

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.7

第40卷 第7期

目次

《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇, 冯涛, 蔡泽林 (2961)
基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟	谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 郑新梅, 胡建林, 刘春蕾, 杨峰 (2967)
郑州市 PM _{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析	杨留明, 王申博, 郝祺, 韩士杰, 李晨, 赵庆炎, 燕启社, 张瑞芹 (2977)
能见度与 PM _{2.5} 浓度关系及其分布特征	王继康, 张恒德, 桂海林, 饶晓琴, 张碧辉 (2985)
基于扩散模式反演的橡胶轮胎制造行业 VOCs 排放特征	白红祥, 魏巍, 王雅婷, 任云婷, 臧佳欣, 程水源 (2994)
太原市环境空气中挥发性芳香烃碳同位素组成及来源	李颖慧, 闫雨龙, 李志生, 郝爱胜, 李如梅, 杨帆, 彭林 (3001)
办公楼聚集区空气中 PBDEs 谱分布与污染特征	王琳, 邓雅佳, 廖晓勇, 曹红英, 焦杏春 (3008)
南北水调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征	张柳青, 彭凯, 周蕾, 石玉, 李元鹏, 周永强, 龚志军, 张运林, 杨艳 (3018)
黄土丘陵沟壑区小流域不同水体氢氧同位素特征	张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 赵宾华, 柯浩成, 蒋凯鑫 (3030)
基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析	王从锋, 胡子龙, 杨正健, 丹勇, 赵萍, 郝文超, 聂小芬, 聂睿, 徐刘得, 刘德富 (3039)
李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响	徐进, 黄廷林, 李凯, 杨尚业, 温成成, 林子深, 李衍庆, 刘雪晴 (3049)
水库淹没带土壤有机氯农药分布特征及风险评价	王霞, 张青琢, 赵高峰, 王晓燕 (3058)
银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价	田大年, 党丽慧, 丁润梅, 蔡倩, 张鹏举, 汪岭, 杨慧芳 (3068)
人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比: 以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例	谢国文, 杨平恒, 盛婷, 邓书金, 洪爱花 (3078)
漓江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析	唐金平, 张强, 胡漾, 张宇, 聂保伟 (3089)
三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因子分析	付君珂, 刘黎, 贺新宇, 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 施军琼, 吴忠兴 (3099)
降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响	翁传松, 刘德富, 张佳磊, 龚川, 沈旭舟 (3108)
绿狐尾藻分解及其氮磷释放特征	童雄, 罗沛, 刘锋, 黄敏, 陈哲, 肖润林, 吴金水 (3118)
微藻固定化条件优化及其污水氨氮去除潜力分析	刘祥, 王婧瑶, 吴娟娟, 彭飞, 王凯军 (3126)
钛酸盐纳米管对水中氨氮的吸附特性	张政, 冯长生, 张晓瑞, 郑建奎, 蒋彩云, 李攀杰, 王玉萍 (3135)
基于缺陷重构的类芬顿光催化剂在降解染料废水中的应用	唐清文, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 李海翔 (3146)
N 原子杂化石墨烯高效活化过一硫酸盐降解 RBK5 染料废水	于永波, 黄湾, 董正玉, 吴丽颖, 张倩, 洪俊明 (3154)
Cu ²⁺ 对以 NO ₃ ⁻ 为电子受体反硝化过程的影响	买文可, 彭永臻, 吉建涛 (3162)
CANON 中试反应器启动及性能优化	孙庆花, 吴迪, 周家中, 郑志佳 (3169)
好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响	徐林建, 潘杨, 章豪, 冯鑫, 魏攀龙, 尤星怡 (3179)
有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响	刘小博, 袁林江, 陈希, 薛欢婷 (3186)
不同污泥浓度下缺氧 FNA 对硝化菌活性的影响	吕心涛, 周桐, 田夏迪, 谷鹏超, 杨岸明, 王佳伟, 张树军 (3195)
ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性	张文静, 黄勇, 毕贞, 胡羽婷, 董石语 (3201)
在线 NaClO 反洗对倒置 A ² O-MBR 系统微生物群落的影响	王旭东, 高森, 王莹莹, 杨永哲, 刚家斌, 符国力, 王磊 (3208)
基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价	袁悦, 谭学军, 郑舍予 (3216)
北京市清水与再生水协同利用优化模型	张田媛, 谭倩, 王淑萍 (3223)
N-亚硝胺在不同处理工艺污水处理厂中的分布及其去除	柳王荣, 赵建亮, 杨愿愿, 姚理, 刘有胜, 应光国 (3233)
北京市生活污水中曲马多和芬太尼的赋存	周子雷, 杜鹏, 白雅, 韩胜, 黄红梅, 徐泽琼, 李喜青 (3242)
贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险	杨钊, 李江, 张圣虎, 向福亮, 唐涛涛, 杨娅红 (3249)
紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征	程建华, 唐翔宇, 刘琛 (3257)
四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响	陈景阳, 夏慧, 黄魁, 吴颖 (3263)
热水解污泥厌氧消化过程中肠球菌抗生素抗性基因与毒力基因的转归	李慧莉, 裴媛玫, 李姗, 何芙蓉, 杨月婷, 魏源送, 佟娟 (3270)
鸡粪与中药渣共堆肥对抗生素抗性基因的影响	武晋萍, 陈建文, 刘勇, 张红, 李君剑 (3276)
宁武亚高山湖泊细菌群落的时空格局及驱动机制	王雪, 刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明, 赵鹏宇, 暴家兵 (3285)
石家庄市春季景观水体 nirS 型反硝化细菌群落特征分析	张艺冉, 李再兴, 孙悦, 霍然, 孟文茹, 王凌霄, 申邵恒, 杨子程, 周石磊 (3295)
磷差异性调控水稻根际 nirK/nirS 型反硝化菌组成与丰度	湛钰, 高丹丹, 盛荣, 魏文学, 秦红灵, 张文钊, 侯海军, 汤亚芳 (3304)
会仙岩溶湿地、稻田与旱地土壤细菌群落结构特征比较	贾远航, 靳振江, 袁武, 程跃扬, 邱江梅, 梁锦桃, 潘复静, 刘德深 (3313)
湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析	蒋凯, 邓潇, 周航, 龙坚, 李欣阳, 董霞, 王树兵, 刘文辉, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (3324)
改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响	李义纯, 王艳红, 唐明灯, 巫彬芳, 李林峰, 艾绍英, 凌志祥 (3331)
重金属固定植物促生细菌的筛选及其阻控小麦富集重金属效应	韩辉, 王晓宇, 蔡红, 姚伦广, 蔡倩迪, 王逸雪, 陈兆进 (3339)
不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异	彭秋, 李桃, 徐卫红, 焦璐琛, 邓继宝 (3347)
添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N ₂ O 排放影响	孙正, 苏荣琳, 徐鹏, 吴宏涛, 胡金丽, 赵劲松, 胡荣桂 (3355)
渭北旱原土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	刘杰, 马艳婷, 王宪玲, Sompouviset Thongsouk, 李利敏, 秦亚旭, 赵志远, 郑伟, 翟丙年 (3361)
不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征	鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 刘明丽, 王静, 李爽, 姚宏, 孙绍斌 (3369)
西湖景区土壤中邻苯二甲酸酯污染水平、来源分析和空间分布特征	廖健, 邓超, 陈怡, 周文钊, 林春绵, 张辉 (3378)
生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响	李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 张久成, 陈树兰, 王慧玲, 张妍, 负方悦, 杨林, 董胜虎 (3388)
《环境科学》征订启事 (3194)	《环境科学》征稿简则 (3222)
信息 (3256, 3284, 3323)	

