

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第3期

Vol.38 No.3

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

我国人为源挥发性有机物反应性排放清单 梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 石田立, 孙西勃, 范丽雅, 叶代启 (845)

上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征 高爽, 张坤, 高松, 修光利, 程娜, 潘研 (855)

京津冀地区主要排放源减排对 PM_{2.5} 污染改善贡献评估 吴文景, 常兴, 邢佳, 王书肖, 郝吉明 (867)

北京冬季 PM_{2.5} 中金属元素浓度特征和来源分析 乔宝文, 刘子锐, 胡波, 刘景云, 逢妮妮, 吴方堃, 徐仲均, 王跃思 (876)

2015 年石家庄市采暖期一次重污染过程细颗粒物在线来源解析 路娜, 李治国, 周静博, 赵鑫, 杨丽丽, 冯媛, 靳伟 (884)

利用 SPAMS 研究南宁市四季细颗粒物的化学成分及污染源 刘慧琳, 陈志明, 毛敬英, 梁桂云, 黄炯丽, 李宏姣, 杨俊超, 莫招育 (894)

南半球海洋大气气溶胶单颗粒的理化特性分析 迟建伟, 李传金, 孙俊英, 张剑, 王辉, 王瀚韬, 李卫军 (903)

喷泉产生的细菌气溶胶空间分布特性 张崇森, 袁琳, 许鹏程, 刘可欣 (911)

生物滴滤塔净化含硫混合废气 叶杰旭, 缪孝平, 诸葛蕾, 赵翔宇, 江宁馨, 章晶晓, 陈东之, 陈建孟 (918)

西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征及环境污染分析 房妮, 张俊辉, 王瑾, 姜珊, 夏敦胜 (924)

城乡交错带典型溪流沟渠沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力 秦如彬, 李如忠, 高苏蒂, 张瑞钢 (936)

三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征 王静, 刘洪杰, 雷禹, 徐晶, 宋立岩, 李勇 (946)

隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素 赵登忠, 谭德宝, 李翀, 申邵洪 (954)

白洋淀多环芳烃与有机氯农药季节性污染特征及来源分析 王乙震, 张俊, 周绪申, 孔凡青, 徐铭霞 (964)

唐山陡河水库沉积物汞的分布、来源及污染评价 吴婷婷, 王明猛, 陈旭锋, 刘文利, 李太山, 闫海鱼, 何天容, 李仲根 (979)

三峡库区消落带优势草本植物淹水后汞的释放特征 邓晗, 张翔, 张成, 王永敏, 王定勇 (987)

电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评估 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 黄庭, 尹伊梦, 赵珍丽 (993)

九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 韩璐 (1002)

厦门筲箕湖表层沉积物金属元素赋存形态及污染评价 杨秋丽, 于瑞莲, 胡恭任, 林承奇, 韩璐 (1010)

龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价 李春芳, 王菲, 曹文涛, 潘健, 吕建树, 吴泉源 (1018)

碳化稻壳-铁锰氧化菌耦合净化严寒村镇高铁锰地下水效能与机制 孙楠, 谌燕丽, 张颖, 鲁岩, 宋秋霞, 李春艳, 姜昭 (1028)

高藻水臭氧预氧化过程有机物转化及消毒副产物生成势 张赛, 胡学斌, 古励, 李莉, 郭显强 (1038)

预处理对短流程超滤工艺不可逆膜污染影响的中试试验 杨海燕, 邢加建, 王灿, 孙国胜, 赵焱, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1046)

Cu-Al₂O₃ 中骨架铜类芬顿催化去除水中有机污染物 徐丹, 张丽丽, 柳丽芬 (1054)

过硫酸钾氧化去除 Cu(CN)₂ 中的氰污染物 王云飞, 李一兵, 王彦斌, 齐璠静, 赵凯, 田世超, 郭涛, 关伟, 赵旭 (1061)

微生物燃料电池强化去除农药 2,4-二氯苯氧乙酸及同步产电性能 全向春, 全燕苹, 肖竹天 (1067)

桉树遗态结构 HAP/C 复合材料对水中 Cu(II) 的吸附特征 李超, 朱宗强, 曹爽, 朱义年, 谭笑, 丁慧 (1074)

基于 A²/O 处理工艺的生活污水的成组生物毒性评价 张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1084)

污水氮浓度对粉绿狐尾藻去氮能力的影响 马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭碧玲, 孙学成, 吴金水 (1093)

全海水盐度抑制下厌氧氨氧化工艺的恢复特性 齐泮晴, 于德爽, 李津, 管勇杰, 魏思佳 (1102)

饥饿对硫自养反硝化反应器生物群落结构的影响 李芳芳, 施春红, 李海波, 袁蓉芳, 马方曜 (1109)

快速启动厌氧氨氧化工艺 闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, 程朝阳 (1116)

一种 CANON 工艺处理低氨氮废水的新模式 完颜德卿, 袁怡, 李祥, 毕贞 (1122)

侧流磷回收对低溶解氧 EBPR 系统性能的影响 马娟, 宋璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟 (1130)

厌氧氨氧化污泥群体感应信号分子检测及影响研究 陈舒涵, 李安婕, 王越兴, 吴玲娟 (1137)

有机负荷对醋糟厌氧消化系统启动的影响 戴晓虎, 于春晓, 李宁, 董滨, 戴翎翎 (1144)

过氧化钙预处理对活性污泥脱水性能的影响机制 白润英, 陈湛, 张伟军, 王东升 (1151)

不同工况蚯蚓人工湿地表层污泥处理效果 董梦珂, 李怀正, 徐一啸 (1159)

全氟辛酸对大肠杆菌的氧化胁迫和膜损伤 杨蒙, 李伟, 叶锦韶, 龙焰, 秦华明 (1167)

纳米银在环境水样和实验介质中的理化性质和毒性效应 衣俊, 程金平 (1173)

血吸虫病疫区鱼体器官中氯苯化合物的污染特征 李昆, 赵高峰, 周怀东, 张盼伟, 刘巧娜, 赵晓辉, 李东佼, 任敏, 赵丹丹 (1182)

纳米沸石对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形态、含量的影响 秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟苏琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1189)

利用 *in vitro* 方法研究不同铁矿对土壤微生物可给性的影响 钟松雄, 尹光彩, 黄润林, 何宏飞, 陈志良, 林亲铁, 王文科 (1201)

不锈钢电极对重金属污染土壤的强化电动修复及电极腐蚀结晶现象与机制 温东东, 付融冰, 张卫, 顾莹莹 (1209)

施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变 刘晓, 黄林, 郭康莉, 张雪凌, 杨俊诚, 姜慧敏, 张建峰 (1218)

施氮和水分管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究 王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 汤珍珠, 庞静, 李宝珍, 苏以荣, 葛体达, 吴金水 (1227)

模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响 陈书涛, 孙鹭, 桑琳, 胡正华 (1235)

土壤硝化和反硝化微生物群落及活性对大气 CO₂ 浓度和温度升高的响应 刘远, 王光利, 李恋卿, 潘根兴 (1245)

岩性对喀斯特灌丛土壤固氮菌与丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (1253)

板栗产区有机堆肥产物磷形态特征及其对叶片磷含量的影响 宋影, 郭素娟, 张丽, 孙慧娟, 谢明明, 武燕奇, 王静 (1262)

酸性物质对猪粪秸秆堆肥过程中氮素转化的影响 姜继超, 尧倩 (1272)

《环境科学》征稿简则(1092) 《环境科学》征订启事(1158) 信息(1166,1261,1271)

