现小幅度波动回落,但仍不低于 20.0 cm 的水位值,扎龙湿地积水程度较深(图 4).

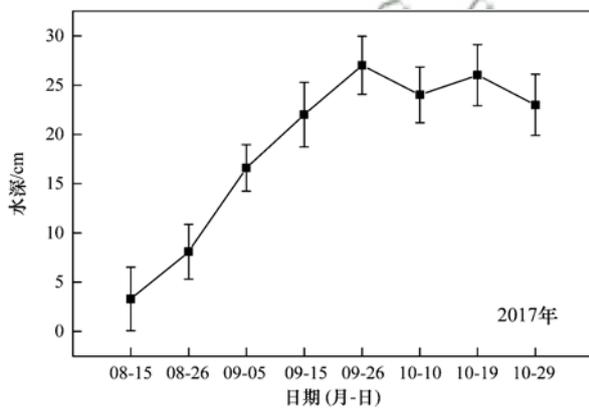


图4 扎龙芦苇湿地积水深度(平均值±标准误)

Fig. 4 Water table depths of the Zhalong reed wetland (Mean ± SE)

2.2.3 土壤 TOC、TN 含量的变化

扎龙芦苇湿地土壤的 TOC 和 TN 含量分别在 27.45 ~ 51.85 $g \cdot kg^{-1}$ 和 0.80 ~ 2.05 $g \cdot kg^{-1}$,其 TOC 含量要明显高于 TN 含量,且二者含量随着土壤深度的增加表现出由表层到底层逐渐降低的趋势(图 5). 同时,土壤 TOC 和 TN 含量总体上的变化趋势大致相似,7、8 月二者含量都各自保持相对稳定,在 8 月末下降到较低值,9 月以后总碳氮含量有所回升,至 10 月末再次下降至低值. 有所差异的是,土壤 TOC 含量在 9 月回升后有再升高趋势,10 月上旬扎龙芦苇湿地 TOC 含量达到了最高值,0 ~ 60 cm 土层平均含量 48.70 $g \cdot kg^{-1}$; 而土壤 TN 含量在 9 月稍有回升后就再次下降,至 10 月末达到了其 TN 含量的最低值,0 ~ 60 cm 土层平均含量 0.87 $g \cdot kg^{-1}$.

2.2.4 土壤 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 含量的变化

扎龙芦苇湿地土壤的 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量分

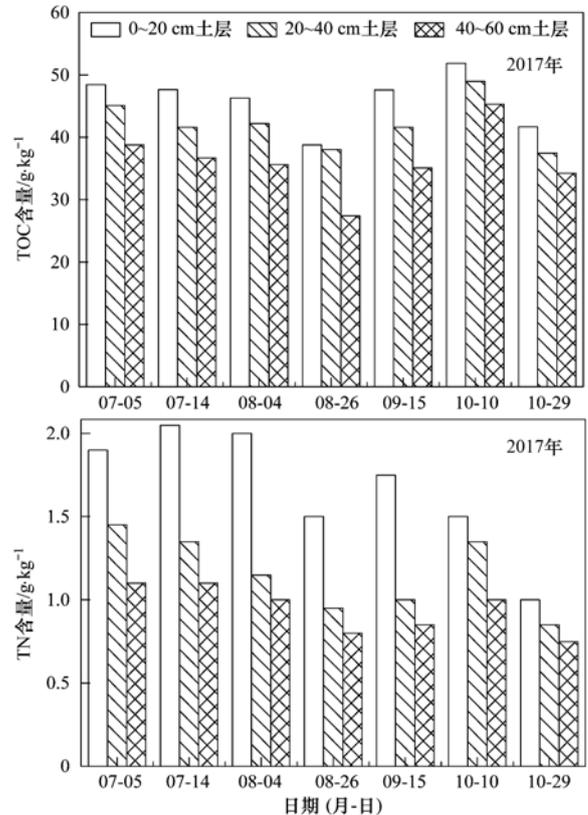


图5 扎龙芦苇湿地不同土层深度土壤 TOC、TN 含量

Fig. 5 Content of TOC and TN in different soil depths of the Zhalong reed wetland

别在 0.48 ~ 2.23 $mg \cdot kg^{-1}$ 和 0.42 ~ 0.71 $mg \cdot kg^{-1}$, NH_4^+ -N 含量稍高于 NO_3^- -N 含量(图 6). 其中 NH_4^+ -N 含量随着土壤深度的增加而逐渐降低,在 7 月中旬其含量达到最高值后(0 ~ 60 cm 土层平均含量 1.49 $mg \cdot kg^{-1}$), NH_4^+ -N 含量开始逐渐下降,至 10 月中旬含量有所回升后又再次降至最低值; 而 NO_3^- -N 含量则变化不大,没有明显的变化趋势,其含量峰值出现在 9 月中旬,0 ~ 60 cm 土层平均含量 0.67 $mg \cdot kg^{-1}$.

2.3 土壤氨氧化菌活性的变化

氨氧化菌属好氧自养型硝化细菌,因此会广泛分布于扎龙湿地的上层土壤中(0 ~ 20 cm). 本试验在观测期内对扎龙芦苇湿地 0 ~ 20 cm 土层的 PAO 进行了连续测定(图 7),其波动范围(以 NO_2^- /干土计)为 4.40 ~ 13.45 $\mu g \cdot (g \cdot h)^{-1}$,氨氧化菌活性最高出现在 7 月中旬,最低值在 10 月末,整体变化趋势与 N_2O 排放基本保持一致.