添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N_2O 排放影响

孙正¹, 苏荣琳¹, 徐鹏¹, 吴宏涛¹, 胡金丽¹, 赵劲松¹, 胡荣桂^{1,2,*}

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 华中农业大学环境生态中心, 武汉 430070)

摘要: 我国南方红壤区域普遍属于缺磷土壤, 种植作物需要施用较多的磷肥, 但添加磷对水稻-油菜轮作土壤中 N_2O 的排放影响并不明确. 以潜江、咸宁两处水稻-油菜轮作模式下的土壤为研究对象, 添加不同浓度的磷(0、15 和 30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和不同浓度的氮(0 和 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 进行室内培养实验, 探究添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N_2O 排放的影响. 结果表明, 添加磷对土壤中 N_2O 的排放有较为显著的影响, 但影响的方式有所不同: 在土壤本身氮比较少少的情况下, 添加磷会促进土壤中微生物对氮的固定, 降低 N_2O 的排放; 在土壤中有充足的氮情况下, 添加较少的磷会促进土壤中硝化微生物的活动, 促进 N_2O 的排放, 但添加较多的磷同样会促进土壤中微生物对氮的固定, 相比于添加较少的磷处理会抑制 N_2O 的排放; 在土壤本身磷的含量较为充足的情况下, 无论土壤中的氮源是否充足, 添加磷仅对土壤中 N_2O 的排放起抑制作用.

关键词: 磷; 水稻-油菜轮作土壤; 氧化亚氮(N_2O); 硝化作用; 硝化率

中图分类号: X144; X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)07-3355-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201811131

Effect of Phosphorus Addition on N_2O Emissions from Rice-Rapeseed Rotation Soils

SUN Zheng¹, SU Rong-lin¹, XU Peng¹, WU Hong-tao¹, HU Jin-li¹, ZHAO Jin-song¹, HU Rong-gui^{1,2,*}

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Ecological Environment Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: The red soils in southern China are generally classified as phosphorus-deficient, and therefore planting crops in these regions usually requires high applications of phosphate fertilizer. However, the effect of phosphorus addition on N_2O emissions in rice-rapeseed rotation soils is not clear. We carried out an incubation experiment with the rice-rapeseed rotation soil from Qianjiang and Xianning to explore the effect of different concentrations of phosphorus (0, 15, and 30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) and different concentrations of nitrogen (0 and 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) on N_2O emission. Studies have shown that the addition of phosphorus has a significant effect on soil N_2O emissions, but the pathways of impact are varied: in the case of low nitrogen soil, the addition of phosphorus promotes the fixation of nitrogen in the soil by microorganisms and thus reduces N_2O emissions; in case of sufficient nitrogen content in soil, adding less phosphorus promotes the activity of nitrifiers and thereby promotes the emission of N_2O , while adding more phosphorus also promotes fixation by microorganisms in the soil; when there is a high content of available phosphorus in the soil, whether the nitrogen is sufficient or not, the addition of phosphorus will inhibit the emission of N_2O .

Key words: phosphorus; rice-rapeseed rotation soil; N_2O ; nitrification; nitrification rate

氧化亚氮(N_2O)是最重要的温室气体之一, 其增温潜势在一百年时间尺度约为二氧化碳(CO_2)的298倍^[1]. 土壤排放的 N_2O 主要由微生物参与的硝化过程和反硝化过程产生, 土壤中微生物的硝化作用和反硝化作用产生的 N_2O 约占全球 N_2O 排放总量的60%^[2, 3].

添加磷可能会减少土壤 N_2O 的排放^[4]. 有研究指出, 土壤中磷的有效性较低会限制微生物的生长代谢过程^[5], 并使硝化反硝化过程受到抑制^[6]. 这可能是由于添加磷促进了植物对于氮的吸收而减少了 N_2O 产生的底物^[7]. 同时, 在土壤中添加磷会增加土壤中的微生物的多样性^[8], 增加了土壤中氮的固定从而减少了 N_2O 的产生^[9, 10]. 在缺乏磷的土壤添加氮可以比缺乏氮的土壤添加氮排放更多的 N_2O , 这表明磷在控制土壤 N_2O 排放中起着重要作用^[11]. 在缺乏氮的森林土壤中添加磷[10

$\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$], 两年内对 N_2O 的排放没有显著影响. 在添加磷的时候同时添加氮[50 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$], N_2O 的排放相对于只添加磷的处理更低^[12]. 在中国南方的森林土壤中, 单独添加磷[100 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$]对 N_2O 的排放没有显著影响, 同时添加磷[100 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$]和氮[100 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$]时, N_2O 在旱季的排放没有显著增加^[13].

