

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第4期

Vol.38 No.4

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

西宁近郊大气氮干湿沉降研究 许稳, 金鑫, 罗少辉, 冯兆忠, 张霖, 潘月鹏, 刘学军 (1279)

兰州春夏季 PM₁₀ 碳组分昼夜变化特征与来源分析 马丽, 余晔, 王博, 赵素平, 李刚 (1289)

海南三亚大气颗粒物中水溶性无机离子浓度及其粒径分布特征 王璐, 刘子锐, 温天雪, 苗红妍, 王跃思 (1298)

2015年北京城区大气 PM_{2.5} 中 NH₄⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻ 及前体气体的污染特征 丁萌萌, 周健楠, 刘保献, 王焱, 张博韬, 石爱军, 杨懂艳, 常森 (1307)

北京市某垃圾焚烧厂周边大气二噁英污染特征及暴露风险 齐丽, 任玥, 刘爱民, 黄业茹, 赵震, 王江, 李泓 (1317)

北京和保定地区大气细颗粒物中可培养细菌的种群特征 胡亚东, 马安周, 吕鹏翼, 张扬, 庄国强 (1327)

基于实时交通数据的南京市主次干道机动车排放特征分析 李笑语, 吴琳, 邹超, 张意, 毛洪钧, 荆博宇 (1340)

过渡金属掺杂对镉锡烧绿石催化碳烟燃烧性能的影响 李曦峰, 孙宇琦, 王仲鹏, 牟宗刚, 崔兆杰 (1348)

南水北调中线北京段水质状况分析 徐华山, 赵磊, 孙昊苏, 任玉芬, 丁涛, 常帅, 王海东, 李森, 果钊 (1357)

三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征 杨兵, 何丙辉, 王德宝 (1366)

基于偏最小二乘模型的河流水质对土地利用的响应 李琳琳, 张依章, 唐常源, 郑磊, 孟伟, 卢少勇, 敦宇 (1376)

抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征 王琳杰, 余辉, 牛勇, 牛远, 张有林, 刘倩, 吉正元 (1384)

千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素 俞焰, 刘德富, 杨正健, 张佳磊, 徐雅倩, 刘晋高, 严广寒 (1393)

高通量测序技术研究辽河真核浮游藻类的群落结构特征 王靖淇, 王书平, 张远, 林佳宁, 高欣, 臧小苗, 赵茜 (1403)

三门湾近海有机污染对浮游细菌群落的影响 戴文芳, 郭永豪, 郁维娜, 熊金波 (1414)

沉积物-水界面氮的源解析和硝化反硝化 金赞芳, 龚嘉临, 施伊丽, 金漫彤, 李非里 (1423)

广州南沙红树林湿地水体和沉积物中有机氯农药的残留特征 丁洋, 黄焕芳, 李绘, 罗杰, 郑煌, 孙焰, 杨丹, 张原, 祁士华 (1431)

太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价 边博, 周燕, 张琴 (1442)

锁磷剂对杭州西湖底泥磷释放的控制效果 朱广伟, 李静, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军, 张运林, 秦伯强 (1451)

超滤处理东江水不可逆膜污染物的识别和活性炭对其吸附去除 杨海燕, 王灿, 鄢忠森, 李冬平, 赵焱, 瞿芳术, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1460)

UV/SPS 降解水中三氯生的效能及动力学 李青松, 李学艳, 姚宁波, 骆靖宇, 李国新, 陈国元, 高乃云 (1467)

真空紫外-亚硫酸盐法降解 PFOS 影响因素 韩慧丽, 王宏杰, 董文艺 (1477)

g-C₃N₄ 协同光催化还原 Cr(VI) 及氧化磺基水杨酸 李莉莉, 陈翠柏, 兰华春, 刘菲, 安晓强 (1483)

锆改性硅藻土吸附水中磷的研究 范艺, 王哲, 赵连勤, 吴德意 (1490)

3种常规消毒方法对磺胺类抗性基因削减效果的比较 郑吉, 周振超, 陈芳, 陈涛, 魏媛媛, 韩玥, 陈红 (1497)

典型生活污水处理工艺对雌激素效应的去除 张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1506)

SRT 对酵母-SBR 处理油脂废水稳定性的影响 吕文洲, 张树林, 乔宇祥, 刘英 (1513)

分散染料 neocron black(NB) 的生物降解特性 杨波, 丁凤友, 徐辉, 李方, 田晴, 马春燕 (1520)

多聚磷酸盐激酶基因在污水生物除磷中的功能 南亚萍, 周国田, 苏雪莹, 袁林江 (1529)

生物膜短程硝化系统的恢复及其转化为 CANON 工艺的过程 付昆明, 周厚田, 苏雪莹, 王会芳 (1536)

厌氧氨氧化反应器脱氮性能及细菌群落多样性分析 曹雁, 王桐屿, 秦玉洁, 韩彬, 任君怡 (1544)

内环境调节层对厌氧生物反应器填埋场中氮转化的影响 何正坤, 宋博宇, 朱南文, 董军 (1551)

矿化垃圾中 Fe(III) 还原耦合 CH₄ 厌氧去除特性 王立立, 何婷, 龙焰, 刘常宝 (1558)

应用铅铋同位素示踪研究泉州某林地垂直剖面土壤中重金属污染及来源解析 孙境蔚, 于瑞莲, 胡恭任, 苏光明, 王晓明 (1566)

畜禽粪有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异 何梦媛, 董同喜, 茹淑华, 苏德纯 (1576)

山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析 葛蔚, 程琪琪, 柴超, 曾路生, 吴娟, 陈清华, 朱祥伟, 马东 (1587)

江汉平原典型土壤环境中有机磷农药的分布特征及影响因素 王建伟, 张彩香, 潘真真, 廖小平, 刘媛, 吕幽, 汤蜜 (1597)

基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析 蔡观, 胡亚军, 王婷婷, 袁红朝, 王久荣, 李巧云, 葛体达, 吴金水 (1606)

秸秆还田对外源氮在土壤中转化及其微生物响应的影响 陈珊, 丁咸庆, 祝贞科, 王娟, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (1613)

生物炭输入对城郊农业区农田地表反照率及土壤呼吸的影响 张阳阳, 胡学玉, 邹娟, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (1622)

淹水水稻土消耗 N₂O 能力及机制 王玲, 邢肖毅, 秦红灵, 刘毅, 魏文学 (1633)

不同污水处理工艺非二氧化碳温室气体的释放 李惠娟, 彭党聪, 刘文博, 姚倩, 卓杨 (1640)

施用不同污泥堆肥对土壤温室气体排放的影响 杨雨滢, 易建婷, 张成, 陈宏, 木志坚 (1647)

不同镉水平下纳米沸石对土壤 pH、CEC 及 Cd 形态的影响 迟苏琳, 徐卫红, 熊仕娟, 王卫中, 秦余丽, 赵婉伊, 张春来, 李彦华, 李桃, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1654)

不同作物对外源硒动态吸收、转运的差异及其机制 彭琴, 李哲, 梁东丽, 王梦柯, 郭璐 (1667)