3 讨论

3.1 N_2O 通量与土壤各理化性质的关系

土壤温度对产生 N_2O 的生物学过程具有十分重要的影响,可通过影响硝化和反硝化细菌的活性间接影响 N_2O 的产生速率^[26]. 三江平原小叶章湿地的

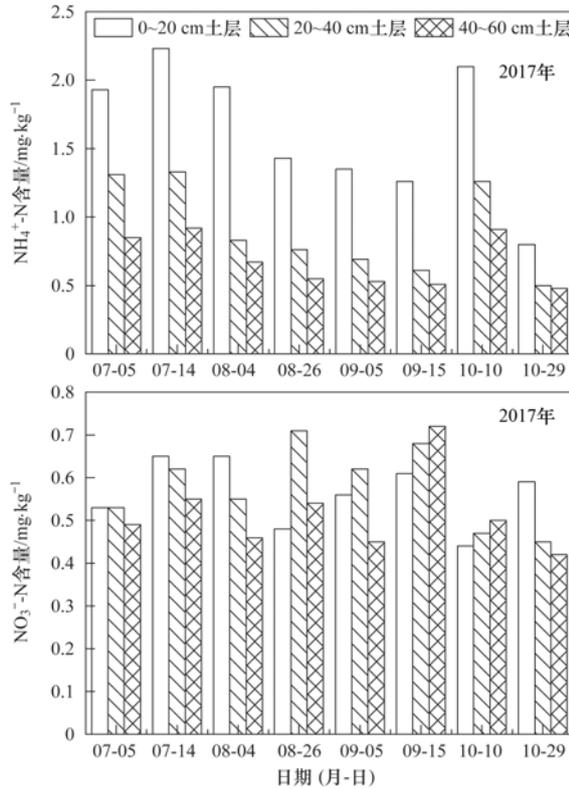


图6 扎龙芦苇湿地不同土层深度土壤 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N含量

Fig. 6 Content of NH_4^+ -N and NO_3^- -N in different soil depths of the Zhalong reed wetland.

表1 N_2O 排放通量与不同深度土壤温度的关系¹⁾

Table 1 Relationship between N_2O fluxes and soil temperature at different soil depths

土壤深度/cm	线性回归方程	土壤温度范围/°C	R^2	P
表层	$y = 4.06x - 25.4$	6 ~ 25	0.833	< 0.01
5	$y = 5.12x - 36.6$	6.4 ~ 20.6	0.749	< 0.01
20	$y = 5.62x - 40.3$	6.2 ~ 20.4	0.691	< 0.05
40	$y = 6.40x - 48.6$	6.3 ~ 18.6	0.700	< 0.01
60	$y = 6.60x - 49.1$	6.4 ~ 18.3	0.647	< 0.05

1) y 代表 N_2O 排放通量, $P < 0.01$ 表明在0.01水平上极显著, $P < 0.05$ 表明在0.05水平上显著

从而促进了 N_2O 的产生,因此在7月出现了 N_2O 的排放峰值.通常土壤温度高于 5°C 时就适于硝化微生物发挥活性产生 N_2O ^[29],且在 $15 \sim 40^\circ\text{C}$ 范围内,硝化作用随温度的升高而升高^[30].本研究8月以后 N_2O 通量随土温降低而下降,由此可见硝化反应对该地 N_2O 的产生具有很大的影响.另外,上层土温对 N_2O 通量的影响程度要明显高于深层土,一方面是因为大气中的N沉降能被浅层土壤更好地吸收^[31,32];另一主要原因是由于氨氧化菌为好氧菌,其在浅层土壤中含量较高,且植物根系大多分布于土壤上层,根系分泌物多,根系泌氧也能在根际形成适合好氧微生物生存的微氧环境,氨氧化菌更活跃^[33,34].氨氧化菌的活性直接影响硝化作用强弱,因此,这也表明在本研究区中硝化作用对 N_2O 排放变化的影响可能更大.

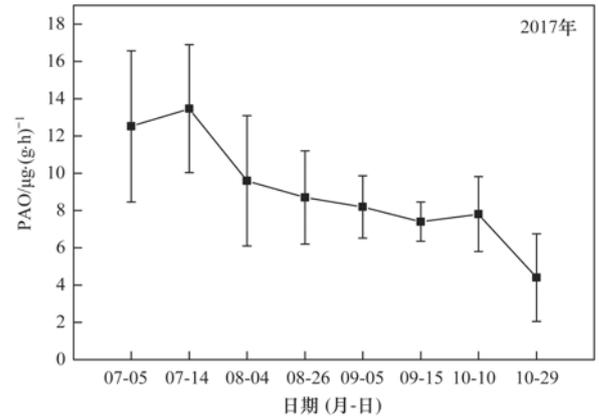


图7 扎龙芦苇湿地0~20 cm土层氨氧化菌活性(平均值±标准误)

Fig. 7 PAO of 0-20 cm soil layer in the Zhalong reed wetland (Mean \pm SE)

N_2O 通量与土壤温度(5 cm)呈显著的线性正相关关系^[27,28].本研究也发现 N_2O 排放与土壤温度关系密切,对二者的相关分析表明(表1):扎龙芦苇湿地生长季的 N_2O 通量与0、5、20、40、60 cm的土层温度皆呈显著正相关关系($P < 0.05$),这就说明该湿地土壤 N_2O 通量的变化在很大程度上受制于0~60 cm土温的影响.扎龙芦苇湿地观测初期由于夏季温度高,土壤温度也升高,微生物代谢活性增强,