土壤硝化和反硝化微生物群落及活性对大气 CO₂ 浓度和温度升高的响应

刘远¹, 王光利^{1*}, 李恋卿², 潘根兴²

(1. 淮北师范大学生命科学学院, 淮北 235000; 2. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 硝化和反硝化微生物参与土壤氮循环转化过程, 大气 CO₂ 浓度和温度升高可能会影响它们的群落结构和活性. 本试验依托稻-麦轮作农田系统气候变化平台研究大气 CO₂ 浓度单独升高 (CE)、升温 (WA) 以及两者同时升高 (CW) 对麦田土壤硝化和反硝化微生物基因丰度、群落结构和活性的影响. 结果表明, 在小麦分蘖期, 大气 CO₂ 浓度和温度升高对氨氧化细菌 (AOB) 和反硝化细菌丰度没有影响, 而在抽穗和成熟期, CO₂ 浓度单独升高显著提高了氨氧化古菌 (AOA) 和反硝化细菌丰度, 升温处理对其没有显著影响. 通过对 T-RFLP 数据分析发现, 大气 CO₂ 浓度和温度升高对土壤 AOA、AOB 和反硝化细菌群落结构没有显著影响, 但是在一定程度上改变了 AOA 和反硝化细菌多样性. 另外, CO₂ 浓度单独升高处理显著提高了成熟期的土壤硝化速率, 不同气候变化处理对反硝化速率没有显著影响. 研究表明大气 CO₂ 浓度和温度升高对不同生育期的微生物群落影响存在差异, 而且功能微生物对不同气候变化因子处理的响应也各不相同.

关键词: CO₂ 浓度升高; 温度升高; 冬小麦; 氨氧化细菌; 氨氧化古菌

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)03-1245-08 DOI: 10.13227/j.hjx.201608139

Response of Soil Nitrifier and Denitrifier Community and Activity to Elevated Atmospheric CO₂ Concentration and Temperature

LIU Yuan¹, WANG Guang-li^{1*}, LI Lian-qing², PAN Gen-xing²

(1. College of Life Science, Huaibei Normal University, Huaibei 235000, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature may affect nitrifiers and denitrifiers which are related to soil N turnover. A climate change experiment was conducted in the rice-wheat rotation ecosystem. This study was used to investigate effects of elevated CO₂ and temperature on soil microbial community structure, as well as abundance and activity of nitrifiers and denitrifiers. The results showed that no change in the abundance of ammonia-oxidizing bacteria (AOB) and denitrifier was observed at the tillering stage, however at the later stages, elevated CO₂ alone significantly increased the abundance of ammonia-oxidizing archaea (AOA) and denitrifier but there were no changes under CW treatment. The analysis of T-RFLP profiles showed that elevated CO₂ and temperature had no obvious effect on community structure of AOA, AOB or denitrifier, but altered diversity index (*H'*) of AOA and denitrifier. Moreover, elevated CO₂ alone significantly increased nitrifying rate at the ripening stage. Elevated CO₂ and temperature did not result in significant change in denitrifying rate at each single stage. These results suggested that effects of elevated CO₂ and temperature on microbial community were different among the tillering, heading and ripening stages, and functional microorganism responded differently to multiple climate change treatments.

Key words: elevated atmospheric CO₂; elevated temperature; winter wheat; ammonia-oxidizing bacteria; ammonia-oxidizing archaea

土壤氮循环是地球化学循环的重要组成部分, 不但影响着土壤生产力和可持续发展, 还影响着全球气候变化^[1]. 土壤微生物在土壤氮循环中发挥着不可替代的作用, 其中硝化和反硝化微生物是土壤氮循环的重要驱动者, 对土壤中 N 浓度、N 损失、N₂O 的排放有关键的调节作用, 因而它们在土壤氮库调节方面起着不可替代的作用^[2].

硝化作用主要指土壤中硝化菌将氨盐氧化成硝酸盐的过程, 该过程分为氨氧化和亚硝酸氧化两个阶段, 是土壤生物过程产生 N₂O 的来源之一. 氨的氧化是硝化过程的限速步骤, 参与氨氧化的微生物

包括氨氧化古菌 (ammonia-oxidizing archaea, AOA) 和氨氧化细菌 (ammonia-oxidizing bacteria, AOB)^[3]. 反硝化作用是指在厌氧条件下, 由反硝化细菌将硝酸盐还原成 NO、N₂O 和 N₂ 的过程^[4], 这一过程通常导致土壤有效氮的损失, 被认为是大气中 N₂O 的主要来源. 反硝化作用最为关键的一步反

收稿日期: 2016-08-21; 修订日期: 2016-09-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41501304, 31100083); 农业部公益性行业(农业)科研专项 (200903003)

作者简介: 刘远 (1986 ~), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究全球气候变化和土壤微生物分子生态, E-mail: liuyuan0813@aliyun.com

* 通信作者, E-mail: wanf-3344@163.com

应是在亚硝酸盐还原酶催化下将 NO_2^- 还原为 NO 的过程,此酶包括含细胞色素 *cd1* 的还原酶 *NirS* 和含 Cu 的还原酶 *NirK*^[5],分别由基因 *nirS* 和 *nirK* 编码. 这两个基因已成为研究反硝化细菌多样性及其丰度的常用分子标记物.

以大气 CO_2 浓度和温度升高为主要特征的气候变化提高了植物的生长发育,对土壤环境产生了直接和间接地影响,并通过影响植物生长而间接地影响土壤微生物^[6]. 由于土壤微生物对气候变化引起的环境因子的改变比较敏感,全球气候变化将改变 N 循环过程中的微生物^[7]. 有研究表明,大气 CO_2 浓度升高对土壤硝化和反硝化的微生物过程有重要的影响^[2,8]. 大气 CO_2 浓度升高和升温等因素改变了氨氧化菌的群落结构和丰度^[9,10]. Baggs 等^[11]发现在草地 FACE (free air CO_2 enrichment, 开放式空气 CO_2 浓度升高) 条件下反硝化活性明显增强,其原因主要是地下碳的增加为反硝化提供了能量. 但是,利用 FACE 系统平台有研究发现大气 CO_2 浓度升高并未明显改变土壤硝化和反硝化菌群的数量^[12,13]. 升温会增强土壤微生物的活性进而促进土壤有机质分解和无机氮的释放,同时,还会影响参与氮循环过程的氨氧化细菌和古菌、反硝化细菌,进而改变由此驱动的土壤硝化和反硝化过程^[14,15].

由于 CO_2 浓度和温度升高的水平、土壤特性和植物类型的不同,土壤微生物对不同气候变化因子的响应也存在差异^[16,17]. 本课题组依托同步模拟大气 CO_2 浓度和温度气候变化基地,以我国太湖地区稻麦轮作系统为研究对象. 在水稻生长季,本研究发现在水稻不同生育期,AOA 和 AOB 对大气 CO_2 浓度升高和升温的响应存在差异;同时,大气 CO_2 浓度升高处理显著提高了稻田土壤硝化速率,而单独升温只在抽穗期提高土壤硝化速率^[18]. 由于小麦和水稻季的水分管理方式不同,因此,麦田土壤 N 循环功能微生物群落对大气 CO_2 浓度升高和升温的响应势必与水稻土壤有所不同. 为此,本试验以小麦季作为研究对象,分析大气 CO_2 浓度和温度升高对土壤 N 循环微生物的影响及其作用机制,可帮助人们在未来全球气候变化背景下,进一步完善对农田生态系统响应的认识,提高作物对未来全球变化的适应能力.