褪黑素对水稻幼芽镍胁迫的缓解作用 刘仕翔, 黄益宗, 罗泽娇, 黄永春, 蒋航 (1675)

不同形态磺胺类药物在根-土界面的空间分布及毒性评价 金彩霞, 司晓薇, 王万峰, 王春峰, 王子英, 张琴文, 王婉 (1683)

三峡库区消落带沉积物对鱼体富集率的影响 孙松, 李楚娴, 张成, 王永敏, 王定勇 (1689)

重庆市居民头发重金属富集特征及其相关性分析 何明靖, 李琦, 王登祥, 赵佳渊, 杨婷 (1697)

16S rRNA 高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性 杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (1704)

石墨烯掺杂聚苯胺阳极提高微生物燃料电池性能 黄力华, 李秀芬, 任月萍, 王新华 (1717)

美国污染场地清理的风险评估简介及政策制定 容跃 (1726)

《环境科学》征稿简则 (1505) 《环境科学》征订启事 (1682) 信息 (1339, 1459, 1612)

淹水水稻土消耗 N₂O 能力及机制

王玲^{1,2}, 邢肖毅^{1,2}, 秦红灵¹, 刘毅¹, 魏文学^{1*}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所桃源农业生态试验站, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 大量研究表明淹水厌氧状态下的水稻田等湿地生态系统中 N₂O 负排放量巨大, 对缓解大气温室气体效应有重要意义, 但水稻土壤对大气 N₂O 的吸收消耗潜力以及调控潜力发挥的微生物机制却鲜见报道. 本实验以表层渍水水稻土壤 (0~5 cm) 为研究对象, 通过室内厌氧培养手段, 分析环境 N₂O 浓度的提高对土壤 N₂O 消耗能力的影响以及 *nosZ* 基因丰度的变化规律. 结果表明, 淹水厌氧状态下的水稻土壤中 *nosZ* 基因绝对丰度 (以干土计) 在 DNA 水平上达到 10⁸ copies·g⁻¹, 具有很强的 N₂O 转化还原潜力. 回归分析结果显示环境 N₂O 浓度与土壤 N₂O 消耗速率显著线性正相关 ($r^2 = 1$, $P < 0.001$), 土壤 N₂O 消耗能力可被高浓度的环境 N₂O 极大程度激发, 达到 4 567.99 μg·(m²·h)⁻¹. 与此同时较高水平的 *nosZ* 基因丰度在不同浓度 N₂O 处理间无显著差异, 说明 DNA 水平上的 *nosZ* 基因丰度可能已经不是限制 N₂O 还原的关键因子, 微生物调控因子需进一步探索.

关键词: 水稻土; 厌氧; N₂O 浓度; N₂O 消耗; *nosZ*

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)04-1633-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201609138

N₂O Consumption Ability of Submerged Paddy Soil and the Regulatory Mechanism

WANG Ling^{1,2}, XING Xiao-yi^{1,2}, QIN Hong-ling¹, LIU Yi¹, WEI Wen-xue^{1*}

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Regions, Taoyuan Station of Agro-Ecology Research, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A large number of researches showed that the N₂O negative emissions from flooding paddy fields, peatlands and other wetlands ecosystem were frequent and considerable, which is of great significance on alleviating the greenhouse gas effect. However, there are few reports about the transformation and microbial mechanism of N₂O between atmosphere and paddy soil. The slurry of surface paddy soil (0-5 cm) was incubated in laboratory conditions, and the effect of enhanced N₂O concentrations in headspace on the N₂O consumption capacity of submerged paddy soil and the response of *nosZ* gene abundance were explored. The results showed that, paddy soil under flooding and anaerobic conditions harbored very strong potential of N₂O reduction along with a relatively high *nosZ* gene abundance (10⁸ copies·g⁻¹ dry soil at DNA level). Regression analysis presented the N₂O concentrations in headspace were positively correlated ($r^2 = 1$, $P < 0.001$) to the N₂O consumption rates of paddy soil slurry, indicating the high N₂O concentration could stimulate the N₂O consumption power, to a very high rate of 4 567.99 μg·(m²·h)⁻¹. Meanwhile, there were no significant differences in the high abundance of *nosZ* gene among N₂O treatments, demonstrating the *nosZ* gene abundance at DNA level might not be the main controller of N₂O consumption ability in submerged paddy soil and further study on the key microbial factor is needed.

Key words: paddy soil; anaerobic condition; N₂O concentration; N₂O consumption; *nosZ*

氧化亚氮(N₂O)是三大温室气体之一,其百年尺度单分子增温势(global warming potential)是CO₂的298倍,对全球变暖的贡献约为6%^[1,2].到2050年大气中N₂O的摩尔分数将从2001年的314×10⁻⁹增加到350×10⁻⁹~400×10⁻⁹^[3],将对全球气候和环境造成严重的威胁.农业土壤是最主要的N₂O来源,每年仅因施用化学氮肥产生的N₂O-N约150万t,占人类活动排放N₂O-N量的44%^[4].然而,排放到大气被检测到的N₂O只是土壤中N₂O产生与消耗过程综合作用后的动态结果,且由于土壤

中N₂O的产生速率往往高于其消耗速率,绝大多数研究只关注N₂O净产量,而忽略了N₂O净消纳量的可能性^[5].N₂O净消耗现象在1976年就被首次发现,到目前为止,已有很多研究报道了显著而频繁的N₂O净负通量现象,但是却由于缺乏证据而未做多探讨^[6-10].土壤不仅仅可以作为大气N₂O的净

收稿日期: 2016-09-18; 修订日期: 2016-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41330856,41271280); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41301274)

作者简介: 王玲(1987~),女,博士研究生,主要研究方向为土壤微生物分子生态学,E-mail:wlk_211@126.com

* 通信作者,E-mail:wenzxuewei@isa.ac.cn

源(N_2O source),有时也可暂时作为 N_2O 的汇库(N_2O sink)^[11].在当前全球变暖的环境压力下,土壤 N_2O 负排放的研究应该得到高度重视,充分认识土壤 N_2O 消耗能力及其调控机制对于全球 N_2O 的减排意义重大.