此外,湿地水分含量直接关系到土壤的通气状况和 O_2 含量,对土壤的硝化和反硝化作用强弱产生影响,从而引起 N_2O 通量的变化.通过对湿地积水深度与 N_2O 排放的相关分析表明(图8):二者呈显著的线性负相关关系($P < 0.05$).这种关系也已被许多研究所证实,当土壤含水量处于饱和含水量以下时,土壤水分与 N_2O 通量呈现正相关;当土壤含水量处于饱和含水量以上时,积水深度与 N_2O 通量存在着一定的负相关性^[35].扎龙芦苇湿地8月中旬后的土壤含水量远在饱和含水量之上,因此自8月水位逐渐升高后, N_2O 排放量下降.且过高的积水深度会阻碍 N_2O 的排放扩散,增加微生物吸收 N_2O 进一步还原为 N_2 的几率^[36].这也导致了 N_2O 通量的持续下降甚至在生长季末出现了负值.一般认为,在土壤透气性良好的条件下,土壤呈氧化状

态, 硝化过程为 N_2O 的主要释放源; 而在透气性较差的条件下, 土壤呈还原态, 反硝化会释放 N_2O ^[37]. 扎龙湿地7月的土壤含水量在45%~75%之间, 正处于研究发现的 N_2O 生成与排放的最适土壤水分值^[38], 因此有利于硝化产生更多的 N_2O . 之后随着湿地积水的逐渐加深, 土壤透气性较差. 理论上, 淹水造成的厌氧环境, 会促进反硝化过程, 从而增加 N_2O 排放比例^[39]. 但研究区的 N_2O 通量一直在降低, 一方面可能是强还原环境使得 N_2O 还原成了 N_2 , 另一方面也有可能是因为硝化作用的减弱造成的.

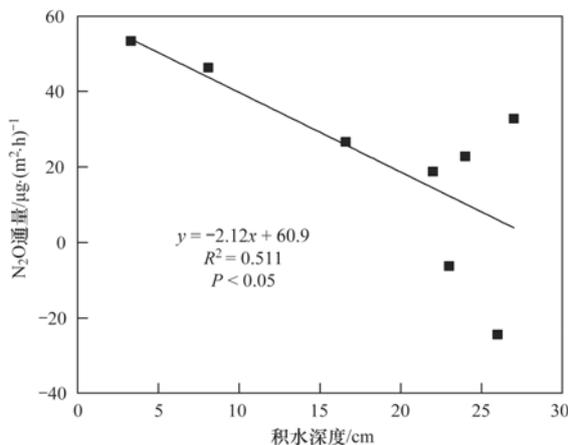


图8 N_2O 排放通量与积水深度的关系

Fig. 8 Relationship between N_2O fluxes and water table depth

扎龙芦苇湿地相比三江平原泥炭沼泽湿地^[40,41]、尕斯库勒湖湿地^[14]这类酸性土壤地区, 其土壤TOC和TN含量明显要低很多. 有研究表明, 当土壤营养元素处于较高水平下, 异养微生物处于竞争优势, 可能会抑制自养微生物生长, 降低自养微生物多样性^[42]. 并且反硝化作用与土壤有机碳含量相关, 有机质含量高可提高反硝化作用^[43,44]. 因此, 扎龙芦苇湿地较低的有机质含量可能更适宜自养型氨氧化菌的生长, 同时也降低了土壤的反硝化作用. 由于硝化作用的初始底物为 NH_4^+-N , 而反硝化为 NO_3^--N , 通过对湿地 NH_4^+-N 含量与 N_2O 通量的相关分析表明(图9): 在0~40 cm土层中二者呈显著的线性正相关关系($P < 0.05$), 这就说明扎龙湿地 N_2O 的排放在一定程度上会受到中上层土壤 NH_4^+-N 含量的影响, NH_4^+-N 的硝化过程可以产生 N_2O ^[45], 由此可见硝化反应在该地 N_2O 产生过程中起到了重要作用. 而对比于 NO_3^--N 含量与 N_2O 通量之间则没有显著的相关关系, 表明反硝化对 N_2O 排放影响较小, 可推断在扎龙芦苇湿地 N_2O 释放过程中, 硝化作用的贡献程度要比反硝化强.

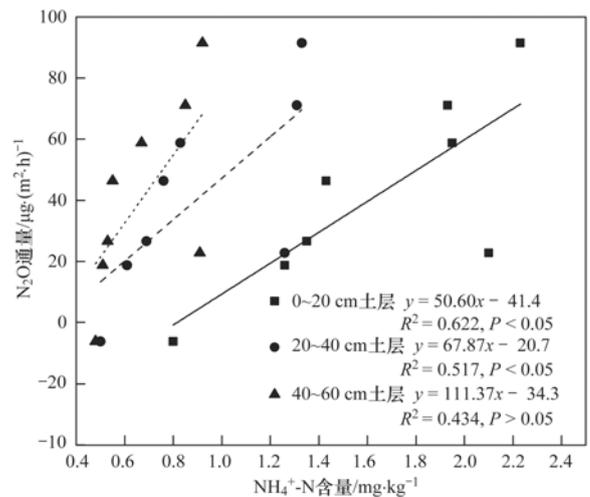


图9 N_2O 排放通量与不同深度土壤 NH_4^+-N 含量的关系

Fig. 9 Relationship between N_2O fluxes and soil ammonium nitrogen content at different soil depths

3.2 氨氧化菌活性对 N_2O 排放通量的影响

氨氧化菌是硝化作用生成 N_2O 过程中最关键的微生物, 外部环境因子以及营养状况的变化会十分敏感地影响土壤氨氧化菌活性, 从而影响 N_2O 的产生和排放. 通过对0~20 cm土层温度与氨氧化菌活性的相关分析表明(图10): 二者呈极显著的正相关关系($P < 0.01$). 一般认为, 氨氧化菌的最适生长温度为20~30℃, 高于或低于此范围氨氧化菌活性都会有所下降^[46]. 本研究中只有在7月上层土壤(0~20 cm)的平均温度在21℃左右, 达到了氨氧化菌的最适温度值, 此时活性也达到了生长期阶段的最高值. 之后氨氧化菌活性明显下降, 因为低温会对微生物细胞膜的流动性和生物大分子的活性产生影响, 不利于其正常代谢. 氨氧化菌在较低温度时, 其群落结构多样性和活性均有所降低^[47]. 同时, 土壤碳氮含量和 O_2 含量也是影响氨氧化菌