1 材料与方 法

1.1 试验地概况与试验设计

气候变化试验基地位于江苏省常熟市古里镇

($31^\circ30'N$, $120^\circ33'E$). 该地区属于亚热带季风气候,年平均温度 16°C ,年平均降水量大于 $1\ 100\ \text{mm}$,年日照时间大于 $2\ 000\ \text{h}$,年无霜期大于 $200\ \text{d}$,对太湖地区的生态环境、气候特征具有广泛的代表性. 耕作方式为夏水稻、冬小麦轮作. 该地区土壤类型为太湖地区典型的水稻土-乌栅土,表层土壤($0\sim15\ \text{cm}$)基本性质: pH 为 7.0 ,容重为 $1.2\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,有机碳含量 $19.2\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,总氮含量 $1.6\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,总磷含量 $0.9\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,总钾含量 $15.0\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

本试验平台为模拟未来近地表大气 CO_2 浓度升高(500×10^{-6})和温度升高(2°C)对农业系统的影响. 该模拟气候变化平台建于 2010 年,共设置 4 个处理: 大气 CO_2 浓度升高处理 (atmospheric CO_2 enrichment, CE); 温度升高处理 (warming of canopy air, WA); 大气 CO_2 浓度和温度同时升高处理 (interactive CO_2 enrichment and warming, CW),以及正常 CO_2 浓度和温度的对照处理 (CK). 每个处理各设 3 个重复,共计 12 个处理小区,每个试验圈为八边形构造,面积约 $45\ \text{m}^2$. 为了避免设备干扰的影响,所有处理圈从外观上保持一致, CO_2 处理圈和对照圈中均安装了升温圈中的红外灯罩,升温处理圈安装了 CO_2 释放管. 平台设计如图 1 所示.



图 1 野外模拟气候变化试验平台示意

Fig. 1 Schematic diagram of simulated climate change field condition platform

1.2 土壤样品的采集

小麦供试品种为扬麦 14 号,在 2012 年 11 月水稻收获后即种植小麦. 选取了小麦季 3 个生育期进行采样: 分蘖期 (3 月 5 日)、抽穗期 (4 月 24 日) 和成熟期 (5 月 23 日),采集 $0\sim15\ \text{cm}$ 的耕层根际土壤. 根据不同生育期植株根系发育情况不同,随机选择 $3\sim5$ 株植株,采用抖根法收集根围 $0\sim2\ \text{mm}$ 范围内土壤作为根际土壤,每个圈内根际土壤充分混合. 混合新鲜土样去除碎石、秸秆及动植物残体后过 $2\ \text{mm}$ 筛,过筛后的混合样品被装入无菌自封

袋于低温带回实验室. 将样品分为 2 份: 第一份存储于 4℃ 冰箱, 以测定土壤硝化和反硝化速率; 第二份存储于 -20℃, 以供土壤总 DNA 提取.

1.3 定量 PCR 技术 (qPCR) 测定土壤微生物丰度

采用 MOBIO 公司的土壤 DNA 快速提取试剂盒 (PowerSoil™ DNA Isolation Kit, Mo Bio Laboratories Inc., CA) 提取土壤微生物基因组 DNA. 用 NanoDrop ND-1000 微量分光光度计测定 DNA 浓度, 然后稀释到 15 ng·μL⁻¹.

功能基因的定量分析采用 SYBR GREEN 法, 反硝化细菌功能基因 *nirK*、AOA 和 AOB 的 *amoA* 基因的定量分析引物分别为 *nirK876/nirK1040*、Arch-*amoAF/Arch-amoAR*、*amoA-1F/amoA-2R*. 定量 PCR 采用 25 μL 反应体系: 12.5 μL 扩增酶混合物 SYBR premix EX Taq™, 9.5 μL 无菌超纯水, 10 μmol·L⁻¹ 正反向引物各 1 μL, DNA 模板 1 μL (15 ng). 每次扩增均做溶解曲线分析以确保荧光信号来自于目标 PCR 产物而非引物二聚体或其它杂质. 本试验用于制作标准曲线的质粒的拷贝数为 10³ ~ 10⁹, AOA 的 PCR 扩增效率在 98% 和 109% 之间, R² 值大于 0.99, AOB 的 PCR 扩增效率在 95% 和 106% 之间, R² 值大于 0.98, 反硝化菌 (*nirK*) 的 PCR 扩增效率在 92% 和 104% 之间, R² 值大于 0.98. 结果以每克干土重的基因拷贝数 (copies·g⁻¹) 表示.

1.4 末端限制性片段多态性分析 (terminal-restriction fragment length polymorphism, T-RFLP) 技术测定土壤微生物群落结构

用具有 6-FAM 标记的上述引物分别扩增 AOA、AOB 和反硝化细菌基因片段. 扩增体系为 50 μL: 25 μL 扩增反应液 (Go Taq Green Master Mix, Promega), 10 μmol·L⁻¹ 正反向引物各 2 μL, 20 μL 无菌水及 1 μL DNA 模板. AOA 和 AOB 纯化产物分别用 *HhaI* 和 *AfaI* (Takara) 酶切消化, 反硝化细菌纯化产物用 *HaeIII* (Takara) 酶切消化. 酶切反应体系: 10 × Buffer 2 μL, DNA 200 ng, 0.1% BSA (bovine serum albumin, 牛血清白蛋白) 2 μL, 无菌水补足 20 μL. 将酶切产物送上海生工测序. T-RFLP 图谱中选择的限制性片段 (T-RF) 范围在 50 ~ 550 bp, 在平行试验的图谱中重复出现的峰纳入统计分析, 并去除丰度 < 1% 的 T-RFs. 每个 T-RF 的相对丰度为其峰高占总峰高的比值, T-RFs 片段大小 ± 1bp 被认为是同一片段. 根据图谱中 T-RFs 的数目及其相对丰度进行主成分分析和多样性指数 (香农指数) 计算, 香农指数 (Shannon index) 的计算

公式如下:

$$\text{Shannon index} = - \sum (n_i/N) \cdot \ln(n_i/N)$$

式中, n_i 是第 i 个 T-RF 的相对丰度值, i 是 T-RFLP 图谱上的每个 T-RF 的编号, N 是 T-RFLP 图谱上每个样品所有选择 T-RF 的相对丰度总和.

1.5 土壤硝化和反硝化速率的测定

用短期培养方法测定土壤硝化速率^[19]. 称取 20 g 新鲜土样于 250 mL 三角瓶中, 向其中加入 100 mL 0.5 mmol·L⁻¹ 磷酸缓冲液 (pH 7.2), 该缓冲液中含有 0.5 mmol·L⁻¹ (NH₄)₂SO₄ 和 10 mmol·L⁻¹ KClO₃ (阻止 NO₂⁻ 进一步氧化). 25℃ 恒温振荡 24 h, 在培养 4、8、12 和 24 h 时, 取出 5 mL 土壤悬浊液, 立即加入 5 mL 3.5 mol·L⁻¹ KCl 溶液以阻止 NH₄⁺ 进一步氧化, 3 000 r·min⁻¹ 离心 5 min. 取 5 mL 滤液到 25 mL 比色管中, 再加入 2 mL 对氨基苯磺酸 (H₂NC₆H₄SO₃H, 4 g·L⁻¹) 和 1 mL 盐酸萘乙二胺 (C₁₂H₁₆N₂Cl₂, 2 g·L⁻¹) 试剂, 最后用去离子水定容至 25 mL. 0.5 h 后, 用紫外/可见分光光度计在波长 538 nm 比色测定. 试验处理中设空白对照. 在 NO₂⁻ 产生随时间而增加的线性范围, 以培养 12 h 内 NO₂⁻ 浓度的净增加量为土壤的硝化速率, 单位为 mg·(kg·h)⁻¹.