土壤由于其固有的机械组成和孔隙结构可在一定程度上截留一部分土体 N_2O ,延长 N_2O 在土体中的滞留时间而不轻易地扩散至大气中,但最终 N_2O 的完全消耗只能通过微生物作用还原为 N_2 .通常情况下异养细菌在呼吸过程中将 N_2O 还原为 N_2 的反硝化作用被认为是 N_2O 消耗的主要原因^[12].氧化亚氮还原酶(Nos)在反硝化过程中主导 N_2O 的还原,因此以氧化亚氮还原酶基因(*nosZ*)为靶基因揭示微生物种群的 N_2O 消耗还原能力是较直观的^[13].有研究表明Nos酶对 O_2 浓度的敏感性更高,低氧浓度和高水分含量可促进Nos酶活性的增加,并显著高于其他反硝化酶,从而促进 N_2O 吸收消耗^[14~16].有研究表明淹水或厌氧的环境有利于土壤 N_2O 的负吸收,在含水率较高的泥炭地、湿地等土壤生态系统中 N_2O 的吸收达到最大^[17].水稻田是一种长期处于淹水缺氧状态中的人工湿地系统,土壤环境极有利于其反硝化脱氮和 N_2O 充

分还原^[18,19].淹水状态下的稻田土壤具有很强的 N_2O 消耗潜力,但调控土壤 N_2O 消耗容量的微生物机制并不清楚.本研究以表层水稻土壤为应试对象,通过严格厌氧密闭培养的方法探究表层水稻土壤对不同浓度的 N_2O 消耗能力差异以及含*nosZ*基因的反硝化微生物丰度的差异,进而揭示厌氧状态下水稻土中调控 N_2O 消耗过程的微生物机制,以期为调控水稻田温室气体排放提供重要的科学参考.

1 材料与方法

1.1 土样采集与预处理

土样采集自湖南益阳水稻丰产节水节肥试验田(29°08'N, 112°27'E),为多年种植双季稻土壤.土壤母质为湖积物,质地为粉(砂)壤土(美国制土壤质地分类).采集时间为2016年4月(翻耕前2周),此时土壤处于休耕渍水状态.采用随机多点采样法,采集0~5 cm水稻土壤并混匀.取回后将土壤水分调至50%(质量分数)后充分混匀成泥浆状,在28℃±1℃温室预培养10 d后待用,预培养结束时的泥浆水稻土视为起始土样(S),其基础理化性状见表1.

表1 应试土样基础理化性质¹⁾

Table 1 Physicochemical properties of paddy soil

NH_4^+ -N	NO_3^- -N	DOC	pH(H_2O)	容重 / $g \cdot cm^{-3}$	土壤质地		
					砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%
60.91	3.38	417.74	6.16	0.79	31.48	51.45	170.77

1) NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、DOC的含量单位为 $mg \cdot kg^{-1}$,以干土计

1.2 培养实验设计及样品采集

培养装置主体为1 L广口瓶,盖以橡胶塞进行培养.橡胶塞中间钻一小孔($d=5$ mm)用于连接三通阀,密封后用于气体样品的采集.本实验设置5个 N_2O 含量添加处理,分别使瓶内气体 N_2O 摩尔分数为0、20、200、1 000、3 000 $\mu mol \cdot mol^{-1}$ (NO 、 N_2O 、 N_200 、 N_1000 、 N_3000 处理),每处理3重复,总计15瓶.经单位转换计算后,5个处理中 N_2O 质量浓度应为0、35.63、356.31、1 781.56、5 344.68 $\mu g \cdot L^{-1}$.分别称取混匀的泥浆100 g±5 g置于广口瓶底部,加入30 mL双蒸水使水稻泥浆表层有自由水层,为水分过饱和状态.橡胶塞密闭广口瓶后,用真空泵抽真空后补足高纯He气,反复操作3次确保瓶内空气基本置换完毕后,外源充入 N_2O 分别使瓶内 N_2O 含量达到设定水平,立即置于恒温培养室

(28℃±1℃)开始培养计时,培养时间共计145 h.

气体样品采集:用30 mL注射器分别在密闭培养的0.5、1.5、2.5、4.5、7、12.5、22、26、30、36、46.5、57.5、70、80、94、103、118、128、145 h采集广口瓶中气体样品30 mL于12 mL真空血清瓶中用于 N_2O 含量的测定.每次采集气体样品前用注射器反复抽打广口瓶上层空间气体15~20次使瓶内气体混匀,气体样品采集后立即补入30 mL高纯He保证瓶内气压平衡.

土壤样品采集:共采集两次土样,分别为培养前处理获得的起始土样和培养结束时采集的土样.待145 h气体样品采集完后立即采集广口瓶内土壤样品.倒掉自由水后用灭菌后的小勺充分混匀土样,取出约20 g土样迅速用锡箔纸包裹,经由液氮速冻,放入-80℃保存用于相关分子生物学分析.将瓶内剩余土样装入密封袋,放入4℃保存用于无机

氮及 DOC 含量分析,并在 72 h 内完成测定。

1.3 N₂O 浓度,无机氮和 DOC 测定

N₂O 浓度采用温室气体气相色谱仪 (GC 7890A) 测定. 以高纯 N₂ 作为色谱柱载气,气流速度 28 psi (193 kPa),检测器温度为 300℃,柱箱温度为 50℃,检测器为微池电子捕获器⁶³Ni-ECD.

无机氮及 DOC 含量测定采用硫酸钾共提法浸提. 称取约 10 g 土样,置于 100 mL 塑料振荡瓶中,加入 50 mL 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 溶液浸提,在振荡机上振荡 1 h 后用滤纸过滤悬浊液,澄清滤液分别采用连续流动分析仪 (Flastar 5000 Analyzer) 和 C/N 分析仪测定硝态氮、铵态氮含量和 DOC 含量.

1.4 功能基因丰度测定

土壤样品的 DNA 提取方法主要参考 Chen 等的方法^[20],并在此基础上做了适当调整和修改. 提取的 DNA 由 Nanodrop ND-1000UV-Vis 分光光度计测定 DNA 浓度和质量系数,并通过 1% 凝胶电泳检测 DNA 完整度,满足条件后用于 qPCR 分析.

16S rDNA 和 *nosZ* 基因 PCR 分析用引物分别为 1369F (5'-CGG TGA ATA CGT TCY CGG-3') 和 1492R (5'-GGW TAC CTT GTT ACG ACT-3')^[21], *nosZ*-1126F (5'-GGG CTB GGG CCR TTG CA-3') 和 *nosZ*-1381R (5'-GAA GCG RTC CTT SGA RAA CTT G-3')^[20]. 实时 PCR 扩增所用的仪器为 ABI PRISM 7900 (Applied Biosystems),实现荧光检测和样品浓度测定. 标准曲线分别用含 16S rDNA 和 *nosZ* 基因的质粒为模板,以 10 倍梯度稀释法配制. 16S rDNA 和 *nosZ* 基因 PCR 扩增反应体系为 (10 μL): 上下游引物各 0.2 μL, SYBRGreen (Takara) 5 μL, Rox 0.2 μL, DNA 模板 5 ng (1 μL), 补水至 10 μL. *nosZ* 基因 qPCR 程序为: 95℃ 30 s 预变性; 95℃ 5 s, 60℃ 30 s, 72℃ 10 s, 40 个循环; 95℃ 15 s, 60℃ 15 s, 95℃ 15 s 校正溶解曲线. 16S rDNA 基因 qPCR 程序为: 95℃ 30 s 预变性; 95℃ 5 s, 60℃ 30 s, 40 个循环; 95℃ 15 s, 60℃ 15 s, 95℃ 15 s 校正溶解曲线. 所有样品重复 3 次并设置阴性对照,溶解曲线分析和琼脂糖凝胶电泳鉴定产物的特异性.