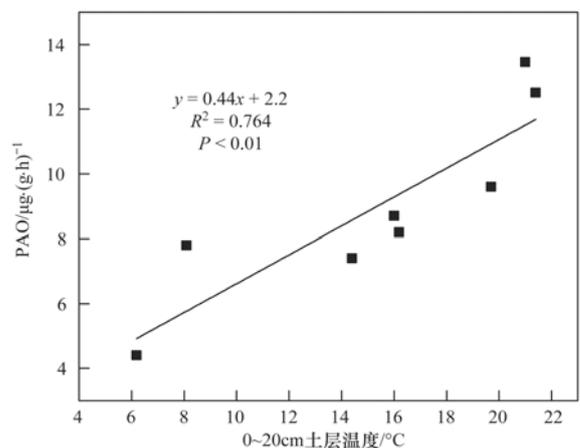


图10 0~20 cm土层氨氧化菌活性与土壤温度关系

Fig. 10 Relationship between PAO and soil temperature in the 0-20 cm layer

活性的重要因素,因氨氧化菌为自养微生物,土壤中的有机质不是其碳源,盐碱湿地过低的有机质含量可能会增加氨氧化菌的数量,增强土壤的硝化作用.但硝化作用的正常进行需要消耗大量氧气,且土壤水分会通过对 O_2 含量的影响来影响氨氧化菌活性^[48].研究区8月中旬后越来越高的积水深度导致土壤处于极度厌氧状态,致使硝化作用减弱,氨氧化菌活性降低.综合分析,7月中旬由于上述土壤温度、含水率以及碳氮含量等各方面综合作用达到最适状态,氨氧化菌活性达到最高,从而促进了扎龙湿地 N_2O 排放达到了最大值,之后氨氧化菌活性降低, N_2O 通量也随之下降.

PAO是指土壤或沉积物中参与氨氧化作用的微生物在饱和基质浓度下将氨氮氧化的最大能力^[49].由于弱碱性湿地氨氧化菌种群的丰富度和多样性要显著高于酸性湿地^[22],扎龙湿地此类的偏碱环境更适宜氨氧化菌的生存.氨氧化菌在氨单加氧酶(ammonia monooxygenase, AMO)和羟胺氧化还原酶(hydroxylamine oxidoreductase, HAO)的催化作用下可以将铵态氮转化为亚硝态氮,该过程是硝化作用的第一步,也是限速步骤^[50].因此对于PAO的测定能够在一定程度上反映出土壤中微生物的生态功能及其硝化活性的强弱.同时,在这一氨氧化过程中,会生成中间产物羟胺(NH_2OH),其化学分解释放 N_2O ^[51].通过对PAO和 N_2O 通量进行相关分析表明(图11):二者呈极显著的线性正相关关系($P < 0.001$),相关系数为0.949.这就说明在扎龙芦苇沼泽湿地生态系统中, N_2O 的产生和排放极大程度地受制于氨氧化菌活性的影响,进一步表明了硝化反应对此类盐碱湿地 N_2O 的释放产生了巨大作用.

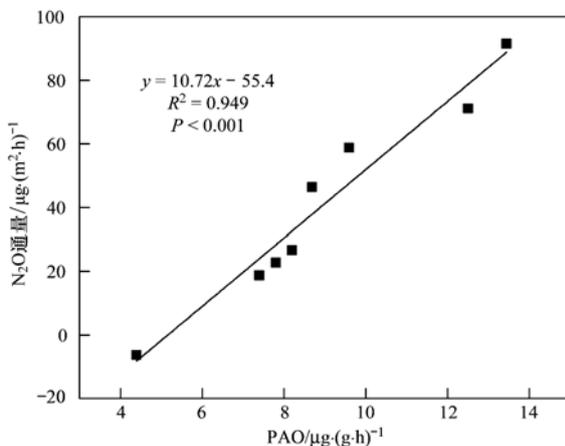


图 11 N_2O 排放通量与 0~20 cm 土层氨氧化菌活性关系

Fig. 11 Relationship between N_2O fluxes and PAO in the 0-20 cm soil layer

4 结论

(1) 扎龙芦苇沼泽湿地生长季 N_2O 的排放通量呈现波动性下降趋势,变化范围为 $-24.48 \sim 91.52 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,最大值出现在7月中旬,整体平均通量为 $(37.49 \pm 15.75) \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,表现为大气 N_2O 的排放源.

(2) 土壤温度、积水深度和养分含量都会影响 N_2O 排放,扎龙芦苇湿地 N_2O 排放通量与不同深度的土层温度皆呈显著正相关关系($P < 0.05$),且上层土壤温度对 N_2O 排放通量的影响程度要明显高于深层土;而与积水深度则呈显著负相关关系($P < 0.05$).且湿地 TOC 和 TN 含量相对较低, N_2O 通量与 0~40 cm 土层的 NH_4^+ -N 含量呈显著正相关关系,而与 NO_3^- -N 含量没有关系,硝化作用程度要比反硝化强.

(3) 扎龙芦苇沼泽湿地氨氧化菌活性受外部环境因子敏感影响,其土壤氨氧化菌活性与土壤温度呈极显著正相关关系($P < 0.01$),且活性变化趋势与 N_2O 排放通量相似,相关分析表明二者存在极显著正相关关系($P < 0.001$),进一步表明了硝化反应对此类盐碱湿地 N_2O 的释放产生了巨大作用.