反硝化速率测定采用淹水厌氧密闭培养-乙炔抑制法. 称取 20 g 新鲜土样于 250 mL 三角瓶中, 按水土比 1:1 加入 1 mmol·L⁻¹ 葡萄糖和 1 mmol·L⁻¹ 硝酸钾的混合溶液, 用橡胶塞密封瓶口, 向瓶中通入高纯 N₂ 以除尽瓶中的空气. 用 50 mL 注射器取出一定量的气体, 然后加入相同量的 C₂H₂, 使玻璃瓶内 C₂H₂ 终体积分数为 10%, 然后立即将采气口用硅胶密封以确保瓶内为厌氧环境. 将玻璃瓶置于 25℃ 摇床上振荡 (200 r·min⁻¹) 培养 9 h, 每隔 1.5 h 间隔采集气体, N₂O 测定以带有 ECD 电子捕获检测器的气相色谱仪 (Agilent 7890A, 美国) 进行, 最后计算加入 C₂H₂ 后 9 h 内的 N₂O 线性增加量.

1.6 数据处理

所有结果表示为平均值 ± 标准差. 用方差分析 (ANOVA) 检验同一采样时期处理之间差异是否显著 (Duncan-test). 相关性用直线相关分析, 采用 Spearman 相关系数计算, 双尾显著性检验. 微生物群落结构与环境因子关系的分析用 CANOCO 4.5 软件中的冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 来完成.

2 结果与分析

2.1 大气 CO₂ 浓度和温度升高对土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量的影响

从表 1 可以看出,土壤 NH₄⁺-N 含量随着小麦生长而逐渐升高,在成熟期达到最高 (CW, 8.29

mg·kg⁻¹); 但是,土壤 NO₃⁻-N 含量随着小麦生长而逐渐降低,在成熟期达到最低 (CK, 6.64 mg·kg⁻¹). 在小麦季 3 个生育期内,不同气候变化处理对土壤 NH₄⁺-N 含量没有影响,而在成熟期,CE、CW 和 WA 处理的 NO₃⁻-N 浓度比对照显著提高 ($P < 0.05$).

表 1 土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量以及 AOA、AOB 和反硝化细菌多样性指数 (H')¹⁾

Table 1 Concentrations of soil NH₄⁺-N and NO₃⁻-N, Shannon-Wiener index (H') of AOA, AOB and denitrifier

采样时期	处理	NH ₄ ⁺ -N/mg·kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N/mg·kg ⁻¹	AOA (H')	AOB (H')	反硝化细菌(H')
分蘖期	CK	4.84 ± 1.25a	10.22 ± 2.50a	1.18 ± 0.06c	1.74 ± 0.07a	2.06 ± 0.03a
	CE	4.55 ± 0.33a	12.35 ± 1.63a	1.29 ± 0.02ab	1.78 ± 0.02a	1.91 ± 0.03b
	CW	3.99 ± 1.73a	10.39 ± 1.32a	1.35 ± 0.02a	1.72 ± 0.02a	1.96 ± 0.03b
	WA	4.34 ± 0.37a	11.55 ± 2.11a	1.24 ± 0.05c	1.77 ± 0.03a	2.04 ± 0.03a
抽穗期	CK	5.77 ± 1.47a	7.79 ± 1.09a	1.11 ± 0.09c	1.76 ± 0.01ab	2.15 ± 0.02a
	CE	6.28 ± 0.65a	8.93 ± 0.95a	1.25 ± 0.02ab	1.70 ± 0.04b	2.04 ± 0.09b
	CW	5.89 ± 0.90a	9.67 ± 1.00a	1.16 ± 0.05bc	1.73 ± 0.02ab	2.11 ± 0.04ab
	WA	4.55 ± 0.11a	9.05 ± 2.23a	1.27 ± 0.05a	1.79 ± 0.06a	2.05 ± 0.02ab
成熟期	CK	7.69 ± 1.37a	6.64 ± 0.28c	0.77 ± 0.08ab	1.50 ± 0.07ab	2.27 ± 0.02b
	CE	8.80 ± 0.17a	8.58 ± 0.42b	0.74 ± 0.03b	1.58 ± 0.01a	2.35 ± 0.08ab
	CW	8.29 ± 0.71a	8.87 ± 0.31b	0.90 ± 0.06a	1.59 ± 0.06a	2.41 ± 0.04a
	WA	7.86 ± 0.62a	9.82 ± 0.80a	0.72 ± 0.11b	1.47 ± 0.02b	2.29 ± 0.04b

1) 不同字母代表同一采样时期不同处理之间的差异显著 ($P < 0.05$, $n = 3$)

2.2 大气 CO₂ 浓度和温度升高对硝化和反硝化微生物丰度的影响

小麦季土壤 AOA、AOB 和反硝化细菌基因拷贝数如图 2 所示, AOA 和 AOB 基因丰度分别在 $8.63 \times 10^6 \sim 3.27 \times 10^7$ copies·g⁻¹ 和 $3.07 \times 10^6 \sim 4.14 \times 10^7$ copies·g⁻¹, 其对大气 CO₂ 浓度升高和升温的响应存在差异. 与对照相比, CE 和 WA 处理显著提高了 AOA 丰度, 而 CW 处理对其没有影响. 但是, 在抽穗期和成熟期, CE 处理显著提高了 AOB 丰度, CW 处理仅是提高了抽穗期的 AOB 丰度, 而 WA 处理降低了成熟期的 AOB 丰度.

相对于土壤 AOA 和 AOB, 反硝化细菌数量相对较高, 基因数量在 $3.68 \times 10^7 \sim 1.23 \times 10^8$ copies·g⁻¹. 在分蘖期, 不同处理的反硝化细菌丰度没有显著变化; 而在抽穗和成熟期, CE 处理的反硝化细菌丰度与对照相比显著提高, 而 CW 和 WA 处理的反硝化细菌丰度没有变化.

2.3 大气 CO₂ 浓度和温度升高对硝化和反硝化微生物群落结构的影响

本试验通过 T-RFLP 技术对土壤 N 循环功能微生物群落结构进行分析, 其多样性结果如表 1 所示, AOA、AOB 和反硝化细菌多样性对大气 CO₂ 浓度升高和升温有不同的响应. 在分蘖期和抽穗期, CE

和 CW 处理提高了 AOA 多样性, WA 处理提高了抽穗期的 AOA 多样性, 而在成熟期, 气候变化处理对 AOA 多样性没有影响. 但是, AOB 群落在模拟气候变化条件下比较稳定, CE、CW 和 WA 处理对 AOB 多样性均无影响. 相反, 反硝化细菌多样性在小麦不同生育期对 CO₂ 浓度升高和升温的响应各不相同.

对微生物群落结构组成与环境变量、基因丰度进行了冗余分析 (RDA), 结果 (如图 3 和图 4) 表明, X 轴和 Y 轴分别能够解释 AOA、AOB 和反硝化细菌群落结构总变异量的 53%、53% 和 51%, 在分蘖、抽穗和成熟期之间, AOA、AOB 和反硝化细菌群落没有明显分开. 在所分析的 5 个变量中, NH₄⁺-N 和 AOA 基因丰度对 AOA 基因的多样性组成具有显著影响, NH₄⁺-N 和 AOB 基因丰度对 AOB 基因的多样性组成具有显著影响, 而只有 *nirK* 基因丰度对反硝化细菌基因丰度具有显著影响.