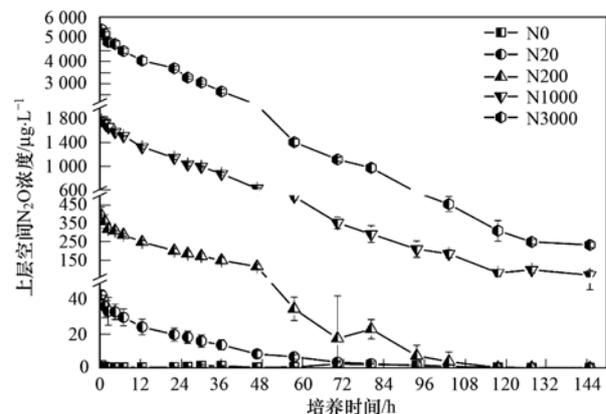
1.5 数据统计分析和处理

数据的统计分析均采用 SPSS 13.0 软件进行分析. N₂O 浓度、无机养分浓度以及功能基因丰度处理间的差异性分析采用单向方差分析 (One Way ANOVA, LSD 检验). N₂O 浓度与消耗速率的关系采用线性回归分析拟合. 图形制作采用 Origin Pro 9.0 软件完成.

2 结果与分析

2.1 不同浓度 N₂O 消耗规律

不同浓度的 N₂O 处理后,上层空间 N₂O 浓度在 0.5 h 时均略高于设定浓度值约 1.50 ~ 106.78 μg·L⁻¹ (表 2). 但在 1.5 h 时上层空间中的 N₂O 浓度已基本低于设定值,表明厌氧培养前期水稻土中反硝化过程持续进行而释放了部分 N₂O. 随后,水稻土上层密闭空间中的 N₂O 浓度随厌氧培养时间的延长均呈现明显的下降趋势 (图 1). N20 处理在培养了 70 h 左右时空间内 N₂O 已基本已消耗至对照水平 (N0), 而 N200 处理中 N₂O 消耗至对照水平耗时 105 h 左右,两个处理 N₂O 在厌氧培养结束时 (145 h) 已被消耗完全 (表 2). 与之不同的是,高水平的 N₂O 添加 (N1000、N3000) 处理中上层空间 N₂O 浓度在厌氧培养 145 h 后仍维持较高水平,分别达到 70.70 μg·L⁻¹ 和 234.20 μg·L⁻¹,但此时的 N₂O 浓度也仅为培养起始时 N₂O 浓度的 4.13% 左右. 经过进一步计算发现, N0、N20、N200、N1000 和 N3000 处理中 N₂O 平均消耗速率分别为 0.20、5.96、54.11、237.38 和 719.46 μg·(kg·h)⁻¹. 线性回归分析结果表明 N₂O 平均消耗速率 (y) 与培养开始时上部空间的 N₂O 浓度 (x) μg·L⁻¹ 呈极显著的线性正相关关系 ($P < 0.001$) (图 2). 综合 4 个水平 N₂O 处理的结果表明即使外源添加的 N₂O 含量相差 10 ~ 150 倍,同一水稻土壤在完全厌氧条件下也能够基本消耗完这些外源添加的 N₂O,进一步说明淹水水稻土具有极强的 N₂O 消耗潜力.



数值代表平均值 ($n = 3$) \pm 标准误差
图 1 不同 N₂O 浓度添加处理后上层空间 N₂O 浓度随厌氧培养时间的变化规律

Fig. 1 Dynamics of N₂O concentrations in headspace of five N₂O treatments during anaerobic incubation

表 2 厌氧培养前后土壤上层空间中 N_2O 浓度/ $\mu g \cdot L^{-1}$ Table 2 N_2O contents in headspace before and after the anaerobic incubation/ $\mu g \cdot L^{-1}$

N_2O 处理	N_2O 设定浓度	上层空间 N_2O 浓度		N_2O 总消耗量
		0.5 h	145 h	
N0	0	1.50 ± 0.69	0.08 ± 0.11	1.42 ± 0.58
N20	35.63	43.23 ± 2.31	0.05 ± 0.08	43.18 ± 1.57
N200	356.31	392.30 ± 46.84	0.02 ± 0.03	392.28 ± 33.12
N1000	1781.56	1791.70 ± 41.31	70.70 ± 24.56	1721.00 ± 9.21
N3000	5344.68	5451.46 ± 27.32	234.20 ± 15.11	5210.82 ± 35.47

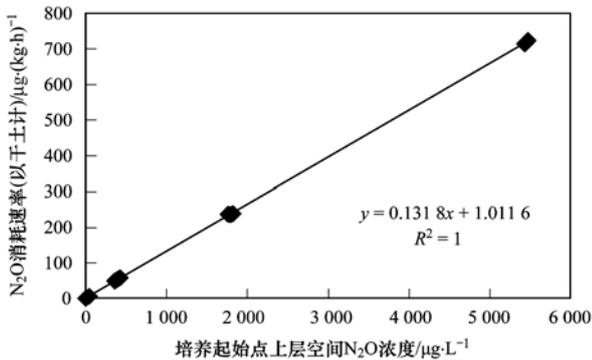
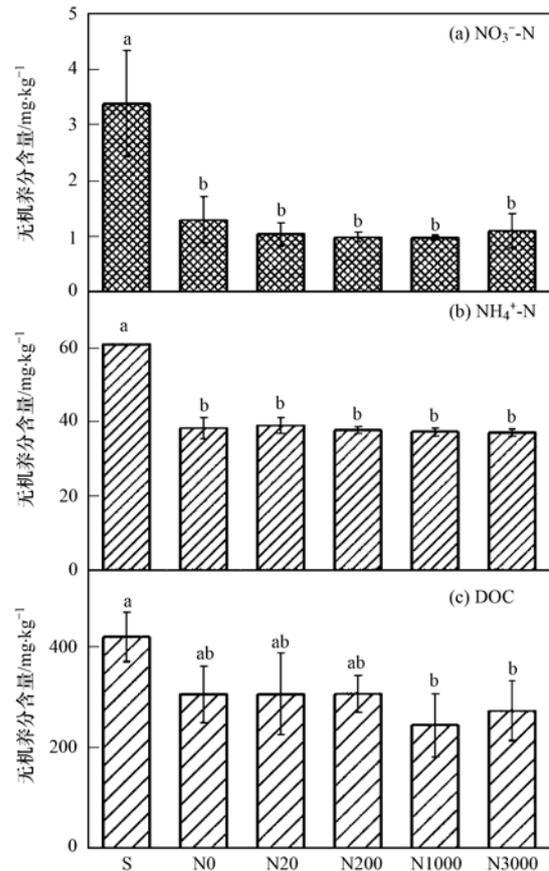
图 2 厌氧培养中 N_2O 起始浓度与 N_2O 平均消耗速率的关系

Fig. 2 Relation between N_2O initial concentrations in headspace and N_2O consumption rates of paddy soil slurry in anaerobic incubation

