

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析	陈卓,刘峻峰,陶玮,陶澍 (2815)
中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单	刘海彪,孔少飞,王伟,严沁 (2823)
基于长时间序列的北京 PM _{2.5} 浓度日变化及气象条件影响分析	苗蕾,廖晓农,王迎春 (2836)
2004~2015年北京市清洁点臭氧浓度变化特征	
程念亮,李云婷,张大伟,陈添,魏强,孙彤卉,王步英,富佳明,何乐为,程兵芬,皮帅,马立光,崔继宪,孟凡 (2847)	
抗战胜利70周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析	
周静博,李治国,路娜,徐曼,杨鹏,高康宁,王建国,靳伟 (2855)	
成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征	蒋燕,贺光艳,罗彬,陈建文,王斌,杜云松,杜明 (2863)
嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析	
沈利娟,王红磊,李莉,吕升,袁婧,张孝寒,章国骏,王翥 (2871)	
泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析	张棕巍,胡恭任,于瑞莲,刘贤荣,胡起超,王晓明 (2881)
城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险:以贵阳市为例	李晓燕,汪浪,张舒婷 (2889)
桂林市酸雨变化特征及来源分析	郭雅思,于爽,黎泳珊,孙平安,何若雪 (2897)
农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH ₃ 和N ₂ O)减排效果比较:以夏玉米季为例	范会,姜姗姗,魏茨,蒋静艳 (2906)
青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤CO ₂ 、CH ₄ 和N ₂ O通量的观测	吴建国,周巧富 (2914)
三峡库区香溪河秋末至中冬CO ₂ 和CH ₄ 分压特征分析	张军伟,雷丹,肖尚斌,张成,穆晓辉,刘佳,李迎晨 (2924)
气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析	张晨,刘汉安,高学平,张文娜 (2932)
三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应:以兰陵溪小流域为例	
吴东,黄志霖,肖文发,曾立雄,韩黎阳 (2940)	
入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究:以洱海北部流域为例	项颂,庞燕,储昭升,胡小贞,孙莉,薛力强 (2947)
库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响:以草堂河为例	王晓彤,罗光富,操满,王雨春,汪福顺,邓兵 (2957)
农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析	李如忠,黄青飞,钱靖,殷晓曦,韦林 (2964)
农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究	李强坤,胡亚伟,宋常吉,彭聪 (2973)
三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨	
柴雪思,雷利国,江长胜,黄哲,范志伟,郝庆菊 (2979)	
重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究	刘静,郑丙辉,刘录三,马迎群,林岗璇,汪星,夏阳 (2989)
深圳地区全氟辛酸磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究	崔晓宇,张鸿,罗骥,张若冰 (3001)
柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价	卫亚宁,潘佳钊,宋玉梅,郭鹏然,王毅 (3007)
北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析	陈永娟,胡玮璇,庞树江,王晓燕 (3017)
昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义	王启栋,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁,曹磊 (3026)
甬醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示	廖昱,孙玉川,王尊波,梁作兵,张远瞩 (3034)
漳沱河冲洪积扇地下水中酚酸酯的污染现状与分布特征	昌盛,赵兴茹,刘琰,耿梦娇,肖晋翠 (3041)
雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析	张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,赵瑞一,梁作兵 (3049)
Zn系LDHs覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制	张翔凌,黄华玲,郭露,陈巧珍,阮聪颖,冷玉洁 (3058)
Ce ³⁺ 与Cu ²⁺ 协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究	张剑桥,迟惠中,宋阳,罗从伟,江进,马军 (3067)
Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究	丁文川,向星光,曾晓岚,厉晓宇,梁国强, M. M. Mian (3073)
石墨烯-TiO ₂ 光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解	徐琪,周泽宇,王洪涛 (3079)
单偶氮染料AY17的光催化降解动力学及机制	阳海,魏宏庆,胡乐天,胡倩,阳立平,刘华杰,易翔,易兵 (3086)
硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性	马航,朱强,朱亮,李祥,黄勇,魏凡凯,杨朋兵 (3094)
膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能	刘春,于长富,张静,陈晓轩,张磊,杨景亮 (3101)
ABR工艺ANAMMOX耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水	吴鹏,张诗颖,宋吟玲,徐乐中,沈耀良,张婷 (3108)
活性污泥厌氧Fe(III)还原氨氧化现象初探	李祥,林兴,杨朋兵,黄勇,刘恒蔚 (3114)
低浓度氨氮废水单级自养脱氮EGSB反应器的快速启动	顾书军,方芳,李凯,刘勇,郭劲松,陈猷鹏,蒋甫阳 (3120)
超低溶解氧条件下的EBPR系统除磷性能	马娟,宋璐,俞小军,李璐,孙雷军,孙洪伟,李光银 (3128)
活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响	何志江,赵媛,张源凯,王洪臣,齐鲁,尹训飞,张晓军 (3135)
山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估	
王菲,吴泉源,吕建树,董玉龙,曹文涛,康日斐,曹见飞 (3144)	
电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征	赵科理,傅伟军,叶正钱,戴巍 (3151)
我国18种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究	冯璞阳,李哲,者渝芸,黄杰,梁东丽 (3160)
流动搅动法研究针铁矿对亚砷酸盐的吸附特征	李鑫,杨军,饶伟,王代长,杜光辉,化党领,刘世亮,刘红恩 (3169)
聚羧基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中Cu ²⁺ 、Zn ²⁺ 的吸附特性	朱健,雷明婧,王平,张伟丽,陈仰 (3177)
新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价	王文东,刘荟,张银婷,杨生炯 (3186)
纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附	朱倩,李正魁,张一品,韩华杨,王浩 (3192)
鼠李糖脂与β-环糊精复合提取预测污染土壤中PAHs的生物有效性	
张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,王芳,王代长,蒋新 (3201)	
不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响	景新新,苏志忠,邢红恩,王发园,石兆勇,刘雪琴 (3208)
中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究	王晓南,闫振广,余若祯,王婉华,陈丽红,刘征涛 (3216)
贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响	林文芳,陈胜,万堃,王春明,林惠荣,于鑫 (3224)
不同氨水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响	吕玉,周龙,龙光强,汤利 (3229)
《环境科学》征订启事(3025) 《环境科学》征稿简则(3057) 信息(3072, 3085, 3143)	