2.4 大气 CO₂ 浓度和温度升高对硝化速率的影响

小麦季土壤的硝化和反硝化速率如图 5 所示, 硝化速率的变化从 $1.15 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ (WA, 抽穗期) 到 $5.09 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ (CE, 成熟期). 土壤硝化速率在抽穗期最低, 但在成熟期达到最高值. 在小麦分蘖和抽穗期, CE、CW 和 WA 处理的硝化速

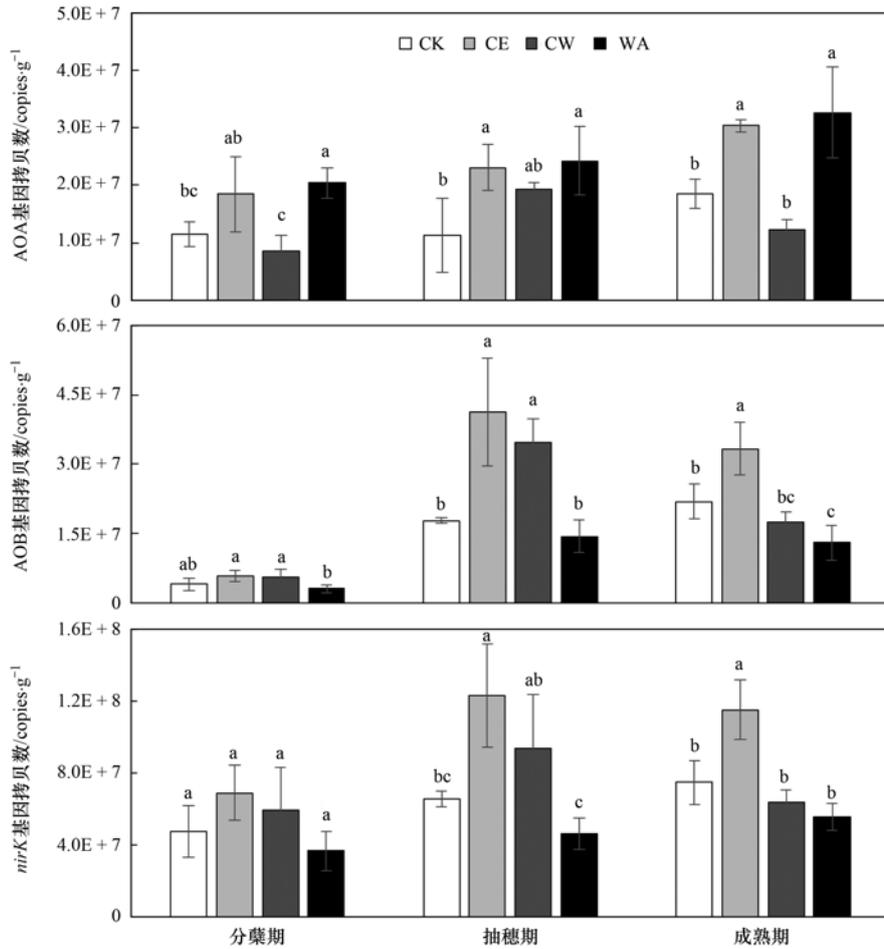


图 2 AOA、AOB 和反硝化细菌功能基因丰度

Fig. 2 Abundance of AOA, AOB and denitrifier genes

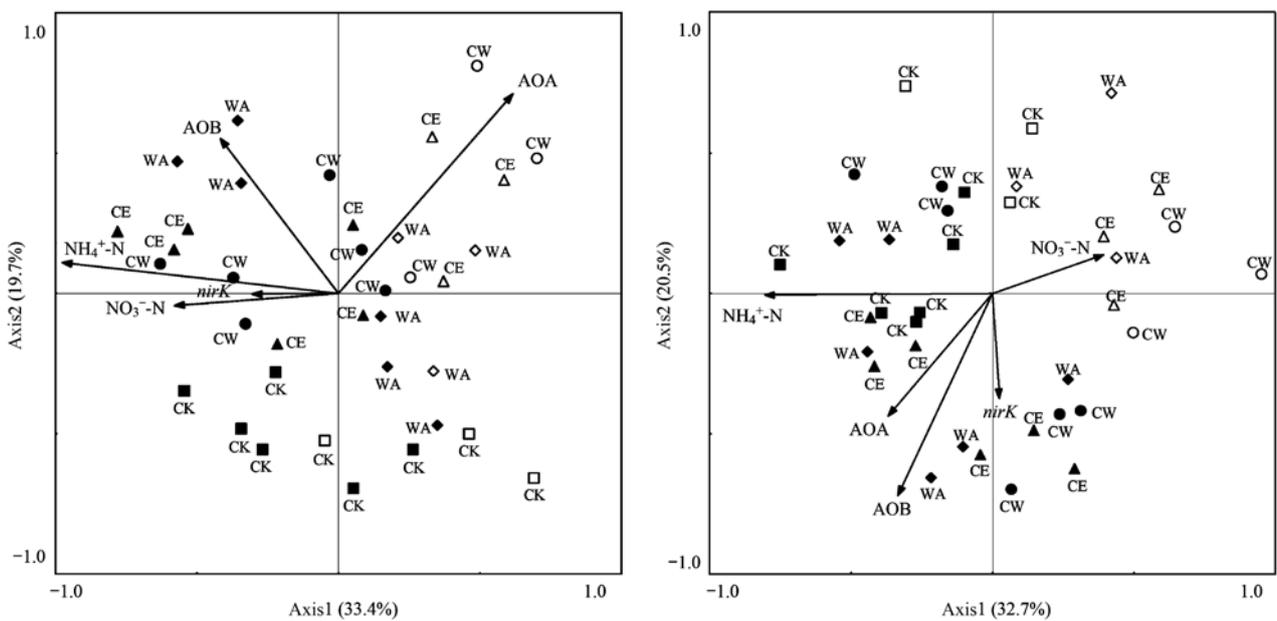


图 3 土壤 AOA 和 AOB 基因群落与土壤基本性质的 RDA 分析

Fig. 3 RDA analysis based on the T-RFLP patterns and soil properties of AOA and AOB in sampled soils

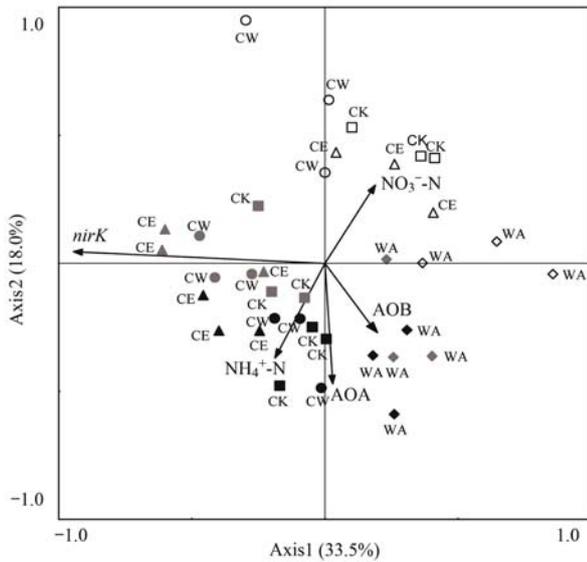


图 4 土壤反硝化细菌群落与土壤基本性质的 RDA 分析

Fig. 4 RDA analysis based on the T-RFLP patterns and soil properties of denitrifier in sampled soils

率与对照相比没有变化,而在成熟期,CE、CW 和 WA 处理提高了土壤硝化速率,其中 CE 处理的提高幅度达到了显著水平 ($P < 0.05$)。土壤反硝化速率范围从 $41.97 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ (CW, 分蘖期) 到 $139.62 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ (CE, 成熟期),反硝化速率随着小麦生长生育期逐渐升高,在成熟期时达到最大值。但是,与 CK 相比,3 个生育期内的 CE、CW 和 WA 处理反硝化速率都没有显著变化 ($P >$

表 2 土壤理化指标、基因丰度及活性的相关分析¹⁾

Table 2 Correlations among soil physiochemical properties, gene abundances and activities

	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	AOA <i>amoA</i>	AOB <i>amoA</i>	<i>nirK</i>	硝化速率	反硝化速率
$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	1						
$\text{NO}_3^- \text{-N}$	-0.459	1					
AOA <i>amoA</i>	0.380	-0.011	1				
AOB <i>amoA</i>	0.583	-0.522	0.330	1			
<i>nirK</i>	0.307	-0.185	0.235	0.800	1		
硝化速率	0.505	0.046	0.175	-0.082	0.041	1	
反硝化速率	0.313	-0.527	0.303	0.233	0.289	0.430	1