2.2 培养前后土壤无机养分含量变化

通过厌氧培养前后的土壤无机养分含量对比研究发现(图3),培养前土壤中的无机氮(NO_3^- -N、 NH_4^+ -N)含量显著高于厌氧培养后的土壤($P < 0.05$).土壤本底含有的 NO_3^- -N含量较低,仅有 $3.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,但经过145 h厌氧培养期,土壤 NO_3^- -N含量被大量消耗了 $2.09 \sim 2.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,约占土壤本底 NO_3^- -N含量的 $61.73\% \sim 71.08\%$.这些被消耗的 NO_3^- -N极大可能是在厌氧培养前期被水稻土中反硝化微生物作为底物利用而产生 N_2O .与此同时,土壤 NH_4^+ -N含量也被大量消耗了 $21.91 \sim 23.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,约占土壤本底 NH_4^+ -N含量的 $35.97\% \sim 39.08\%$,但不同 N_2O 浓度处理的土壤间并无显著差异.被消耗的 NH_4^+ -N可能通过硝化微生物的反硝化作用而生成 N_2O .与无机氮消耗规律不同的是,经过145 h厌氧培养后,低浓度 N_2O 处理(N0、N20、N200)的土壤DOC消耗量约为 $113.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与培养前土壤DOC含量无显著差异,而高浓度 N_2O 处理(N1000、N3000)的土壤DOC含量约消耗了 $160.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,145 h时的含量显著低于培养前土壤($P < 0.05$).



图柱代表每处理3个重复的测定平均值,误差线代表标准误;图柱上相同的字母代表差异不显著($P < 0.05$),下同

图 3 土壤无机养分含量在不同 N_2O 水平处理前后的差异规律

Fig. 3 Soil NH_4^+ -N, NO_3^- -N and DOC concentrations in different treatments

2.3 反硝化功能基因 *nosZ* 及细菌16S rDNA丰度变化规律

图4显示低浓度 N_2O 处理(N20、N200)中16S rDNA基因丰度相比于N0处理略升高了4.53%左右,而N1000、N3000处理中16S rDNA基因丰度比N0处理增加了19.34%左右;同时低浓度 N_2O 添加使氧化亚氮还原酶基因*nosZ*丰度提高了约17.6%,而高浓度的 N_2O 添加则使*nosZ*基因丰度升

高了 23.13%。但通过对不同 N₂O 浓度处理中的细菌 16S rDNA 与反硝化 *nosZ* 基因丰度进行差异性分析发现, 两个基因的拷贝数量在不同处理间均无显著差异, 淹水水稻土壤 16S rDNA 基因拷贝数平均为 2.84×10^{11} copies·g⁻¹, *nosZ* 基因拷贝数平均为 6.67×10^8 copies·g⁻¹, 表明培养条件下 DNA 水平上的 *nosZ* 基因丰度变化可能并不是决定土壤 N₂O 消耗能力差异的关键因子。

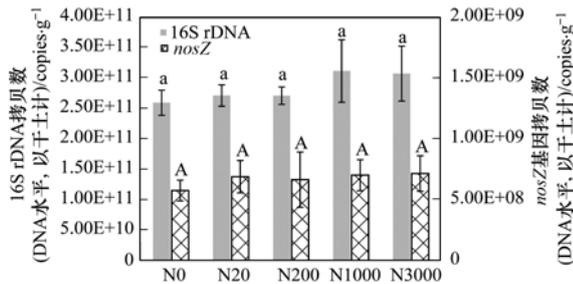


图 4 不同水平 N₂O 处理下反硝化功能基因 *nosZ* 和细菌 16S rDNA 基因丰度的差异

Fig. 4 16S rDNA and *nosZ* gene abundances in soil samples from different treatments

3 讨论

土壤是大气 N₂O 的主要排放源, 但越来越多的研究发现土壤也能够从大气中吸收转化 N₂O 而成为 N₂O 的有效汇库^[11]。厌氧、丰富的有机碳、低 NO₃⁻ 浓度和高水分含量常被认为是促进土壤 N₂O 消耗的有利条件, 因为土壤通过反硝化作用还原 N₂O 为 N₂ 的过程在这些环境条件下被极大推动^[5,6]。本研究中所有处理的上部空间 N₂O 浓度均出现明显的降低趋势, 表明无论环境 N₂O 浓度高低, 水稻土壤在实验条件下都具备吸收消耗 N₂O 的能力。这是因为应试土壤的培养条件均被设定为淹水厌氧培养, 使土壤微生物活动以厌氧反硝化作用为主。厌氧反硝化作用通常被认为是调控土壤 N₂O 消耗还原的主要过程^[12]。在反硝化过程中, 有效碳源的供应能够促进土壤微生物的生长, 当给土壤额外添加有效碳含量 500 mg·kg⁻¹ 左右时, 反硝化微生物对 N₂O 的吸收量显著增加^[6]。Mathieu 等^[22] 指出土壤有机碳的可利用率与土壤 N₂ 产量紧密相关, 高浓度的可用有机碳能够促进土壤厌氧环境的进一步加强。虽然本研究中并未对土壤外源添加有机碳, 但应试土壤本底 DOC 含量较充足, 为 417.74 mg·kg⁻¹, 能够提供土壤微生物活动所需。此外当土壤中 NO₃⁻ 含量很低的时候, 大气或土壤中的 N₂O 就可能成为反硝化作用的唯一电子受体而被还原为

N₂, 因此 N 素限制的生态系统常常会被认为是 N₂O 负排放区域^[5,17,23]。Ryden^[24] 和 Rosenkranz 等^[25] 报道认为土壤 N₂O 负排放现象的出现与土壤中低水平的 NO₃⁻ 含量 (<1 mg·kg⁻¹) 直接相关。应试土壤中反硝化微生物活动可利用的 NO₃⁻-N 含量水平较低, 仅为 3.38 mg·kg⁻¹, 十分利于土壤对 N₂O 的消耗活动。因此, 土壤本底无机养分特征 (高 DOC、低 NO₃⁻-N) 及应试培养条件 (厌氧、淹水) 使得表层水稻土壤的 N₂O 吸收消耗能力充分发挥, 从而在所有处理中都出现了极为显著的 N₂O 负排放现象。

越来越多的研究表明具有强烈厌氧环境的湿地土壤会促使土壤 N₂O 频繁的被消耗还原为 N₂ 而成为大气 N₂O 的汇库。Schlesinger^[17] 通过综合分析后发现旱地土壤 N₂O 平均吸收潜力约为 4 μg·(m²·h)⁻¹, 而土壤 N₂O 的最高吸收值 [100 ~ 207 μg·(m²·h)⁻¹] 基本都出现在含水率较高的泥炭地、湿地等土壤生态系统中。Majumdar^[26] 通过综合比较也发现淹水稻田 N₂O 吸收量显著高于旱地土壤, 且淹水稻田 N₂O 的吸收量范围为 0.13 ~ 191 μg·(m²·h)⁻¹。本研究中水饱和状态的水稻土壤对 N₂O 的吸收速率为 0.20 ~ 719.46 μg·(kg·h)⁻¹, 单位面积换算后为 1.24 ~ 4567.99 μg·(m²·h)⁻¹, 最大消耗速率已显著高于前述报道的最大值。环境 N₂O 摩尔分数提高至 1000 μmol·mol⁻¹ 和 3000 μmol·mol⁻¹ 时, N₂O 吸收速率增加了一个数量级, 超过 1000 μg·(m²·h)⁻¹, 表明厌氧土壤吸收 N₂O 的潜力深不可测。因此弄清土壤对 N₂O 巨大的消耗能力是土壤固有性状, 还是外部环境刺激, 亦或是两者共同作用调控十分必要。