添加磷也有可能增加土壤 N_2O 的排放. 有研究指出, 添加氮到缺磷的森林土壤中, N_2O 的排放量

收稿日期: 2018-11-18; 修订日期: 2019-02-19

基金项目: 国家重点研究发展计划项目(2017YFD0800102); 中央大学基础研究基金项目(2662016PY098); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41750110485); 中国博士后科学基金项目(2017M622478)

作者简介: 孙正(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为农田温室气体, E-mail: sunzheng@webmail.hzau.edu.cn

* 通信作者, E-mail: rghu@mail.hzau.edu.cn

增加了 10 ~ 100 倍, 这可能是由于磷的缺乏限制了微生物对氮的固定, 因而更多的氮成为 N_2O 排放的底物, 从而促进了 N_2O 的排放^[14]. 与此同时, 磷的添加也促进了硝化作用和反硝化作用, 从而增加土壤 N_2O 的排放^[15]. 一般认为添加磷直接促进了微生物硝化和反硝化活动以及土壤中微生物的生物量, 因而产生了更多的 N_2O ^[16, 17].

综上所述, 添加磷对于土壤 N_2O 的排放影响机制尚不明确. 为此, 本研究选取了我国南方两处磷含量不同的典型水稻-油菜轮作的土壤, 通过进行室内培养实验, 设置添加不同梯度的磷浓度, 分析

不同处理中释放的 N_2O 量来评价添加磷对土壤中 N_2O 排放的影响, 以期为氮磷肥料的科学施用提供一定的依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为水稻土, 分别采自湖北省咸宁市贺胜桥镇和湖北省潜江市. 两样点的轮作方式一直是水稻-油菜轮作. 其土壤的基本理化性质见表 1. 采样时分别采集表层 0 ~ 20 cm 土壤, 混匀、风干, 除去植物根、石砾等杂物后磨细, 过 10 目筛备用.

表 1 实验土样基本理化性质¹⁾

Table 1 Geochemical properties of the two paddy soils

样地	容重 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	pH	总有机碳 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	总氮 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效磷 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	质地		
						粉粒/%	黏粒/%	沙粒/%
潜江	1.13 (0.05)	7.07 (0.01)	19.37 (0.09)	2.02 (0.06)	20.06 (0.25)	57 (0.93)	11 (0.98)	32 (1.03)
咸宁	1.23 (0.06)	5.40 (0.01)	11.88 (0.06)	1.30 (0.04)	27.66 (0.33)	61 (0.88)	26 (0.56)	13 (0.74)

1) 括号中为 3 个重复的标准差

1.2 实验设计

本实验两土壤样中均设置 3 个不同的磷素施用水平, 分别为不加磷、加低磷 [15 mg 的 $\text{P}(\text{NaH}_2\text{PO}_4)$ 混入 1 kg 干土] 和加高磷 [30 mg 的 $\text{P}(\text{NaH}_2\text{PO}_4)$ 混入 1 kg 干土]; 每种磷素水平下混

入 2 个氮素水平, 分别为不加氮和加氮 [100 mg 的 $\text{N}(\text{NH}_4\text{Cl})$ 混入 1 kg 干土]. 以上添加磷和氮的水平是湖北省水稻-油菜轮作模式下常见的施肥量^[18], 共计 12 个处理(见表 2).

将相当于干土质量的 20.00 g 的土样置于 150

表 2 实验各处理代号设置

Table 2 Codes of the experiment treatments

项目	潜江(Q)						咸宁(X)					
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	X1	X2	X3	X4	X5	X6
N 添加量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0	100	0	0	100	100	0	100	0	0	100	100
P 添加量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0	0	15	30	15	30	0	0	15	30	15	30

mL 血清瓶中, 两种土样分别准备 108 份. 用去离子水调节土壤水分至土壤孔隙含水量(WFPS)的 40%, 将血清瓶置于 25℃ 恒温暗室培养箱中预培养 2 周. 预培养结束后, 分别添加氮、磷, 同时调节水分至 60% WFPS. 培养过程中, 用保鲜膜封住血清瓶瓶口, 并用针扎几个小孔, 便于交换空气, 同时减少水分蒸发.

1.3 样品采样及测定

在处理的 1、2、4、7、10、14、17、21、24 和 28d 采集气体. 采样时, 向瓶内吹入数分钟高纯空气以驱除瓶内气体, 随后迅速用硅胶塞塞住瓶口, 并用 704 胶密封瓶口和塞子之间的空隙. 在密封血清瓶后 0 和 60 min 分别用 25 mL 注射器通过硅胶塞的中间取样口采集瓶中气体, 直接注入气相色谱仪(Agilent 7890A, 美国)测定气体样品中 N_2O 的

浓度.

采集后的气体样品用改进的气相色谱仪(Agilent 7890A)分析^[19], N_2O 浓度用电子捕获检测器(ECD)测定, 检测器温度为 300℃, 色谱柱为 80/100 目 PorapakQ 填充柱, 柱箱温度为 55℃, 用高纯 N_2 作为载气, 流速为 $25\text{ cm}^3\cdot\text{min}^{-1}$. 通过标准气体和待测气体的峰面积比值来计算出样品的浓度, 标准气体由国家标准物质中心提供.

在需要采集土壤样品测定的日期, 收集完气体样品后, 称取其中的土壤样品用于测定其中的铵态氮和硝态氮. 方法采用 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl 浸提土壤 1 h, 过滤后的滤液用靛酚蓝比色法(625 nm)和紫外双波长(220 nm 和 275 nm)分光光度计法分别测定土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量^[20, 21]. 每次土壤样品测定消耗 36 瓶培养样品(每个处理测定 3 份重复).

土壤有效磷先用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 浸提土壤(液土比 20:1), 过滤后的滤液用钼蓝比色法测定^[22]. 土壤全碳测定: 将烘干土样过 100 目筛, 用锡纸包裹, 采用德国 Elementer Vario TOC 仪固体模块测定^[19]. pH 采用电位法测定, 土壤水土质量比 2.5:1.

1.4 数据处理与分析

N₂O 排放通量的计算公式如下:

$$F = \rho \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{273.15}{273.15 + T} \times \frac{V}{m}$$

式中, F 为 N₂O 排放通量, $\mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$, ρ 是标准状态下 N₂O 的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $\Delta c / \Delta t$ 是血清瓶内 N₂O 浓度变化率, $10^{-9} \cdot \text{h}^{-1}$; V 是血清瓶顶部空间体积, m^3 ; T 为环境气温, $^{\circ}\text{C}$; m 是培养土烘干质量, kg .

土壤 N₂O 累积排放量的计算公式如下:

$$M = \sum \frac{(F_{i+1} + F_i)}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \times 24$$

式中, M 为 N₂O 累积排放量, $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; F 为土壤 N₂O 排放通量, $\mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$; t 为采样时间, d ; i 为采样次数; $t_{i+1} - t_i$ 为 2 次采样的间隔天数, d .