参考文献:

- [1] Syakila A, Kroeze C. The global nitrous oxide budget revisited [J]. *Greenhouse Gas Measurement and Management*, 2011, **1** (1): 17-26.
- [2] Gödde M, Conrad R. Influence of soil properties on the turnover of nitric oxide and nitrous oxide by nitrification and denitrification at constant temperature and moisture [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, **32**(2): 120-128.
- [3] Kachenchart B, Jones D L, Gajaseeni N, et al. Seasonal nitrous oxide emissions from different land uses and their controlling factors in a tropical riparian ecosystem [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, **158**: 15-30.
- [4] Audet J, Hoffmann C C, Andersen P M, et al. Nitrous oxide fluxes in undisturbed riparian wetlands located in agricultural catchments: Emission, uptake and controlling factors [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **68**: 291-299.
- [5] 王立新, 吴忠伟, 刘华民, 等. 2013 年乌梁素海湖滨带土壤-植物系统甲烷和一氧化二氮通量及生态系统总呼吸研究 [J]. *湿地科学*, 2016, **14**(6): 763-772.
Wang L X, Wu Z W, Liu H M, et al. Fluxes of methane and nitrous oxide and total ecosystem respiration of soil and plant system in lakeshore of Wuliangsu Lake in 2013 [J]. *Wetland Science*, 2016, **14**(6): 763-772.
- [6] Augustin J, Merbach W, Rogasik J. Factors influencing nitrous oxide and methane emissions from minerotrophic fens in northeast Germany [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, **28**(1): 1-4.
- [7] Zhu R B, Liu Y S, Ma J, et al. Nitrous oxide flux to the atmosphere from two coastal tundra wetlands in eastern Antarctica [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(10): 2437-2447.
- [8] 宋长春, 张丽华, 王毅勇, 等. 淡水沼泽湿地 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放通量年际变化及其对氮输入的响应 [J]. *环境科学*,

- 2006, **27**(12): 2369-2375.
- Song C C, Zhang L H, Wang Y Y, *et al.* Annual dynamics of CO_2 , CH_4 , N_2O emissions from freshwater marshes and affected by nitrogen fertilization [J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(12): 2369-2375.
- [9] 王毅勇, 郑循华, 宋长春, 等. 三江平原典型沼泽湿地氧化亚氮通量[J]. *应用生态学报*, 2006, **17**(3): 493-497.
- Wang Y Y, Zheng X H, Song C C, *et al.* N_2O flux in typical wetlands of Sanjiang Plain [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, **17**(3): 493-497.
- [10] Inubushi K, Furukawa Y, Hadi A, *et al.* Seasonal changes of CO_2 , CH_4 and N_2O fluxes in relation to land-use change in tropical peatlands located in coastal area of South Kalimantan [J]. *Chemosphere*, 2003, **52**(3): 603-608.
- [11] 胡泓, 王东启, 李杨杰, 等. 崇明东滩芦苇湿地温室气体排放通量及其影响因素[J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(1): 43-50.
- Hu H, Wang D Q, Li Y J, *et al.* Greenhouse gases fluxes at Chongming Dongtan *Phragmites australis* wetland and the influencing factors [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(1): 43-50.
- [12] 许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹. 苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素[J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2383-2392.
- Xu X W H, Zou X Q, Liu J R. Temporal and spatial dynamics of greenhouse gas emissions and its controlling factors in a coastal saline wetland in North Jiangsu [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2383-2392.
- [13] 谢文霞, 赵全升, 张芳, 等. 胶州湾河口湿地秋冬季 N_2O 气体排放通量特征[J]. *地理科学*, 2011, **31**(4): 464-469.
- Xie W X, Zhao Q S, Zhang F, *et al.* Characteristics of N_2O flux in estuary wetland of Jiaozhou Bay in autumn and winter [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, **31**(4): 464-469.
- [14] 马维伟, 王辉, 李广, 等. 尕斯库勒湖 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 通量特征初步研究[J]. *草业学报*, 2015, **24**(8): 1-10.
- Ma W W, Wang H, Li G, *et al.* A preliminary study of carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes from the Gahai wetland [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, **24**(8): 1-10.
- [15] 王德宣, 宋长春, 王跃思, 等. 若尔盖高原沼泽湿地 N_2O 排放通量研究[J]. *生态科学*, 2005, **24**(3): 193-196.
- Wang D X, Song C C, Wang Y S, *et al.* N_2O flux from the mire in Ruergai Plateau [J]. *Ecologic Science*, 2005, **24**(3): 193-196.