1) 黑体字表示相关显著或极显著

3 讨论

土壤中 CO_2 浓度大约是大气中 CO_2 浓度的 50 倍^[20],大气 CO_2 浓度升高对土壤微生物的影响是间接的,即通过植物光合产物及根系分泌物的变化而影响。有研究表明, CO_2 浓度升高促进植物光合作用和根系生长,增加了根系生物量,导致根际分泌物和沉积物有所增加^[21,22],为土壤硝化和反硝化微生物生长提供了更多的能源和 C 源,从而促进土壤微

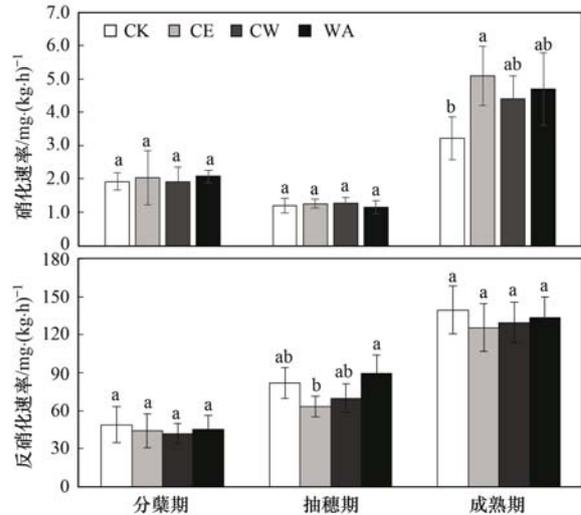


图 5 土壤硝化速率和反硝化速率

Fig. 5 Nitrifying and denitrifying rates in sampled soils

0.05)。

2.5 土壤理化性质、微生物基因丰度及活性的相关性分析

从表 2 可知,硝化速率与 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度具有显著的正相关关系,反硝化速率与 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度呈现显著负相关关系,但硝化和反硝化速率与功能微生物基因丰度之间均无明显的相关性。同时, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度与 AOA、AOB 基因丰度及硝化速率之间呈显著的正相关关系,而 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度与 AOB 基因丰度及反硝化速率表现出显著负相关关系。

生物的生长。同时,升温促进土壤微生物的活性,进而加速有机质的降解速率和土壤氮的矿化速率,升温还会影响土壤氮循环的功能微生物^[23,24]。本研究表明,大气 CO_2 浓度升高和升温对土壤硝化和反硝化细菌数量产生了显著影响。但是,Nelson 等^[10]利用平原 SoyFACE 平台研究发现, CO_2 浓度升高对玉米和大豆根际土壤氨氧化古菌和细菌丰度没有影响。Long 等^[25]在温带森林生态系统中研究发现, CO_2 浓度升高显著提高了氨氧化古菌丰度,而对氨

氧化细菌丰度没有影响. 这种差异可能与农作物类型、土壤养分状况和 CO₂ 浓度升高方式有很大关系. 因此, 大气 CO₂ 浓度升高和升温对土壤中硝化和反硝化的微生物过程有直接的和间接的影响, 而多数研究结论差异明显, 至今还没有统一的结论.

岳进等^[12]研究发现, CO₂ 浓度升高处理下硝化细菌的数量随着小麦生长发育会间歇性出现正、负效应, 但是对反硝化细菌没有显著地影响. CO₂ 浓度升高和升温等因素改变了氨氧化菌的群落结构和丰度^[9,10]. 如图 2 结果所示, 在水稻的抽穗期和成熟期, CO₂ 浓度单独升高处理的 AOA、AOB 和反硝化细菌丰度比对照显著升高. 一般认为 CO₂ 浓度升高促进了植物的光合作用, 通过根系分泌物和植物凋落物而提高土壤中有有机碳底物, 为 AOA、AOB 和反硝化细菌提供了额外的 C 源和能源. 小麦冠层温度升高 2℃ 对土壤温度的影响较小 (< 1℃), 而升温通过小麦的间接作用对 AOB 和反硝化细菌也没有明显影响 (图 2). Malchair 等^[26]发现温度升高 3℃ 使土壤氨氧化细菌群落结构发生变化, 其丰富度降低, 然而其还不能证明这种变化是由于温度的直接作用, 还是通过植物带来的间接作用. 本研究结果显示, 单独升温却显著促进了麦田土壤 AOA 丰度, 这可能与土壤 AOA 群落特性有关系, Stopnišek 等^[27]研究结果显示 AOA 丰度与土壤小分子有机碳的相关性比与无机氮的相关性更显著. 目前有关温度升高对土壤氮循环功能微生物的研究还很少, 未来的研究应在这方面加强.

通过室内培养测定, 小麦季硝化速率范围在 1.15 ~ 5.09 mg·(kg·h)⁻¹, 本研究发现大气 CO₂ 浓度升高和升温对小麦分蘖和抽穗期的土壤硝化速率没有影响, 而 CO₂ 浓度单独升高处理显著提高了成熟期土壤硝化速率 (图 5). 在小麦成熟期, 根的生物量和根系沉降物、分泌物较高, 土壤 AOA 和 AOB 数量在 CO₂ 浓度升高处理中显著提高, 这可能是硝化速率提高的原因. 胡君利等^[13]利用 FACE 系统研究发现, CO₂ 浓度升高增强了低氮土壤的硝化活性, 降低了常氮土壤的硝化活性, 这说明 CO₂ 浓度升高对农田土壤硝化活性的影响与施氮肥量有直接关系. 一些研究表明, 升高 CO₂ 浓度促进了土壤总矿化作用^[28], 进而通过影响土壤 NH₄⁺ 有效性而改变硝化活性. NH₄⁺ 作为土壤硝化作用的底物, 是硝化强度的限制因子, 而在本研究中发现大气 CO₂ 浓度升高和升温对麦田土壤 NH₄⁺ 浓度没有影响. 土壤中氮的转化受施氮量、作物类型、土壤水分含量等

因素的调控, 甚至在植物不同生长期会对大气 CO₂ 浓度升高和升温做出截然不同的反应, 因此, 在这方面的研究也有待于进一步加强.

4 结论

大气 CO₂ 浓度和温度升高对土壤 AOA、AOB 和反硝化细菌群落结构没有明显影响, 但是在一定程度上改变了 AOA 和反硝化细菌多样性. 在小麦分蘖期, 大气 CO₂ 浓度和温度升高对 AOB 和反硝化细菌丰度没有影响, 而在抽穗和成熟期, CO₂ 浓度单独升高显著提高了 AOB 和反硝化细菌丰度, 升温处理对其没有显著影响. 同时, 不同功能微生物的丰度对大气 CO₂ 浓度升高和升温表现出不同的响应. 以上结果表明, 土壤 AOA、AOB 和反硝化细菌群落对气候变化的响应在小麦不同生育期存在差异.

致谢: 本试验的现场采样工作由常熟市古里镇气候变化监测站完成, 在此对工作站的工作人员潘根福等表示感谢.