硝化率的计算公式为:

$$\text{硝化率} = \frac{[\text{NO}_3^- - \text{N}]}{[\text{NH}_4^+ - \text{N}] + [\text{NO}_3^- - \text{N}]} \times 100\%$$

用 Microsoft Excel 2016 进行基础数据处理, 利用 SPSS 24.0 进行单因素方差分析 (One-way ANOVA), 双因素方差分析, Duncan 多重比较检验法分析处理间的差异, 差异性水平为 0.05. 绘图使用 Graphpad prism 7.0 完成.

2 结果与分析

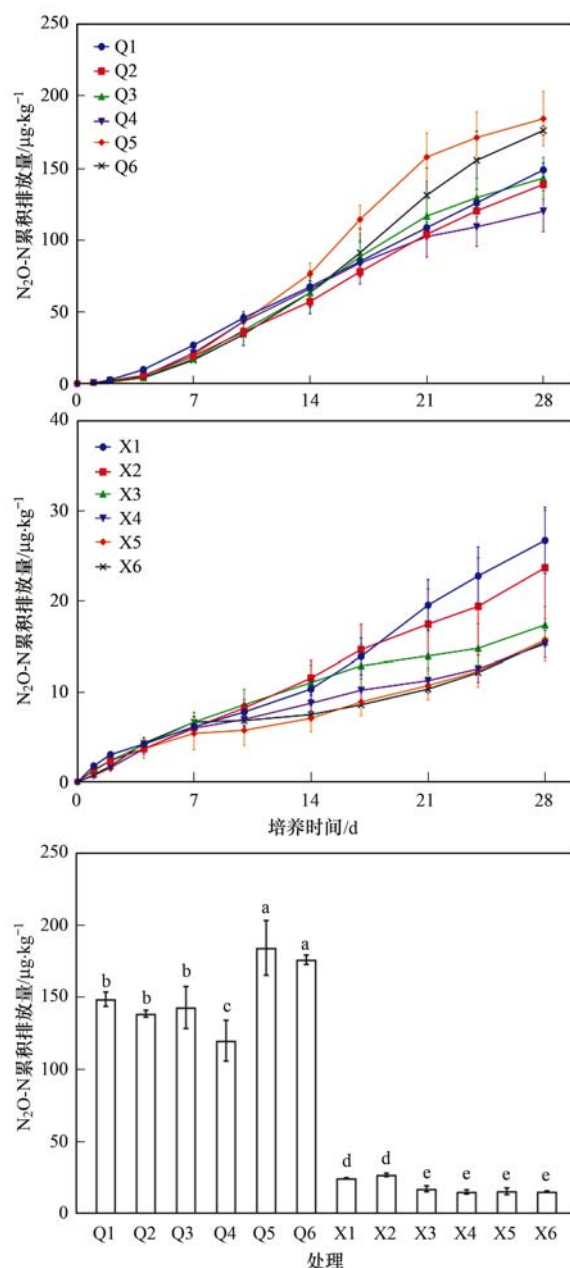
2.1 添加磷对土壤 N₂O 排放的影响

从图 1 可以看出, 潜江土壤的各处理中 N₂O 的排放量显著高于咸宁土壤各处理的排放量 ($P < 0.001$). 潜江土壤中各处理间 N₂O 的排放量均高于 $100 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 咸宁土壤中各处理间 N₂O 的累积排放量的差异较小, 但均低于 $30 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

在潜江土壤的各个处理中, Q5 处理中的 N₂O 排放量最大, 达到 $(184.18 \pm 18.92) \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与对照处理 Q1 的 $(148.68 \pm 4.98) \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 相比增加了 23.88%. Q6 处理中的 N₂O 排放量也达到 $(175.95 \pm 3.31) \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 同样显著高于对照的 Q1 处理 ($P < 0.05$), 但稍低于排放量最大的 Q5 处理, 相差不显著. 与此同时, Q4 处理的排放量为 $(119.99 \pm 14.13) \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著低于对照处理 Q1 ($P < 0.05$). Q2 和 Q3 处理的排放量分别为 $(138.62 \pm 2.34) \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(142.95 \pm 14.50) \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 稍低于对照

处理 Q1 但差异并不显著.

在咸宁土壤的各个处理中, 对照处理 X1 的排放量最大, 达到 $(27.03 \pm 1.13) \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, X4 的排放量最小, 仅为 $(15.27 \pm 1.49) \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$. X3、X4、X5 和 X6 处理的排放量较为接近, 显著低于 X1 和 X2 的排放量 ($P < 0.05$).



不同小写字母表示不同处理间差异达到显著水平 ($P < 0.05$), 下同

图 1 两种土壤中添加处理后不同处理 N₂O 的累积排放

Fig. 1 Fluxes and cumulative emissions of N₂O in different treatments after the additions of N and P in two soils

2.2 添加磷对土壤矿质氮和硝化率的影响

在两种土壤的培养过程中, 添加磷对土壤中的铵态氮的含量变化影响都不显著. 在不添加氮的处理中, 土壤中的铵态氮主要来源于土壤本身有机氮

的矿化作用,在培养进行的过程中缓慢下降.在添加氮的处理中,潜江的土样在前期(0~7 d) $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量下降较快,之后下降的速度较慢.咸宁的土样在整个培养过程中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的含量变化都不大(图2).