作为一个整体系统, 土壤与外界环境间存在频繁的物质交换和能量流动。当土壤临界面出现 N₂O 浓度差时, 大气与土体中 N₂O 开始进行对流和交换, N₂O 从高浓度区域向低浓度区域迁移, 浓度差值越大, 气体交换越频繁^[27], 从而使单位时间内进入土壤被微生物利用的还原基质 N₂O 就越多。通过线性回归分析发现水稻土 N₂O 消耗速率与环境中 N₂O 浓度呈极显著的线性正相关关系, 表明高浓度的环境 N₂O 刺激了土壤 N₂O 消耗能力增强。当大气中的 N₂O 通过被动扩散和对流方式进入土体后, 除了通过反硝化作用还原为 N₂, 少量 N₂O 也可能转化生成 NH₄⁺^[28]。本研究中高摩尔分数 N₂O (1000 μmol·mol⁻¹、3000 μmol·mol⁻¹) 处理的土壤 NH₄⁺-N 含量与低摩尔分数 N₂O (0、20、200 μmol·mol⁻¹) 处

理无显著差异,表明被土壤吸收的 N_2O 被微生物转化为无机态的 $NH_4^+ -N$ 的可能性较低,而应该是通过其他途径被消耗,比如完全反硝化还原为 N_2 或同化为微生物生物量氮。

反硝化作用是在一系列反硝化酶(Nar、Nor、Nir 和 Nos 酶)的顺次作用下发生的微生物还原过程,氧化亚氮还原酶基因(*nosZ*)参与催化 N_2O 向 N_2 转化。当土壤含水量超过饱和含水率时,完全厌氧的环境使厌氧高敏感的 *Nos* 基因所合成的酶活性显著增强并超过其他 3 种反硝化酶,有利于反硝化作用彻底进行而形成 N_2O 的消耗^[27]。Liu 等^[29]在培养条件下发现持续淹水状态下的 0~20 cm 水稻土 *nosZ* 基因绝对丰度为 $5.2 \times 10^6 \sim 9.3 \times 10^6$ copies·g⁻¹,Yang 等^[30]也在相同状态下发现 0~6 cm 水稻土 *nosZ* 基因绝对丰度为 $5.0 \times 10^6 \sim 2.1 \times 10^7$ copies·g⁻¹。本研究 5 个处理中土壤 *nosZ* 基因的绝对丰度均达到 10^8 copies·g⁻¹,明显高于上述淹水土壤,表明该土壤含 *nosZ* 基因的微生物数量在培养条件下已快速增长,使土壤本身具备较强的 N_2O 转化潜力。在这种前提下,还原底物 N_2O 的增加可能进一步刺激功能微生物的增加。Majumdar^[26]就指出当 N_2O 成为环境中唯一的电子受体时, N_2O 还原微生物的数量是影响 N_2O 最终浓度的唯一因素。但本研究结果却显示不同浓度 N_2O 处理间 *nosZ* 基因的绝对丰度(DNA 水平)没有显著差异,说明在土壤 N_2O 还原微生物的数量已达到较高水平时,*nosZ* 基因丰度可能已经不是限制 N_2O 还原的关键因子。值得注意的是,DNA 水平上的 *nosZ* 基因数量并不能完全代表土壤微生物的 N_2O 还原活性,Uchida 等^[31]研究表明在 DNA 水平上反硝化基因(*nirS*、*nirK*、*nosZ*)与 N_2O 排放无显著相关性,但在 mRNA 水平上显著相关,因此为探明环境 N_2O 浓度对 N_2O 消耗能力的影响可以从 mRNA 水平上进一步深入研究。此外,非典型 *nosZ* II 基因的发现与鉴定也为理解 N_2O 还原途径多样性提供了全新的思路,这是一种与常规 *nosZ* 基因相关但具有进化差异的基因,并且被认为是一种有效的、丰富存在于陆地生态系统的 N_2O 还原酶基因^[32,33]。

4 结论

水稻土因为长期处于淹水厌氧状态而具有强大的 N_2O 吸收消耗能力,土壤中极低水平的 $NO_3^- -N$ 含量以及高水平的 DOC 含量在一定程度上促进了土壤完全反硝化作用的完成。环境 N_2O 浓度与 N_2O

消耗速率显著正相关($P < 0.001$),在高浓度的环境 N_2O 刺激下, N_2O 消耗速率能够达到 $4567.99 \mu g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$,远远超出已报道的最大值,说明土壤吸收消耗 N_2O 的潜力巨大,并且这种潜力的发挥可能与氧化亚氮还原酶基因(*nosZ*)的数量变化有一定联系。

参考文献:

- [1] Pachauri R K, Reisinger A. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2007.
- [2] Wuebbles D J. Atmosphere nitrous oxide: no laughing matter [J]. Science, 2009, **326**(5949): 56-57.
- [3] Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect [J]. Science, 1990, **248**(4960): 1217-1219.
- [4] Eichner M J. Nitrous oxide emissions from fertilized soils: summary of available data [J]. Environmental Quality, 1990, **19**(2): 272-280.
- [5] Chapuis-Lardy L, Wrage N, Metay A, et al. Soils, a sink for N_2O ? A review [J]. Global Change Biology, 2007, **13**(1): 1-17.
- [6] Blackmer A M, Bremner J M. Potential of soil as a sink for atmospheric nitrous oxide [J]. Geophysical Research Letters, 1976, **3**(12): 739-742.
- [7] Butterbach-Bahl K, Breuer L, Gasche R, et al. Exchange of trace gases between soils and the atmosphere in Scots pine forest ecosystems of the northeastern German lowlands: 1. Fluxes of N_2O , NO/NO_2 and CH_4 at forest sites with different N-deposition [J]. Forest Ecology and Management, 2002, **167**(1-3): 123-134.
- [8] Verchot L V, Davidson E A, Cattanio J H, et al. Land use change and biogeochemical controls of nitrogen oxide emissions from soils in eastern Amazonia [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1999, **13**(1): 31-46.
- [9] 刘景双,王金达,李仲根,等.三江平原沼泽湿地 N_2O 浓度与排放特征初步 [J]. 环境科学, 2003, **24**(1): 33-39.
Liu J S, Wang J D, Li Z G, et al. N_2O concentration and its emission characteristics in Sanjiang plain wetland [J]. Environmental Science, 2003, **24**(1): 33-39.
- [10] Xu Y C, Shen Q R, Li M L, et al. Effect of soil water status and mulching on N_2O and CH_4 emission from lowland rice field in China [J]. Biology and Fertility of Soils, 2004, **39**(3): 215-217.
- [11] Minami K. Atmospheric methane and nitrous oxide: sources, sinks and strategies for reducing agricultural emissions [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1997, **49**(1-3): 203-211.
- [12] 续勇波,蔡祖聪.亚热带土壤氮素反硝化过程中 N_2O 的排放和还原 [J]. 环境科学学报, 2008, **28**(4): 731-737.
Xu Y B, Cai Z C. Nitrous oxide emission and reduction during denitrification in subtropical soils [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, **28**(4): 731-737.
- [13] 王晓君,陈少华,张兆基,等.利用氧化亚氮还原酶基因(*nosZ*)评价人工湿地系统中的反硝化菌 [J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1306-1312.
Wang X J, Chen S X, Zhang Z J, et al. Denitrifying bacteria of