参考文献:

- [1] 贺纪正, 张丽梅. 氨氧化微生物生态学与氮循环研究进展 [J]. 生态学报, 2009, 29(1): 406-415.
He J Z, Zhang L M. Advances in ammonia-oxidizing microorganisms and global nitrogen cycle [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 406-415.
- [2] Carol M, Hogenboom L, Jach M E, et al. Elevated atmospheric CO₂ in open top chambers increases net nitrification and potential denitrification [J]. Global Change Biology, 2002, 8(6): 590-598.
- [3] 贾仲君, 翁佳华, 林先贵, 等. 氨氧化古菌的生态学研究进展 [J]. 微生物学报, 2010, 50(4): 431-437.
Jia Z J, Weng J H, Lin X G, et al. Microbial ecology of archaeal ammonia oxidation - a review [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2010, 50(4): 431-437.
- [4] Zumft W G. Cell biology and molecular basis of denitrification [J]. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 1997, 61(4): 533-616.
- [5] Philippot L, Hallin S, Schloter M. Ecology of denitrifying prokaryotes in agricultural soil [J]. Advances in Agronomy, 2007, 96: 249-305.
- [6] 陈利军, 武志杰, 黄国宏, 等. 大气 CO₂ 增加对土壤脲酶、磷酸酶活性的影响 [J]. 应用生态学报, 2002, 13(10): 1356-1357.
Chen L J, Wu Z J, Huang G H, et al. Effect of elevated atmospheric CO₂ on soil urease and phosphatase activities [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(10): 1356-1357.
- [7] 沈菊培, 贺纪正. 微生物介导的碳氮循环过程对全球气候变化的响应 [J]. 生态学报, 2011, 31(11): 2957-2967.
Shen J P, He J Z. Responses of microbes-mediated carbon and nitrogen cycles to global climate change [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(11): 2957-2967.

- [8] 王旻屹, 韩琳, 史奕, 等. 开放式大气 CO₂ 浓度增高对水稻土反硝化活性的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2007, **33**(3): 284-289.
Wang S Y, Han L, Shi Y, *et al.* Effects of FACE on denitrification activity in paddy-field soil[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2007, **33**(3): 284-289.
- [9] Horz H P, Barbrook A, Field C B, *et al.* Ammonia-oxidizing bacteria respond to multifactorial global change[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, **101**(42): 15136-15141.
- [10] Nelson D M, Cann I K O, Mackie R I. Response of archaeal communities in the rhizosphere of maize and soybean to elevated atmospheric CO₂ concentrations[J]. PLoS One, 2010, **5**(12): e15897.
- [11] Baggs E, Richter M, Cadisch G, *et al.* Denitrification in grass swards is increased under elevated atmospheric CO₂ [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, **35**(5): 729-732.
- [12] 岳进, 史奕, 黄国宏, 等. 大气 CO₂ 浓度增高对麦田土壤硝化和反硝化细菌的影响[J]. 生态学杂志, 2004, **23**(5): 67-70.
Yue J, Shi Y, Huang G H, *et al.* Effects of FACE (free-air carbon dioxide enrichment) on nitrifiers and denitrifiers in wheat field soil[J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, **23**(5): 67-70.
- [13] 胡君利, 褚海燕, 林先贵, 等. 大气 CO₂ 浓度增高对农田土壤硝化活性的影响[J]. 生态环境, 2005, **14**(3): 329-332.
Hu J L, Chu H Y, Lin X G, *et al.* Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration on soil nitrification activities[J]. Ecology and Environment, 2005, **14**(3): 329-332.
- [14] Ross D J, Tate K R, Newton P C D. Elevated CO₂ and temperature effects on soil carbon and nitrogen cycling in ryegrass/white clover turves of an Endoaquept soil[J]. Plant and Soil, 1995, **176**(1): 37-49.
- [15] Ross D J, Saggart S, Tate K R, *et al.* Elevated CO₂ effects on carbon and nitrogen cycling in grass/clover turves of a Psammaquept soil[J]. Plant and Soil, 1996, **182**(2): 185-198.
- [16] Carney K M, Hungate B A, Drake B G, *et al.* Altered soil microbial community at elevated CO₂ leads to loss of soil carbon [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, **104**(12): 4990-4995.
- [17] Drigo B, Pijl A S, Duyts H, *et al.* Shifting carbon flow from roots into associated microbial communities in response to elevated atmospheric CO₂ [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, **107**(24): 10938-10942.
- [18] Liu Y, Zhou H M, Wang J Q, *et al.* Short-term response of nitrifier communities and potential nitrification activity to elevated CO₂ and temperature interaction in a Chinese paddy field[J]. Applied Soil Ecology, 2015, **96**: 88-98.
- [19] Tabatabai M A. Soil enzymes[A]. In: Weaver R W, Angle J S, Bottomley P S (Eds.). Methods of Soil Analysis: Part 2. Microbiological and Biochemical Properties[M]. Madison: Soil Science Society of America, 1994. 775-833.
- [20] 徐国强, 李杨, 史奕, 等. 开放式空气 CO₂ 浓度增高 (FACE) 对稻田土壤微生物的影响[J]. 应用生态学报, 2002, **13**(10): 1358-1359.
Xu G Q, Li Y, Shi Y, *et al.* Effect of free-air CO₂ enrichment on soil microbe in paddy field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, **13**(10): 1358-1359.
- [21] Inubushi K, Cheng W G, Aonuma S, *et al.* Effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on CH₄ emission from a rice paddy field[J]. Global Change Biology, 2003, **9**(10): 1458-1464.
- [22] Li Z, Yagi K, Sakai H, *et al.* Influence of elevated CO₂ and nitrogen nutrition on rice plant growth, soil microbial biomass, dissolved organic carbon and dissolved CH₄ [J]. Plant and Soil, 2004, **258**(1): 81-90.
- [23] 卫云燕, 尹华军, 刘庆, 等. 气候变暖背景下森林土壤碳循环研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2009, **15**(6): 888-894.
Wei Y Y, Yin H J, Liu Q, *et al.* Advance in research of forest carbon cycling under climate warming [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2009, **15**(6): 888-894.
- [24] 徐小锋, 田汉勤, 万师强. 气候变暖对陆地生态系统碳循环的影响[J]. 植物生态学报, 2007, **31**(2): 175-188.
Xu X F, Tian H Q, Wan S Q. Climate warming impacts on carbon cycling in terrestrial ecosystems [J]. Journal of Plant Ecology (Chinese Version), 2007, **31**(2): 175-188.
- [25] Long X E, Chen C R, Xu Z H, *et al.* Abundance and community structure of ammonia-oxidizing bacteria and archaea in a temperate forest ecosystem under ten-years elevated CO₂ [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, **46**: 163-171.
- [26] Malchair S, De Boeck H, Lemmens C M H M, *et al.* Diversity-function relationship of ammonia-oxidizing bacteria in soils among functional groups of grassland species under climate warming[J]. Applied Soil Ecology, 2010, **44**(1): 15-23.
- [27] Stopnišek N, Gubry-Rangin C, Höfferle Š, *et al.* Thaumarchaeal ammonia oxidation in an acidic forest peat soil is not influenced by ammonium amendment [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2010, **76**(22): 7626-7634.
- [28] Zak D R, Pregitzer K S, King J S, *et al.* Elevated atmospheric CO₂, fine roots and the response of soil microorganisms: a review and hypothesis[J]. New Phytologist, 2000, **147**(1): 201-222.