添加磷对两种土壤中硝态氮含量都是逐渐增加的,但潜江土壤中的硝态氮增加较快.在两种土壤

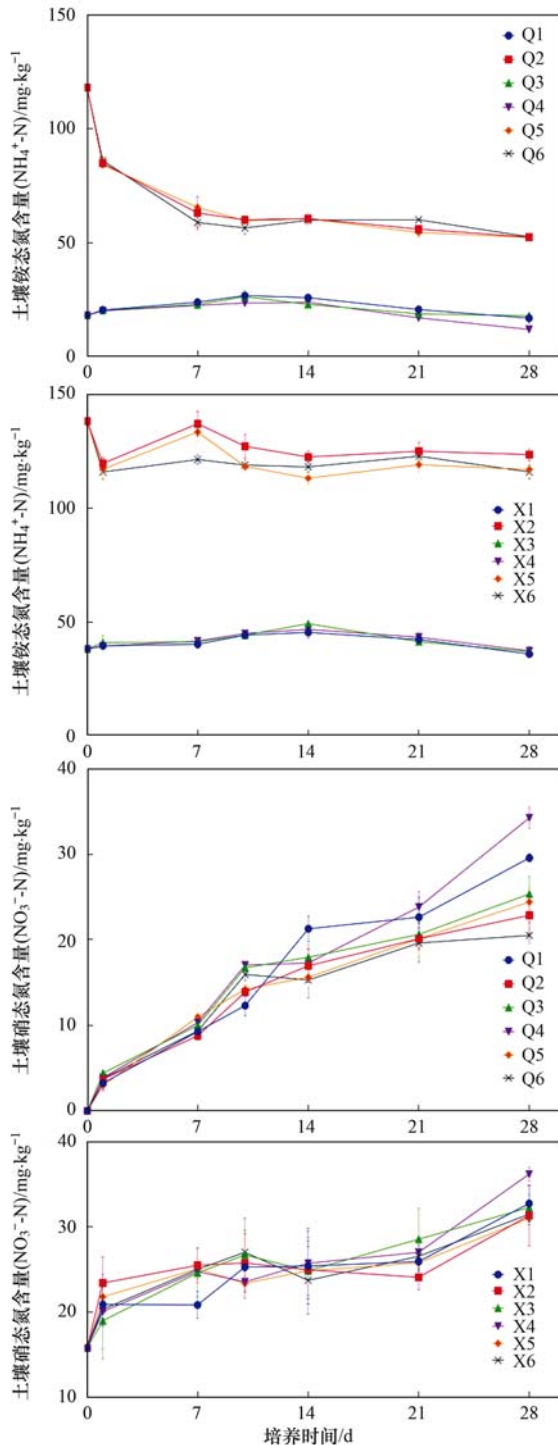


图2 两种土壤中添加处理后不同处理土壤的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的动态变化

Fig. 2 Dynamics of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentrations in different treatments after the additions of N and P in two soils

中,添加磷的各处理和不添加磷的各处理中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的含量增加趋势相近, Q4 处理在培养结束时 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 是各处理中最高的,达到 $(34.30 \pm 1.23) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,显著的高于其他处理.而咸宁的土样前3周的培养中,各处理的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的含量稍有增长,在培养结束时, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量最高的是 X4 的处理,达到 $(36.18 \pm 0.81) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

在两处土壤中,不添加氮的处理硝化率都显著地高于加氮的处理,添加磷对硝化率的影响不显著(图3).在潜江的土壤中,不加氮的3个处理 Q1、Q3 和 Q4 的硝化率显著高于3个添加氮的处理 ($P < 0.05$),这3个处理间虽然存在显著差异但数值相差不大. Q4 的处理在培养结束时的硝化率是各处理中最高的,达到 $(74.3\% \pm 1.6\%)$.咸宁土壤中,添加氮的3个处理 X1、X3 和 X4 之间无显著差异,不添加氮的3个处理 X2、X5 和 X6 之间也没有显著性差异,3个不添加氮的处理硝化率显著高于添加氮的处理 ($P < 0.05$).

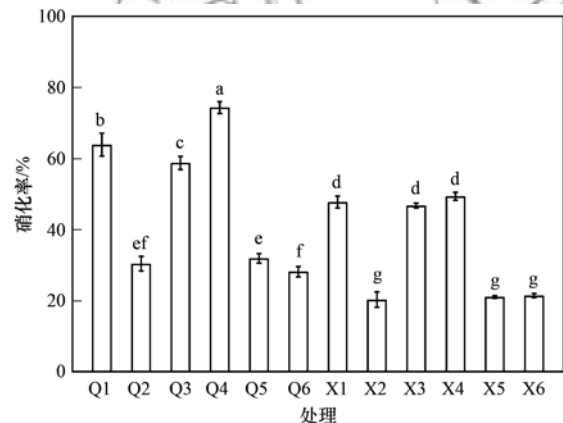


图3 两种土壤中添加处理后不同处理土壤硝化率

Fig. 3 Nitrification rates for different treatments after the additions of N and P in two soils

2.3 土壤 N_2O 排放与影响因子的关系

由表3可以得出,在两种土壤中,添加磷的处理对于土壤中 N_2O 的排放的影响都是极显著的.在潜江的土壤中,单独添加氮、单独添加磷和同时添加氮磷的交互作用对于 N_2O 的排放的影响显著.

3 讨论

3.1 土壤性质对 N_2O 排放的影响

在60%WFPS的含水量下,土壤中的水分较低,通气性较好,土壤中 N_2O 的产生主要以硝化作用为主^[23].两种土壤的基本性质有较大的差距,潜江土壤中的pH和有机质含量显著高于咸宁土壤.较高的有机质和较高的pH有助于土壤碳和氮的矿

表3 各因素及其交互作用对气体排放影响的显著性分析

Table 3 Statistical analysis for the effects of N, P, and their interactions with gas emissions

测定指标	潜江						咸宁					
	N		P		N × P		N		P		N × P	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
N ₂ O	28.136	<0.001	4.882	0.028	13.355	0.001	0.898	0.362	15.687	<0.001	0.359	0.705

化^[24, 25]，对土壤中的硝化作用有促进作用。有研究表明，pH 在 6.5 ~ 8.3 之间时，硝化作用的强度比低 pH 时要高得多^[26]，土壤中的硝化速率与 pH 呈显著的正相关^[27]。在较低的 pH 值下，土壤中的 NH₄⁺ 较难转化为硝化作用的底物 NH₃^[28]。因而，咸宁土壤的硝化作用较弱而潜江土壤较强。潜江的土壤各处理中 NO₃⁻ 的含量的增长速度比咸宁的土壤快得多，这和潜江的土壤本身有较高的 pH 值和有机质含量相关^[29, 30]。因而，潜江土壤中各处理的 N₂O 排放量都显著地大于咸宁土壤中的各处理。

值得注意的是，在潜江添加了氮的处理中，初期铵态氮的含量迅速降低，但此时硝态氮的含量却没有迅速上升。土壤中铵态氮降低的原因一般有两种，一种是发生了硝化作用，另一种是生物固定^[31]。由于本实验中，初期潜江土壤加氮处理中硝态氮增加的速率远低于铵态氮减少的速率，因而此处铵态氮的下降主要是由于生物固定引起的，因而在这个时期并没有产生大量的 N₂O。