- constructed wetland system based on nitrous oxide reductase gene (*nosZ*) [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(4): 1306-1312.
- [14] Ryden J C. N₂O exchange between a grassland soil and the atmosphere[J]. *Nature*, 1981, **292**(5820): 235-237.
- [15] Glatzel S, Stahr K. Methane and nitrous oxide exchange in differently fertilised grassland in southern Germany [J]. *Plant and Soil*, 2001, **231**(1): 21-35.
- [16] Goossens A, De Visscher A, Boeckx P, *et al.* Two-year field study on the emission of N₂O from coarse and middle-textured Belgian soils with different land use [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, **60**(1-3): 23-34.
- [17] Schlesinger W H. An estimate of the global sink for nitrous oxide in soils [J]. *Global Change Biology*, 2013, **19**(10): 2929-2931.
- [18] 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.
- [19] Liu B B, Mørkved P T, Frostegård Å, *et al.* Denitrification gene pools, transcription and kinetics of NO, N₂O and N₂ production as affected by soil pH [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2010, **72**(3): 407-417.
- [20] Chen Z, Luo X Q, Hu R G, *et al.* Impact of long-term fertilization on the composition of denitrifier communities based on nitrite reductase analyses in a paddy soil [J]. *Microbial Ecology*, 2010, **60**(4): 850-861.
- [21] Suzuki M T, Taylor L T, DeLong E F. Quantitative analysis of small-subunit rRNA genes in mixed microbial populations via 5'-nuclease assays [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2000, **66**(11): 4605-4614.
- [22] Mathieu O, Lévêque J, Hénault C, *et al.* Emissions and spatial variability of N₂O, N₂ and nitrous oxide mole fraction at the field scale, revealed with ¹⁵N isotopic techniques [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(5): 941-951.
- [23] Wu D M, Dong W X, Oenema O, *et al.* N₂O consumption by low-nitrogen soil and its regulation by water and oxygen [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **60**: 165-172.
- [24] Ryden J C. Denitrification loss from a grassland soil in the field receiving different rates of nitrogen as ammonium nitrate [J]. *Journal of Soil Science*, 1983, **34**(2): 355-365.
- [25] Rosenkranz P, Bruggemann N, Papen H, *et al.* N₂O, NO and CH₄ exchange, and microbial N turnover over a Mediterranean pine forest soil [J]. *Biogeosciences Discussions*, 2005, **2**(3): 673-702.
- [26] Majumdar D. Biogeochemistry of N₂O uptake and consumption in submerged soils and rice fields and implications in climate change [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2013, **43**(24): 2653-2684.
- [27] 冯洁, 张克强, 陈思, 等. 土壤 N₂O 吸收和消耗机制及研究进展 [J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(11): 2084-2089.
- Feng J, Zhang K Q, Chen S, *et al.* Mechanism of N₂O uptake and consumption by soil. A review [J]. *Journal of Agro-Environment science*, 2014, **33**(11): 2084-2089.
- [28] Vieten B, Conen F, Seth B, *et al.* The fate of N₂O consumed in soils [J]. *Biogeosciences*, 2008, **5**(1): 129-132.
- [29] Liu J B, Hou H J, Sheng R, *et al.* Denitrifying communities differentially respond to flooding drying cycles in paddy soils [J]. *Applied Soil Ecology*, 2012, **62**: 155-162.
- [30] Yang H C, Sheng R, Zhang Z X, *et al.* Responses of nitrifying and denitrifying bacteria to flooding-drying cycles in flooded rice soil [J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, **103**: 101-109.
- [31] Uchida Y, Wang Y, Akiyama H, *et al.* Expression of denitrification genes in response to a waterlogging event in a fluvisol and its relationship with large nitrous oxide pulses [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2014, **88**(2): 407-423.
- [32] Sanford R A, Wagner D D, Wu Q Z, *et al.* Unexpected nondenitrifier nitrous oxide reductase gene diversity and abundance in soils [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, **109**(48): 19709-19714.
- [33] Jones C M, Graf D R H, Bru D, *et al.* The unaccounted yet abundant nitrous oxide-reducing microbial community: a potential nitrous oxide sink [J]. *The ISME Journal*, 2013, **7**(2): 417-426.