- [16] Lohila A, Aurela M, Hatakka J, *et al.* Responses of N_2O fluxes to temperature, water table and N deposition in a northern boreal fen [J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, **61**(5): 651-661.
- [17] Regina K, Nykänen H, Silvola J, *et al.* Fluxes of nitrous oxide from boreal peatlands as affected by peatland type, water table level and nitrification capacity [J]. *Biogeochemistry*, 1996, **35**(3): 401-418.
- [18] 焦德志, 荣子, 曹瑞, 等. 扎龙湿地保护区异质生境芦苇种群分株构件的数量特征[J]. *生态学报*, 2017, **37**(23): 7843-7853.
- Jiao D Z, Rong Z, Cao R, *et al.* Quantitative characteristics of the ramet module of *Phragmites australis* populations in heterogeneous habitats in the Zhalong Wetland National Reserve [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(23): 7843-7853.
- [19] 杨晓杰, 佟守正, 李旭业, 等. 扎龙湿地芦苇群落生长特征对水深梯度变化的响应[J]. *东北林业大学学报*, 2012, **40**(12): 67-70.
- Yang X J, Tong S Z, Li X Y, *et al.* Response of growth feature of reed communities in Zhalong wetland to the change of water depth gradient [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2012, **40**(12): 67-70.
- [20] 张静, 马玲, 丁新华, 等. 扎龙湿地不同生境土壤微生物生物量碳氮的季节变化[J]. *生态学报*, 2014, **34**(13): 3712-3719.
- Zhang J, Ma L, Ding X H, *et al.* Seasonal dynamics of soil microbial biomass C and N in different habitats in Zhalong wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(13): 3712-3719.
- [21] 叶华香, 臧淑英, 肖海丰, 等. 扎龙湿地表层沉积物营养盐空间分布特征及评价[J]. *自然资源学报*, 2013, **28**(11): 1966-1976.
- Ye H X, Zang S Y, Xiao H F, *et al.* Spatial distribution and evaluation of nutrients in surface sediments of Zhalong wetland [J]. *Journal of Natural Resource*, 2013, **28**(11): 1966-1976.
- [22] 谢月. 两种典型东北寒温带沼泽湿地中氨氧化微生物种群的分布特征研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- Xie Y. Study on the distribution characteristics of ammonia-oxidizing microbes population of two typical marsh wetland soil in northeast cool temperate zone [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [23] 黄璞玮, 于洪贤, 柴龙会, 等. 扎龙芦苇湿地生长季的甲烷排放通量[J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(5): 1219-1224.
- Huang P Y, Yu H X, Chai L H, *et al.* Methane emission flux of Zhalong *Phragmites australis* wetlands in growth season [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22**(5): 1219-1224.
- [24] 杨荐, 关爱洁, 陈碧琪, 等. 人为补水对扎龙芦苇湿地甲烷排放的影响[J]. *安徽农业科学*, 2014, **42**(22): 7456-7458.
- Yang J, Guan A J, Chen B Q, *et al.* Effects of artificial recharge on methane emission from Zhalong reed wetland [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, **42**(22): 7456-7458.
- [25] 牛翠云, 王树涛, 郭艳杰, 等. 白洋淀湿地芦苇型水陆交错带土壤氮素形态变化和 N_2O 排放特征及氮储量研究[J]. *河北农业大学学报*, 2017, **40**(3): 72-79.
- Niu C Y, Wang S T, Guo Y J, *et al.* Studies on variation characteristics of soil nitrogen forms, nitrous oxide emission and nitrogen storage of the *Phragmites australis*-dominated land/inland water ecotones in Baiyangdian wetland [J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2017, **40**(3): 72-79.
- [26] 张丽华. 氮输入对沼泽湿地碳收支的影响[D]. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2007.
- [27] Yu J B, Liu J S, Wang J D, *et al.* Nitrous oxide emission from *Deyeuxia angustifolia* freshwater marsh in northeast China [J]. *Environmental Management*, 2007, **40**(4): 613-622.
- [28] 孙志高, 刘景双, 杨继松, 等. 生长季与非生长季小叶章湿地 N_2O 通量特征及排放贡献[J]. *草业学报*, 2009, **18**(6): 242-247.
- Sun Z G, Liu J S, Yang J S, *et al.* N_2O flux characteristics and emission contributions of *Calamagrostis angustifolia* wetland during growth and non-growth seasons [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, **18**(6): 242-247.
- [29] Agehara S, Warncke D D. Soil moisture and temperature effects on nitrogen release from organic nitrogen sources [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, **69**(6): 1844-1855.
- [30] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田 N_2O 产生与排放的影响[J]. *环境科学*, 1997, **18**(5): 1-5.
- Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, *et al.* Impacts of temperature on N_2O production and emission [J]. *Environmental Science*, 1997, **18**(5): 1-5.
- [31] Pihlatie M, Pumpanen J, Rinne J, *et al.* Gas concentration