3.2 添加磷对N₂O排放的影响

磷的添加对土壤中的硝化作用过程有显著的影响，在添加 30 mg·kg⁻¹ 的磷水平下，两种土壤中产生的 NO₃⁻ 的含量都是最高的，而产生 N₂O 的含量却都是最低的，说明添加较多的磷可以降低 N₂O 的产生。而在添加 15 mg·kg⁻¹ 的磷水平下，两处土壤中的反应有所不同。潜江土壤中和对照相比没有显著差异，而咸宁土壤中与对照相比显著降低了 N₂O 的排放。这可能是由于潜江土壤中初始的有效磷的含量相比于咸宁较低，添加较低浓度的磷时，没有起到抑制 N₂O 排放的作用。添加了氮的情况下，再添加 15 mg·kg⁻¹ 和 30 mg·kg⁻¹ 的磷水平下，潜江土壤中排放的 N₂O 都显著高于不添加磷的处理，说明在氮充足的情况下添加磷可以促进 N₂O 的排放。在对照和只添加磷的处理中，土壤中本身的 NH₄⁺ 较少，添加磷增强了微生物对于无机氮的固定作用^[11]，使得土壤中能够利用的 NH₄⁺ 减少，因而只添加磷的处理相对于对照来说，降低了 N₂O 的排放。根据表 3 的分析表明，在潜江的土壤中，氮和磷以及氮磷的交互作用对 N₂O 的排放存在显著的影响 (*P* < 0.05)，可能是本身有效磷和 NH₄⁺ 的含量都较低，

因而添加氮和磷后对硝化作用有显著地促进作用。而在咸宁土壤中的现象与潜江土壤中不同，添加磷对 N₂O 的排放有显著的抑制作用 (*P* < 0.001)，添加 15 mg·kg⁻¹ 和 30 mg·kg⁻¹ 的磷水平后，排放的 N₂O 都显著低于不添加磷的处理，这可能由于本身有效磷的含量较高，添加磷对土壤 N₂O 起到显著地抑制作用。

4 结论

添加磷对土壤中 N₂O 的排放的影响十分复杂，跟添加磷的含量有较大的关系。在磷的有效性不高或含量不足条件下，添加磷可以促进硝化微生物的活性，会显著促进土壤 N₂O 的排放。但在磷的含量充足的情况下，添加磷通过促进土壤中微生物对于无机氮的固定作用，减少硝化作用的底物，抑制土壤中 N₂O 的排放。具体土壤中 N₂O 排放与氮磷比例的关系还有待进一步研究。

参考文献：

[1] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[2] Opdyke M R, Ostrom N E, Ostrom P H. Evidence for the predominance of denitrification as a source of N₂O in temperate agricultural soils based on isotopologue measurements[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2009, 23(4): GB4018.

[3] Hu H W, Chen D L, He J Z. Microbial regulation of terrestrial nitrous oxide formation: understanding the biological pathways for prediction of emission rates [J]. FEMS Microbiology Review, 2015, 39(5): 729-749.

[4] Zhang W, Zhu X, Luo Y, et al. Responses of nitrous oxide emissions to nitrogen and phosphorus additions in two tropical plantations with N-fixing vs. non-N-fixing tree species [J]. Biogeosciences, 2014, 11(18): 4941-4951.

[5] Song Y Y, Song C C, Yang G S, et al. Changes in labile organic carbon fractions and soil enzyme activities after marshland reclamation and restoration in the Sanjiang Plain in Northeast China[J]. Environmental Management, 2012, 50(3): 418-426.

[6] He M Z, Dijkstra F A. Phosphorus addition enhances loss of nitrogen in a phosphorus-poor soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 82: 99-106.

[7] Mori T, Ohta S, Ishizuka S, et al. Soil greenhouse gas fluxes and C stocks as affected by phosphorus addition in a newly established *Acacia mangium* plantation in Indonesia[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 310: 643-651.