CONTENTS

Dry and Bulk Nitrogen Deposition in Suburbs of Xining City	XU Wen, JIN Xin, LUO Shao-hui, <i>et al.</i> (1279)
Day-Night Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in PM ₁₀ During Spring and Summer of Lanzhou	MA Li, YU Ye, WANG Bo, <i>et al.</i> (1289)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions in Sanya, Hainan	WANG Lu, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1298)
Pollution Characteristics of NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ in PM _{2.5} and Their Precursor Gases During 2015 in an Urban Area of Beijing	DING Meng-meng, ZHOU Jian-nan, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1307)
Pollution Characteristics of PCDD/Fs in Ambient Air and Exposure Risk Assessment Around a Municipal Solid Waste Incinerator in Beijing	QI Li, REN Yue, LIU Ai-min, <i>et al.</i> (1317)
Community Characteristics of Cultivable Bacteria in Fine Particles (PM _{2.5}) of Beijing and Baoding	HU Ya-dong, MA An-zhou, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (1327)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Artery and Collector Roads in Nanjing Based on Real-time Traffic Data	LI Xiao-yu, WU Lin, ZOU Chao, <i>et al.</i> (1340)
Catalytic Combustion of Soot Particulates over Rare Earth Pyrochlore Oxides Doped with Transition Metals	LI Xi-feng, SUN Yu-qi, WANG Zhong-peng, <i>et al.</i> (1348)
Water Quality Analysis of Beijing Segment of South-to-North Water Diversion Middle Route Project	XU Hua-shan, ZHAO Lei, SUN Hao-su, <i>et al.</i> (1357)
Hanfeng Pre-reservoir Commissioning Time Variation Feature of the Hydrology and Water Quality in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (1366)
Modeling of Water Quality Response to Land-use Patterns in Taizi River Basin Based on Partial Least Squares	LI Lin-lin, ZHANG Yi-zhang, TANG Chang-yuan, <i>et al.</i> (1376)
Distribution Characteristics of Water Temperature and Water Quality of Fuxian Lake During Thermal Stratification Period in Summer	WANG Lin-jie, YU Hui, NIU Yong, <i>et al.</i> (1384)
Vertical Stratification Characteristics of Dissolved Oxygen and Phytoplankton in Thousand-Island Lake and Their Influencing Factors	YU Yan, LIU De-fu, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (1393)
Community Structure Characteristics of Eukaryotic Planktonic Algae in Liaoh River Through High-throughput Sequencing	WANG Jing-qi, WANG Shu-ping, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1403)
Effects of Coastal Organic Pollution on Bacterioplankton Community in Sanmen Bay	DAI Wen-fang, GUO Yong-hao, YU Wei-na, <i>et al.</i> (1414)
Nitrate Source Identification and Nitrification-denitrification at the Sediment-water Interface	JIN Zan-fang, GONG Jia-lin, SHI Yi-li, <i>et al.</i> (1423)
Residues of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Water and Sediments from Nansha Mangrove Wetland	DING Yang, HUANG Huan-fang, LI Hui, <i>et al.</i> (1431)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals from River Network Sediment in Western Area of Taihu Lake	BIAN Bo, ZHOU Yan, ZHANG Qin (1442)
Efficacy of Phoslock® on the Reduction of Sediment Phosphorus Release in West Lake, Hangzhou, China	ZHU Guang-wei, LI Jing, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (1451)
Identification and PAC Adsorption of Foulants Responsible for Irreversible Fouling During Ultrafiltration of Dongjiang River Water	YANG Hai-yan, WANG Can, YAN Zhong-sen, <i>et al.</i> (1460)
Efficiency and Kinetics of Triclosan Degradation in Aqueous Solution by UV/Sodium Persulfate	LI Qing-song, LI Xue-yan, YAO Ning-bo, <i>et al.</i> (1467)
Influencing Factors on the Degradation of PFOS Through VUV-SO ₂ ⁻	HAN Hui-li, WANG Hong-jie, DONG Wen-yi (1477)
Simultaneous Photocatalytic Reduction of Cr(VI) and Oxidation of SSA by Carbon Nitride	LI Li-li, CHEN Cui-hai, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (1483)
Modification of Diatomite by Zirconium and Its Performance in Phosphate Removal from Water	FAN Yi, WANG Zhe, ZHAO Lian-qin, <i>et al.</i> (1490)
Reducing Effect of Three Disinfection Technologies for Sulfonamides Resistance Genes	ZHENG Ji, ZHOU Zhen-chao, CHEN Fang, <i>et al.</i> (1497)
Removal of Estrogenic Effect by Typical Domestic Wastewater Treatment Processes	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1506)
Effect of SRT on Stability of Yeast-SBR in Treating Oil-containing Wastewater	LÜ Wen-zhou, ZHANG Shu-lin, QIAO Yu-xiang, <i>et al.</i> (1513)
Degradation of the Disperse Dye Neocron Black(NB) by Biological Treatment	YANG Bo, DING Feng-you, XU Hui, <i>et al.</i> (1520)
Function of Polyphosphate Kinase Gene in Biological Phosphate Removal During the Wastewater Treatment Process	NAN Ya-ping, ZHOU Guo-biao, YUAN Lin-jiang (1529)
Short-cut Nitrification Recovery and Its Transformation into CANON Process in a Biofilm Reactor	FU Kun-ming, ZHOU Hou-tian, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (1536)
Nitrogen Removal Characteristics and Diversity of Microbial Community in ANAMMOX Reactor	CAO Yan, WANG Tong-yu, QIN Yu-jie, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Environment Adjustment Layers on Nitrogen Transformation in Anaerobic Bioreactor Landfills	HE Zheng-kun, SONG Bo-yu, ZHU Nan-wen, <i>et al.</i> (1551)
Characteristics of Anaerobic Methane Removal Coupled to Fe(III) Reduction in Aged Refuse	WANG Li-li, HE Ting, LONG Yan, <i>et al.</i> (1558)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Tracing Sources by Pb & Sr Isotope in the Soil Profile of Woodland in Quanzhou	SUN Jing-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1566)
Accumulation and Migration Characteristics in Soil Profiles and Bioavailability of Heavy Metals from Livestock Manure	HE Meng-yuan, DONG Tong-xi, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (1576)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soils from Shandong	GE Wei, CHENG Qi-qi, CHAI Chao, <i>et al.</i> (1587)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Organophosphorus Pesticides in Typical Soil Environment of Jiangnan Plain	WANG Jian-wei, ZHANG Cai-xiang, PAN Zhen-zhen, <i>et al.</i> (1597)
Characteristics and Influencing Factors of Biologically-based Phosphorus Fractions in the Farmland Soil	CAI Guan, HU Ya-jun, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Straw Application on the Dynamics of Exogenous Nitrogen and Microbial Activity in Paddy Soil	CHEN Shan, DING Xian-qing, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (1613)
Effects of Biochar on Surface Albedo and Soil Respiration in Suburban Agricultural Soil	ZHANG Yang-yang, HU Xue-yu, ZOU Juan, <i>et al.</i> (1622)
N ₂ O Consumption Ability of Submerged Paddy Soil and the Regulatory Mechanism	WANG Ling, XING Xiao-yi, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (1633)
Non-CO ₂ Greenhouse Gas Release from Different Biological Wastewater Treatment Processes	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, LIU Wen-bo, <i>et al.</i> (1640)
Effect of Application of Sewage Sludge Composts on Greenhouse Gas Emissions in Soil	YANG Yu-han, YI Jian-ting, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1647)
Effect of Nano Zeolites on pH, CEC in Soil and Cd Fractions in Plant and Soil at Different Cadmium Levels	CHI Sun-lin, XU Wei-hong, XIONG Shi-juan, <i>et al.</i> (1654)
Dynamic Differences of Uptake and Translocation of Exogenous Selenium by Different Crops and Its Mechanism	PENG Qin, LI Zhe, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (1667)
Alleviation Effects of Exogenous Melatonin on Ni Toxicity in Rice Seedlings	LIU Shi-xiang, HUANG Yi-zong, LUO Ze-jiao, <i>et al.</i> (1675)
Forms Distribution and Ecotoxicity of Three Forms of Sulfonamides in Root-Soil Interface of Maize	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Wan-feng, <i>et al.</i> (1683)
Effect of Sediments on Bioaccumulation of Mercury in Fish Body in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	SUN Song, LI Chu-xian, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1689)
Bioaccumulation and Correlation of Heavy Metals in Human Hairs From Urban and Rural Areas of Chongqing	HE Ming-jing, LI Qi, WANG Deng-xiang, <i>et al.</i> (1697)
Microbial Community Structure and Diversity in Cellar Water by 16S rRNA High-throughput Sequencing	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (1704)
Performance Improvement of Microbial Fuel Cell with Polyaniline Doped Graphene Anode	HUANG Li-hua, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i> (1717)
Brief Introduction of Pollution Sites Remediation and Risk Assessment and Its Policy Making in United States	RONG Yue (1726)