- driven fluxes of nitrous oxide and carbon dioxide in boreal forest soil[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2007, **59**(3): 458-469.
- [32] Pihlatie M K, Kiese R, Brüggemann N, *et al.* Greenhouse gas fluxes in a drained peatland forest during spring frost-thaw event[J]. *Biogeosciences*, 2010, **7**(5): 1715-1727.
- [33] Gilbert B, Frenzel P. Rice roots and CH₄ oxidation: the activity of bacteria, their distribution and the microenvironment[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, **30**(14): 1903-1916.
- [34] Trias R, Ruiz-Rueda O, García-Lledó A, *et al.* Emergent macrophytes act selectively on ammonia-oxidizing bacteria and archaea[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, **78**(17): 6352-6356.
- [35] Rudaz A O, Wälti E, Kyburz G, *et al.* Temporal variation in N₂O and N₂ fluxes from a permanent pasture in Switzerland in relation to management, soil water content and soil temperature[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1999, **73**(1): 83-91.
- [36] 陈海燕, 李虎, 王立刚, 等. 京郊典型设施蔬菜地N₂O排放规律及影响因素研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2012(5): 5-10.
Chen H Y, Li H, Wang L G, *et al.* Characteristics and influencing factors on nitrous oxide emissions from typical greenhouse vegetable fields in Beijing suburbs[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2012(5): 5-10.
- [37] 于君宝, 刘景双, 孙志高, 等. 中国东北区淡水沼泽湿地N₂O和CH₄排放通量及主导因子[J]. *中国科学 D辑: 地球科学*, 2009, **39**(2): 177-187.
Yu J B, Liu J S, Sun Z G, *et al.* The fluxes and controlling factors of N₂O and CH₄ emissions from freshwater marsh in Northeast China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2009, **39**(2): 177-187.
- [38] 颜晓元, 施书莲, 杜丽娟, 等. 水分状况对水田土壤N₂O排放的影响[J]. *土壤学报*, 2000, **37**(4): 482-489.
Yan X Y, Shi S L, Du L J, *et al.* N₂O emission from paddy soil as affected by water regime[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, **37**(4): 482-489.
- [39] Smith K A, Ball T, Conen F, *et al.* Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes[J]. *European Journal of Soil Science*, 2003, **54**(4): 779-791.
- [40] 孙志高, 刘景双, 王金达, 等. 三江平原小叶章湿地开垦前后N₂O通量特征与影响因素分析[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2007, **38**(3): 443-449, 456.
Sun Z G, Liu J S, Wang J D, *et al.* N₂O flux characteristics and its affecting factors before and after reclamation of *Calamagrostis angustifolia* wetland in Sanjiang Plain[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science)*, 2007, **38**(3): 443-449, 456.
- [41] 朱晓艳, 宋长春, 郭跃东, 等. 三江平原泥炭沼泽湿地N₂O排放通量及影响因子[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(12): 2228-2234.
Zhu X Y, Song C C, Guo Y D, *et al.* N₂O emissions and its controlling factors from the peatlands in the Sanjiang Plain[J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(12): 2228-2234.
- [42] Wei S, Norton J M. Microbial control of nitrate concentrations in an agricultural soil treated with dairy waste compost or ammonium fertilizer[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**(10): 1453-1457.
- [43] Guo J P, Zhou C D. Greenhouse gas emissions and mitigation measures in Chinese agroecosystems[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, **142**(2-4): 270-277.
- [44] 朱永官, 王晓辉, 杨小茹, 等. 农田土壤N₂O产生的关键微生物过程及减排措施[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 792-800.
Zhu Y G, Wang X H, Yang X R, *et al.* Key microbial processes in nitrous oxide emissions of agricultural soil and mitigation strategies[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(2): 792-800.
- [45] Wragg N, Van Groenigen J W, Oenema O, *et al.* A novel dual-isotope labelling method for distinguishing between soil sources of N₂O[J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2005, **19**(22): 3298-3306.
- [46] 王新, 姚晓红, 吴逸飞, 等. 氨氧化细菌的筛选鉴定及其最适反应条件研究[J]. *浙江农业学报*, 2015, **27**(6): 1042-1047.
Wang X, Yao X H, Wu Y F, *et al.* Screening and identification of ammonia oxidizing bacteria and optimization of ammonification conditions[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2015, **27**(6): 1042-1047.
- [47] Urakawa H, Tajima Y, Numata Y, *et al.* Low temperature decreases the phylogenetic diversity of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in aquarium biofiltration systems[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2008, **74**(3): 894-900.
- [48] Sliemers A O, Haaijer S C M, Stafsnes M H, *et al.* Competition and coexistence of aerobic ammonium- and nitrite-oxidizing bacteria at low oxygen concentrations[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2005, **68**(6): 808-817.
- [49] O'Sullivan C A, Wakelin S A, Fillery I R P, *et al.* Factors affecting ammonia-oxidising microorganisms and potential nitrification rates in southern Australian agricultural soils[J]. *Soil Research*, 2013, **51**(3): 240-252.
- [50] Wei B, Yu X, Zhang S T, *et al.* Comparison of the community structures of ammonia-oxidizing bacteria and archaea in rhizoplanes of floating aquatic macrophytes[J]. *Microbiological Research*, 2011, **166**(6): 468-474.
- [51] Frame C H, Casciotti K L. Biogeochemical controls and isotopic signatures of nitrous oxide production by a marine ammonia-oxidizing bacterium[J]. *Biogeosciences*, 2010, **7**(9): 2695-2709.