- [8] 施瑶, 王忠强, 张心昱, 等. 氮磷添加对内蒙古温带典型草原土壤微生物群落结构的影响[J]. 生态学报, 2014, **34**(17): 4943-4949.
Shi Y, Wang Z Q, Zhang X Y, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil microbial community composition in temperate typical grassland in Inner Mongolia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(17): 4943-4949.
- [9] Chen H, Gurmessa G A, Zhang W, *et al.* Nitrogen saturation in humid tropical forests after 6 years of nitrogen and phosphorus addition: hypothesis testing[J]. *Functional Ecology*, 2016, **30**(2): 305-313.
- [10] 李霞, 田光明, 朱军, 等. 不同磷肥用量对水稻土有机碳矿化和细菌群落多样性的影响[J]. 土壤学报, 2014, **51**(2): 360-372.
Li X, Tian G M, Zhu J, *et al.* Effects of rate of phosphorus fertilizer on organic carbon mineralization and bacterial community diversity in paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, **51**(2): 360-372.
- [11] Hall S J, Matson P A. Nitrogen oxide emissions after nitrogen additions in tropical forests[J]. *Nature*, 1999, **400**(6740): 152-155.
- [12] Martinson G O, Corre M D, Veldkamp E. Responses of nitrous oxide fluxes and soil nitrogen cycling to nutrient additions in montane forests along an elevation gradient in southern Ecuador[J]. *Biogeochemistry*, 2013, **112**(1-3): 625-636.
- [13] Wang F M, Li J, Wang X L, *et al.* Nitrogen and phosphorus addition impact soil N₂O emission in a secondary tropical forest of South China[J]. *Scientific Reports*, 2014, **4**: 8.
- [14] Camenzind T, Hättenschwiler S, Treseder K K, *et al.* Nutrient limitation of soil microbial processes in tropical forests[J]. *Ecological Monographs*, 2018, **88**(1): 4-21.
- [15] Mori T, Ohta S, Ishizuka S, *et al.* Effects of phosphorus addition with and without ammonium, nitrate, or glucose on N₂O and NO emissions from soil sampled under *Acacia mangium* plantation and incubated at 100% of the water-filled pore space[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, **49**(1): 13-21.
- [16] Mori T, Yokoyama D, Kitayama K. Contrasting effects of exogenous phosphorus application on N₂O emissions from two tropical forest soils with contrasting phosphorus availability[J]. *Springerplus*, 2016, **5**(1): 1237.
- [17] Mori T, Ohta S, Ishizuka S, *et al.* Phosphorus application reduces N₂O emissions from tropical leguminous plantation soil when phosphorus uptake is occurring[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, **50**(1): 45-51.
- [18] 卜容燕, 任涛, 鲁剑巍, 等. 水稻-油菜轮作条件下磷肥效应研究[J]. 中国农业科学, 2014, **47**(6): 1227-1234.
Bu R Y, Ren T, Lu J W, *et al.* Analysis of P fertilizer efficiency under rice-rapeseed rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, **47**(6): 1227-1234.
- [19] Wang M L, Hu R G, Zhao J S, *et al.* Iron oxidation affects nitrous oxide emissions via donating electrons to denitrification in paddy soils[J]. *Geoderma*, 2016, **271**: 173-180.
- [20] Moorcroft M J, Davis J, Compton R G. Detection and determination of nitrate and nitrite: a review[J]. *Talanta*, 2001, **54**(5): 785-803.
- [21] Scheiner D. Determination of ammonia and kjeldahl nitrogen by indophenol method[J]. *Water Research*, 1976, **10**(1): 31-36.
- [22] Bray R H, Kurtz L T. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils[J]. *Soil Science*, 1945, **59**(1): 39-45.
- [23] 刘若萱, 贺纪正, 张丽梅. 稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(11): 4275-4283.
Liu R X, He J Z, Zhang L M. Response of nitrification/denitrification and their associated microbes to soil moisture change in paddy soil[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4275-4283.
- [24] 鲁顺保, 周小奇, 芮亦超, 等. 森林类型对土壤有机质、微生物生物量及酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, **22**(10): 2567-2573.
Lu S B, Zhou X Q, Rui Y C, *et al.* Effects of forest type on soil organic matter, microbial biomass, and enzyme activities[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22**(10): 2567-2573.
- [25] Baggs E M, Smales C L, Bateman E J. Changing pH shifts the microbial sources as well as the magnitude of N₂O emission from soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, **46**(8): 793-805.
- [26] Rangaswamy V, Venkateswarlu K. Ammonification and nitrification in soils, and nitrogen fixation by *Azospirillum* sp. as influenced by cypermethrin and fenvalerate[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 1993, **45**(3-4): 311-317.
- [27] 蔡祖聪, 赵维. 土地利用方式对湿润亚热带土壤硝化作用的影响[J]. 土壤学报, 2009, **46**(5): 795-801.
Cai Z C, Zhao W. Effects of land use types on nitrification in humid subtropical soils of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, **46**(5): 795-801.
- [28] Suzuki I, Dular U, Kwok S C. Ammonia or ammonium ion as substrate for oxidation by *Nitrosomonas europaea* cells and extracts[J]. *Journal of Bacteriology*, 1974, **120**(1): 556-558.
- [29] Nelissen V, Rütting T, Huygens D, *et al.* Maize biochars accelerate short-term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **55**: 20-27.
- [30] DeLuca T H, MacKenzie M D, Gundale M J, *et al.* Wildfire-produced charcoal directly influences nitrogen cycling in ponderosa pine forests[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, **70**(2): 448-453.
- [31] 张亚丽, 张娟, 沈其荣, 等. 秸秆生物有机肥的施用对土壤供氮能力的影响[J]. 应用生态学报, 2002, **13**(12): 1575-1578.
Zhang Y L, Zhang J, Shen Q R, *et al.* Effect of combined application of bioorganic manure and inorganic nitrogen fertilizer on soil nitrogen supplying characteristics[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(12): 1575-1578.