CONTENTS

Reactivity-based Anthropogenic VOCs Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (845)
Characteristics of Reactive VOCs Species During High Haze-Pollution Events in Suburban Area of Shanghai in Winter	GAO Shuang, ZHANG Kun, GAO Song, <i>et al.</i> (855)
Assessment of PM _{2.5} Pollution Mitigation due to Emission Reduction from Main Emission Sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Wen-jing, CHANG Xing, XING Jia, <i>et al.</i> (867)
Concentration Characteristics and Sources of Trace Metals in PM _{2.5} During Wintertime in Beijing	QIAO Bao-wen, LIU Zi-ru, HU Bo, <i>et al.</i> (876)
Online Source Analysis of Particulate Matter (PM _{2.5}) in a Heavy Pollution Process of Shijiazhuang City During Heating Period in 2015	LU Na, LI Zhi-guo, ZHOU Jing-bo, <i>et al.</i> (884)
Analysis of Chemical Composition and Pollution Source of the Fine Particulate Matter by the SPAMS in the Four Seasons in Nanning	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, MAO Jing-ying, <i>et al.</i> (894)
Physico-chemical Characteristics of Individual Aerosol Particles in Marine Atmosphere on South Hemisphere	CHI Jian-wei, LI Chuan-jin, SUN Jun-ying, <i>et al.</i> (903)
Characteristics of Spatial Distribution of Bacterial Aerosols Produced by Fountain	ZHANG Chong-miao, YUAN Lin, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (911)
Removal of Volatile Sulfur Odor by the Biotrickling Filter	YE Jie-xu, MIAO Xiao-ping, ZHUGE Lei, <i>et al.</i> (918)
Magnetic Characteristics and Environmental Pollution Analysis of Street Dust in Different Functional Zones of Xi'an City	FANG Ni, ZHANG Jun-hui, WANG Jin, <i>et al.</i> (924)
Pollution Characteristics and Nitrification and Denitrification Potential of Superficial Sediments from Streams in an Urban-Rural Fringe	QIN Ru-bin, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (936)
Nitrification and Denitrification Rates in a Small Tributary, Nanhe River, of Three Gorge Dam Reservoir During Water Collection and Release Events	WANG Jing, LIU Hong-jie, LEI Yu, <i>et al.</i> (946)
Tempo-spatial Variations and Influential Factors of Carbon Dioxide Emissions from the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin, China	ZHAO Deng-zhong, TAN De-bao, LI Chong, <i>et al.</i> (954)
Seasonal Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Surface Water of Baiyangdian Lake	WANG Yi-zhen, ZHANG Jun, ZHOU Xu-shen, <i>et al.</i> (964)
Distributions, Sources and Pollution Assessment of Hg in Sediment of Douhe Reservoir in Tangshan City	WU Ting-ting, WANG Ming-meng, CHEN Xu-feng, <i>et al.</i> (979)
Release Characteristics of Mercury from Submersed Typical Herbaceous Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	DENG Han, ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (987)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water Around Electroplating Factories	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (993)
Speciation and Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments from Jiulong River	LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (1002)
Fractionation and Contamination Assessment of Metal Elements in the Surface Sediments of Yundang Lagoon in Xiamen	YANG Qiu-li, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1010)
Source Analysis, Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sewage Irrigation Area Farmland Soils of Longkou City	LI Chun-fang, WANG Fei, CAO Wen-tao, <i>et al.</i> (1018)
Efficiency and Mechanism of Purifying High Iron-Manganese from Ground Water in the Cold Villages and Towns Based on The Coupling of Rice Husk and Iron-Manganese Oxidizing Bacteria	SUN Nan, CHEN Yan-li, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1028)
Peroxidation of High Algae-laden Water by Ozone; Algae Organic Matter Transformation and Disinfection By-products Formation	ZHANG Sai, HU Xue-bin, GU Li, <i>et al.</i> (1038)
Effects of Pretreatment on Hydraulic Irreversible Membrane Fouling During Ultrafiltration Short Process: A Pilot Study	YANG Hai-yan, XING Jia-jian, WANG Can, <i>et al.</i> (1046)
Fenton-like Catalytic Removal of Organic Pollutants in Water by Framework Cu in Cu-Al ₂ O ₃	XU Dan, ZHANG Li-li, LIU Li-fen (1054)
Oxidation Destruction of Cu(CN) ₂ ³⁻ by Persulfate	WANG Yun-fei, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (1061)
Enhanced Removal of Herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic Acid and Simultaneous Power Generation in Microbial Fuel Cells	QUAN Xiang-chun, QUAN Yan-ping, XIAO Zhu-tian (1067)
Adsorption Characteristics of Copper in Water by the Porous Biomorph-Genetic Composite of HAP/C with Eucalyptus Wood Template	LI Chao, ZHU Zong-qiang, CAO Shuang, <i>et al.</i> (1074)
Biological Toxicity Evaluation of Domestic Wastewater Based on A ² /O Treatment Processes Using a Battery of Bioassays	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1084)
Effect of Wastewater Nitrogen Concentrations on Nitrogen Removal Ability of <i>Myriophyllum aquaticum</i>	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1093)
Recovery Performance of ANAMMOX Process after Inhibition Resulting from Seawater	QI Pan-qing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1102)
Impact of Starvation Conditions on Biological Community Structure in Sulfur Autotrophic Denitrification Reactor	LI Fang-fang, SHI Chun-hong, LI Hai-bo, <i>et al.</i> (1109)
Quick Start-up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1116)
A New Model for the Treatment of Low Ammonia Nitrogen Wastewater by CANON Process	WANYAN De-qing, YUAN Yi, LI Xiang, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Side-stream Phosphorus Recovery on the Performance of EBPR System Under Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (1130)
Identification and Influence of Quorum Sensing on Anaerobic Ammonium Oxidation Process	CHEN Shu-han, LI An-jie, WANG Yue-xing, <i>et al.</i> (1137)
Effects of Organic Loading Rate on Startup Performance of Anaerobic Digestion with Vinegar Residues	DAI Xiao-hu, YU Chun-xiao, LI Ning, <i>et al.</i> (1144)
Influencing Mechanism of Calcium Peroxide Pre-treatment on Dewatering Performance of Waste Activated Sludge	BAI Run-ying, CHEN Zhan, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1151)
Treatment Effects of Earthworm Constructed Wetlands in Different Working Conditions	DONG Meng-ke, LI Huai-zheng, XU Yi-xiao (1159)
Effect of PFOA on Oxidative Stress and Membrane Damage of <i>Escherichia coli</i>	YANG Meng, LI Yi, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1167)
Physicochemical Properties and Antibacterial Effect of Silver Nanoparticles; A Comparison of Environmental and Laboratorial Conditions	YI Jun, CHENG Jin-ping (1173)
Pollution Characteristics of Chlorobenzenes in Organs of Fish from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1182)
Effect of Nano Zeolite on Growth, Activity of Antioxidant Enzyme, and Chemical Fractions and Concentration of Cd in Chinese Cabbage	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (1189)
Effect of Different Iron Minerals on Bioaccessibility of Soil Arsenic Using <i>in vitro</i> Methods	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, HUANG Run-lin, <i>et al.</i> (1201)
Enhanced Electrokinetic Remediation of Heavy Metals Contaminated Soils by Stainless Steel Electrodes as well as the Phenomenon and Mechanism of Electrode Corrosion and Crystallization	WEN Dong-dong, FU Rong-bing, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1209)
Influence of the Application of Non-Hazardous Sewage Sludge on the Evolution of Soil Carbon Pool and Carbon Pool Management Index	LIU Xiao, HUANG Lin, GUO Kang-li, <i>et al.</i> (1218)
Input and Distribution of Photosynthesized Carbon in Soil-Rice System Affected by Water Management and Nitrogen Fertilization	WANG Ting-ting, ZHU Zhen-ke, ZHU Han-hua, <i>et al.</i> (1227)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Respiration and Heterotrophic Respiration in a Secondary Forest	CHEN Shu-tao, SUN Lu, SANG Lin, <i>et al.</i> (1235)
Response of Soil Nitrifier and Denitrifier Community and Activity to Elevated Atmospheric CO ₂ Concentration and Temperature	LIU Yuan, WANG Guang-li, LI Lian-qing, <i>et al.</i> (1245)
Effects of Lithology on the Abundance and Composition of Soil Nitrogen-fixing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Karst Shrub Ecosystem	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1253)
Characterization of Phosphorus Forms in Organic Composts and Their Effects on Leaf Phosphorus Content of <i>Castanea mollissima</i> in Chinese Chestnut Producing Area	SONG Ying, GUO Su-juan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (1262)
Effects of Acidic Materials on the N Transformations During the Composting of Pig Manure and Wheat Straw	JIANG Ji-shao, YAO Qian (1272)