CONTENTS

Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Qing-chun, LI Ju, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(513)
A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by PM _{2.5} Mass Concentration in PRD	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i>	(525)
Light Absorption and Fluorescence Characteristics of Atmospheric Water-soluble Organic Compounds and Humic-like Substances During the Winter Season in Guangzhou	FAN Xing-jun, YU Xu-fang, CAO Tao, <i>et al.</i>	(532)
Source Apportionment and Health Risk Quantification of Heavy Metals in PM _{2.5} in Yangzhou, China	DONG Shi-hao, XIE Yang, HUANGFU Yan-qi, <i>et al.</i>	(540)
Pollution Characteristics and Source Analysis of <i>n</i> -alkanes and Saccharides in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i>	(548)
Pollution Characteristics, Dry Deposition Fluxes, and Sources for Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bosten Lake Watershed	SONG Shi-jie, HUANG Tao, ZHAO Liu-yuan, <i>et al.</i>	(558)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in PM _{2.5} of a Concentrated Broiler Feeding Operation	LIU Fei, XU Xia, TU Bo-wen, <i>et al.</i>	(567)
Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation	HU Yong-bo, XIAO Wei, QIAN Yu-fei, <i>et al.</i>	(573)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Formation in Atmospheric Deposition in Dianchi Lake and Their Contributions to Lake Loading	REN Jia-guo, JIA Hai-bin, JIAO Li-xin, <i>et al.</i>	(582)
Temporal-spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Lake Taihu Based on Geostatistical Analysis	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i>	(590)
Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, XU Hai, <i>et al.</i>	(603)
Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of Yilong Lake, Southwest China	LI Xiao-lin, LIU En-feng, YU Zhen-zhen, <i>et al.</i>	(614)
Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors	DU Jia, WANG Yong-hong, HUANG Qing-hui, <i>et al.</i>	(625)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River	CHEN Lei, LI Lei-fang, ZHI Xiao-sha, <i>et al.</i>	(633)
Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle	HAO Wen-chao, WANG Cong-feng, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i>	(640)
Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments	WANG Yan, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(649)
Influence of Calcium Ion Pre-treatment on Phosphate Adsorption onto Magnetic Zirconium/Iron-modified Bentonite	ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, ZHANG Hong-hua, <i>et al.</i>	(658)
Effect of Nitrogen on Magnesium Modified Biochar Adsorption to Phosphorus	ZHI Meng-meng, WANG Peng-fei, HOU Ze-ying, <i>et al.</i>	(669)
Removal Performance and Mechanism for Treating Phosphorus in Agricultural Wastewater by Three Adsorbents	WU Lu, LIU Feng, LONG Rui, <i>et al.</i>	(677)
Photolysis Mechanism of <i>p</i> -Nitrophenol by Nitrocellulose Membrane in Aqueous Solution	DAI Zhi-feng, ZHAO Tong-qian, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(685)
Preparation of ZnTiO ₃ /TiO ₂ Photocatalyst and Its Mechanism on Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>	(693)
Adsorption and Photocatalytic Removal of Chromium on High-index TiO ₂ Facet	ZHONG De-jian, ZHANG Jian-feng, LI Yao, <i>et al.</i>	(701)
Reduction Cooperated Fenton Oxidation of Zero-valent Iron (ZVI) Immobilized in Alginate Microsphere for Degradation of Acid Red B	ZHANG Huan, LI Shuang-shuang, WEI Jun-fu, <i>et al.</i>	(708)
Mechanism of Removing Iron and Manganese from Drinking Water Using Manganese Ore Sand and Quartz Sand as Filtering Material	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i>	(717)
Preparation of Sulfonated Graphene Oxide Modified Composite Nanofiltration Membrane and Application in Salts Separation	ZHANG Yan-jun, ZHANG Shao-feng, ZHAO Chang-wei, <i>et al.</i>	(724)
Purification Efficiency and Mechanism of Integrated Al Salt Flocculation-ultrafiltration Membrane Process	XUE Wen-jing, LI Wen-jiang, LIU Jian, <i>et al.</i>	(730)
Threshold Flux and Membrane Fouling Analysis of the Hybrid Pre-ozonation and CNTs Membrane Modification Process	WANG Kai-lun, LIU Fang, GUAN Yu-qi, <i>et al.</i>	(738)
Distribution and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in SBR/MBBR Process	LIU Shu-hui, TIAN Wei-jun, ZHOU Jian-ren, <i>et al.</i>	(747)
Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater	LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, <i>et al.</i>	(754)
Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza	DOU Wen-qing, HE Hao, SONG Wen-ping, <i>et al.</i>	(761)
Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer	SONG Tian-wei, SHENG Xiao-lin, WANG Jia-de, <i>et al.</i>	(768)
Characteristics of Ammonia Adsorption and Kinetics by Nitrifying Sludge Immobilized Pellets	YU De-shuang, LÜ Ting-ting, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i>	(774)
Nitrite Accumulation Characteristics of Partial Denitrification in Different Sludge Sources Using Sodium Acetate as Carbon Source	BI Chun-xue, YU De-shuang, DU Shi-ming, <i>et al.</i>	(783)
Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage	DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, <i>et al.</i>	(791)
Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration	ZHAO Zhi-chao, HUANG Jian-ming, LI Jian, <i>et al.</i>	(799)
Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, JIANG Zhi-yun, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(808)
Effect of Influent C/N Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of SNEDPR Systems	DU Ye-qi, YU De-shuang, ZHEN Jian-yuan, <i>et al.</i>	(816)
Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process	LI Tian, YIN Wen, WANG Xin-zhu, <i>et al.</i>	(823)
Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process	LI Dong, GAO Xue-jian, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(829)
Adjusting Temperature and Settling Time to Achieve ANAMMOX Particles Rapid Start-up and Stable Operation	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(837)
Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrosation System	ZHANG Min, WEI Jia-min, HUANG Hui-min, <i>et al.</i>	(845)
Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms	WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, <i>et al.</i>	(853)
Elevational Distribution Characteristics of Soil Bacterial Community and Enzyme Activities in Mount Huangshan	YAO Lan, HU Li-huang, ZHANG Huan-chao, <i>et al.</i>	(859)
Microbial Community Structure Shift during Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil Using High Throughput Sequencing	QI Yan-yun, WU Man-li, ZHU Chang-cheng, <i>et al.</i>	(869)
Effect of Nitrification on N ₂ O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands	YANG Qu, GAO Wei-feng, LIU Feng-qin, <i>et al.</i>	(876)
Effect of Long-term Dairy Manure Amendment on N ₂ O and NO Emissions from Summer Maize-Winter Wheat Cropping Systems	NIE Huang-hua, ZHANG Jia-sheng, HE Zhou-ming, <i>et al.</i>	(885)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, HAO Qing-ju, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i>	(893)
Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety	XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang, XU Hua-qin, <i>et al.</i>	(904)
Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province	LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, <i>et al.</i>	(915)
Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin	DING Meng-kai, HU Xiao-nong, CAO Jian-hua, <i>et al.</i>	(924)
Spatiotemporal Variability and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in a Industrially Developed City	LI Feng, LIU Si-yuan, LI Yan, <i>et al.</i>	(934)
Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils	LIN Hai, JIN Xiao-na, DONG Ying-bo, <i>et al.</i>	(945)
Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain	CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, <i>et al.</i>	(953)
Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li, <i>et al.</i>	(961)
Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil	WANG Ji-fei, TONG Yao-yao, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(970)
Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City	ZHANG Jun-hui, LIN Qing, JIANG Shan, <i>et al.</i>	(978)
Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, <i>et al.</i>	(987)
Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge	YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, <i>et al.</i>	(994)
Performance of Treating Straw and Animal Manure Mixture by an Integrated Process of Thermo-alkali-bi-enzyme Hydrolysis-anaerobic Digestion and Conditions of High Methane Yield	BIAN Ai-qin, YUAN Ye, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i>	(1003)