CONTENTS

Health Benefit Evaluation for Air Pollution Prevention and Control Action Plan in China	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (2961)
Scenario Simulation Study Constrained by the Ambient Air Quality Standards in Nanjing	XIE Fang-jian, SHI Zhi-hao, LI Jing-yi, <i>et al.</i> (2967)
Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Zhengzhou	YANG Liu-ming, WANG Shen-bo, HAO Qi, <i>et al.</i> (2977)
Relationship Between Atmospheric Visibility and PM _{2.5} Concentrations and Distributions	WANG Ji-kang, ZHANG Heng-de, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (2985)
Characteristics of VOCs Emitted from the Rubber Tire Manufacturing Industry Based on the Inverse-Dispersion Calculation Method	BAI Hong-xiang, WEI Wei, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (2994)
Stable Carbon Isotope Compositions and Source Apportionments of Volatile Aromatic Compounds in the Urban Atmosphere of Taiyuan, China	LI Ying-hui, YAN Yu-long, LI Zhi-sheng, <i>et al.</i> (3001)
Spectral Distribution and Pollution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Air of an Office Building Clustered Area	WANG Lin, DENG Ya-jia, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3008)
Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter in Key Lakes in the Middle Reaches of the East Route of the South-North Water Diversion Project	ZHANG Liu-qing, PENG Kai, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (3018)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Different Water Bodies in Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau	ZHANG He-hui-zi, YU Kun-xia, LI Zhan-bin, <i>et al.</i> (3030)
Analysis of Total Organic Carbon Source Differences Between New and Old Cascade Reservoirs using Carbon and Nitrogen Isotopes	WANG Cong-feng, HU Zi-long, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (3039)
Pollution Sources and the Stratification Effects on Water Quality in Lijiahe Reservoir	XU Jin, HUANG Ting-lin, LI Kai, <i>et al.</i> (3049)
Distribution and Potential Risk of Organochlorine Pesticides in the Soil of a Submerged Area Around Miyun Reservoir	WANG Xia, ZHANG Qing-zhuo, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3058)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Waters of the Yinchuan Wetlands	TIAN Da-nian, DANG Li-hui, DING Run-mei, <i>et al.</i> (3068)
Comparison of the Geochemical Characteristics of Karst Springs of a Vertically Zoned Climate Region under Human Activity: A Case of Shuifang Spring and Bitan Spring in the Jinfo Mountain Area, Chongqing	XIE Guo-wen, YANG Ping-heng, SHENG Ting, <i>et al.</i> (3078)
Groundwater Chemical Characteristics and Analysis of Their Controlling Factors in an Alluvial Fan of Jianjiang River	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (3089)
Dynamics of Epilithic Algae Communities and Their Relationship with Environmental Factors During Storage and Non-storage Periods in the Three Gorges Reservoir	FU Jun-ke, LIU Li, HE Xin-yu, <i>et al.</i> (3099)
Influence of Rainfall on the <i>in situ</i> Growth of Dominant Algae Species in Xiangxi River	WENG Chuan-song, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (3108)
Decomposition of <i>Myriophyllum aquaticum</i> and the Associated Release of Nitrogen and Phosphorus	TONG Xiong, LUO Pei, LIU Feng, <i>et al.</i> (3118)
Optimization of the Parameters for Microalgae Immobilization and Analysis of Its Recovery Potential for Ammonia Nitrogen in Wastewater	LIU Xiang, WANG Jing-yao, WU Juan-juan, <i>et al.</i> (3126)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Titanate Nanotubes	ZHANG Zheng, FENG Chang-sheng, ZHANG Xiao-nui, <i>et al.</i> (3135)
Application of Fenton-like Photocatalysts Based on Defect Reconstruction in Degradation of Dye Wastewater	TANG Qing-wen, AN Xiao-qiang, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (3146)
Degradation of RBK5 with Peroxymonosulfate Efficiently Activated by N-Doped Graphene	YU Yong-bo, HUANG Wan, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (3154)
Effect of Cu ²⁺ on Denitrification Using NO ₂ ⁻ as an Electron Acceptor	MAI Wen-ke, PENG Yong-zhen, JI Jian-tao (3162)
Start-up and Performance Optimization of a CANON Pilot Reactor	SUN Qing-hua, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (3169)
Effects of Aerobic Carbon Sources on Biofilm with Simultaneous Phosphate Removal and Enrichment	XU Lin-jian, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Organic Characteristics on Sludge Settability in an AAO System	LIU Xiao-bo, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (3186)
Effect of Free Nitrous Acid on the Activity of Nitrifying Bacteria in Different Sludge Concentrations Under Anoxic Conditions	LÜ Xin-tao, ZHOU Tong, TIAN Xia-di, <i>et al.</i> (3195)
Stability of ZVI-dependent Autotrophic Denitrification by ANAMMOX Bacteria	ZHANG Wen-jing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3201)
Effect of On-line NaClO Backwashing on Microbial Communities in an Inverted A ² O-MBR System	WANG Xu-dong, GAO Miao, WANG Ying-ying, <i>et al.</i> (3208)
Evaluation of Organic Matter Release and Economy for Various Pretreatments of Sewage Sludge	YUAN Yue, TAN Xue-jun, ZHENG She-yu (3216)
Model-based Optimization for the Coordinated Supply of Clear and Reclaimed Water in the Central Districts of Beijing, China	ZHANG Tian-yuan, TAN Qian, WANG Shu-ping (3223)
Occurrence and Removal of N-nitrosamines in the Wastewater Treatment Plants Using Different Treatment Processes	LIU Wang-rong, ZHAO Jiang-liang, YANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3233)
Occurrence of Tramadol and Fentanyl Use in Domestic Wastewater in Beijing	ZHOU Zi-lei, DU Peng, BAI Ya, <i>et al.</i> (3242)
Pollution Level and Ecological Risk of Typical Antibiotics in Guiyang Wastewater Treatment Plants	YANG Zhao, LI Jiang, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Various Livestock Feedlot Soils of the Hilly Purple Soil Region	CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, LIU Chen (3257)
Effects of Tetracycline on Microbial Communities and Antibiotic Resistance Genes of Vermicompost from Dewatered Sludge	CHEN Jing-yang, XIA Hui, HUANG Kui, <i>et al.</i> (3263)
Fate of Antibiotic Resistance Genes and Virulence Genes in Enterococci During Anaerobic Digestion Process of Thermal Hydrolyzed Sludge	LI Hui-li, PEI Yuan-mei, LI Shan, <i>et al.</i> (3270)
Effect of Co-composting of Chicken Manure with Chinese Medicinal Herbal Residues on Antibiotic Resistance Genes	WU Jin-ping, CHEN Jian-wen, LIU Yong, <i>et al.</i> (3276)
Spatio-temporal Patterns of Microbial Communities and Their Driving Mechanisms in Subalpine Lakes, Ningwu, Shanxi	WANG Xue, LIU Jin-xian, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (3285)
Community Structure Characteristics of <i>nirS</i> Denitrifying Bacteria of Spring Typical Parkland Waterbodies in Shijiazhuang City	ZHANG Yi-ran, LI Zai-xing, SUN Yue, <i>et al.</i> (3295)
Differential Responses of Rhizospheric <i>nirK</i> - and <i>nirS</i> -type Denitrifier Communities to Different Phosphorus Levels in Paddy Soil	ZHAN Yu, GAO Dan-dan, SHENG Rong, <i>et al.</i> (3304)
Comparison of Soil Bacterial Community Structure Between Paddy Fields and Dry Land in the Huixian Karst Wetland, China	JIA Yuan-hang, JIN Zhen-jiang, YUAN Wu, <i>et al.</i> (3313)
Cd Balance Analysis of a Typical Rice Paddy System in Central Hunan	JIANG Kai, DENG Xiao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3324)
Effects of an Amendment on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, WANG Yan-hong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (3331)
Isolation of Heavy Metal Immobilizing and Plant Growth-Promoting Bacteria and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Wheat	HAN Hui, WANG Xiao-yu, CAI Hong, <i>et al.</i> (3339)
Differences in the Cadmium-Enrichment Capacity and Subcellular Distribution and Chemical Form of Cadmium in Different Varieties of Pepper	PENG Qiu, LI Tao, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (3347)
Effect of Phosphorus Addition on N ₂ O Emissions from Rice-Rapeseed Rotation Soils	SUN Zheng, SU Rong-lin, XU Peng, <i>et al.</i> (3355)
Impact of Land Use Type on the Stability and Organic Carbon Content of Soil Aggregates in the Weibei Dryland	LIU Jie, MA Yan-ting, WANG Xian-ling, <i>et al.</i> (3361)
Vertical Distribution Characteristics of PAHs in Soils with Different Land Use Types During Rapid Urbanization	LU Yin-tao, XIANG Xin-xin, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (3369)
Pollution Levels, Sources, and Spatial Distribution of Phthalate Esters in Soils of the West Lake Scenic Area	LIAO Jian, DENG Chao, CHEN Yi, <i>et al.</i> (3378)
Impact of Biochar on Soil Bulk Density and Aggregates of Lou Soil	LI Qian-qian, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (3388)