不同氮水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响

吕玉, 周龙, 龙光强, 汤利*

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

摘要: 利用荧光定量 PCR (real-time quantitative PCR, Q-PCR) 技术, 结合氨氧化细菌 (ammonia oxidizing bacteria, AOB) 和氨氧化古菌 (ammonia oxidizing archaea, AOA) 丰度和土壤理化性质的测定, 探索了不同氮水平下间作对玉米土壤硝化势 (PNF) 的影响。试验设置玉米单作和与马铃薯间作两个种植模式, 4 个施氮水平 (不施氮 N0、1/2 常规施氮 N1、常规施氮 N2 和 3/2 常规施氮 N3) 的随机区组试验。结果表明, 从不施氮到常规施氮, 土壤硝化势和 AOA、AOB 数量均随施氮量增加而逐渐增加, 而高氮 (N3) 时与 N2 没有显著差异; 间作对土壤硝化势、AOA 与 AOB 数量的影响与施氮量和作物生育期有关, 低氮投入 (N1) 间作有利于增加土壤氨氧化微生物数量和硝化作用。施肥是硝化势增加的主要驱动因子, 相关性分析结果表明, 土壤含水量是影响 PNF 的主要环境因子; PNF 与土壤中 AOA、AOB *amoA* 基因丰度成正相关的正相关。尽管玉米马铃薯间作降低了土壤中 AOA、AOB *amoA* 基因丰度, 却使得间作土壤中 AOB 占据氨氧化微生物数量上的优势。以上结果表明, 施氮和间作均影响了土壤硝化作用和氨氧化微生物 AOA 和 AOB 数量的变化, 这些变化会影响土壤环境质量。

关键词: 氮水平; 玉米间作; 硝化势; 氨氧化细菌; 氨氧化古菌; 荧光定量 PCR

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-3229-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.08.052

Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils

LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, TANG Li*

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: The objectives of this study were to explore the effects of different nitrogen rates on the nitrification potential in intercropping maize soils. The experiment included two plantation types (maize monocropping and intercropping maize and potato) and four nitrogen levels (N0: no fertilizer treatment, N1: 1/2 conventional fertilizer treatment, N2: conventional fertilizer treatment, N3: 3/2 conventional fertilizer treatment). Abundance of AOA and AOB was analyzed with real-time quantitative PCR (Q-PCR) and soil properties were also measured. Results of this study suggested that the PNF of soils, the abundance of AOA and AOB were increased with increasing N fertilization in conventional fertilizer range, and there was no significant difference between N2 and N3 treatments. The influences of intercropping on PNF, AOA and AOB were associated with N application rates and crop growth period, as well as the benefits of ammonia oxidizer and nitrification of intercropping on N1 level. Fertilization was obviously the main driving force of the PNF, correlation analysis indicated that water content was the main environmental factor affecting the nitrification potential. Nitrification potential in maize and potato intercropping soils exhibited significant positive correlations with AOA and AOB *amoA* gene abundance. Maize and potato intercropping could decrease the abundance of AOA and AOB, but it resulted in dominance of AOB among nitrification bacteria in these soils. In conclusion, N fertilizer and intercropping could affect both soil nitrogen internal cycling process and the abundance of AOA and AOB, which further affected soil environmental quality.

Key words: nitrogen level; maize intercropping; nitrification potential; ammonia-oxidizing bacteria (AOB); ammonia-oxidizing archaea (AOA); real-time PCR

硝化作用在土壤氮素转化中发挥着重要作用, 是连接固氮作用和反硝化作用的重要环节。前期研究表明, 土壤硝化作用受土壤无机氮含量、温度、水分、pH 等因子的影响^[1~4]。其中, 氮肥施用增加了土壤无机氮含量, 由此对土壤硝化作用产生的影响受到较多关注。氨氧化菌包括氨氧化细菌 (AOB) 和氨氧化古菌 (AOA), 是影响硝化作用过程中重要的功能微生物, 其催化的氨氧化过程是硝化过程的限速步骤^[5], 因而受到广泛关注并成为研究热点之

一。He 等^[6]研究发现长期不同施肥模式导致土壤中 AOA 和 AOB 的组成和丰度发生了显著变化, 也发现, 施氮增加了土壤 *amoA* 基因拷贝数和土壤硝化势^[7,8]; 施肥处理下土壤中 AOB 数量是不施肥的

收稿日期: 2016-01-30; 修订日期: 2016-03-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41361065, 41201289); 云南省科技计划重点项目 (2015FA022); 云南省高校科技创新团队项目; 公益性行业科研专项 (201103003)

作者简介: 吕玉 (1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤环境微生物, E-mail: yulvynau@163.com

* 通讯联系人, E-mail: ltang@ynau.edu.cn

3 倍多^[9],且随施氮量的增加而增加^[10],Ai 等^[11]研究表明,随着施氮量的增加,AOB 的丰度和土壤硝化势也在增加;Chu 等^[12]发现长期施氮肥能够增加土壤硝化势和 AOB 的群落结构。

间作具有显著的增产效应,在世界农业生产中被广泛应用^[13]。在中国西北、西南地区,间作在作物生产上具有悠久历史,大部分关于间作的研究都集中于光、水、养分等资源的利用^[14~16]。由于作物间的相互作用,间作改变了土壤温度、水分等环境要素和土壤无机氮供应,可能对土壤硝化作用产生重要影响,然而相关报道却较为少见。高阳等^[17]通过田间试验研究了玉米大豆间作对硝化-反硝化作用的影响,结果表明,施氮提高了土壤硝化速率,在生育期内,硝化速率呈现先增加后降低的趋势,然而并没有比较单间作之间硝化作用的差异。Song 等^[18]研究发现玉米大豆间作和小麦玉米间作会影响氨氧化细菌的群落组成。显然,与单作相比,间作对土壤硝化作用和氨氧化微生物的影响仍不够明确,尤其是在氮肥用量不同时的单间作硝化作用差异仍缺乏报道。

玉米马铃薯间作是一种代表高、矮作物立体种植的典型配置,是较为普遍的农业生产方式,尤其在云南及西南地区,玉米马铃薯间作是春季作物种植中最普遍、最重要的种植模式,在云南农业生产中具有广泛地代表性和重要地位,其具有显著控病效果^[19],能充分利用光照、养分和水分资源^[20],能显著提高植物的光合效率^[21],而且有较高的土地当量比与增产效应^[22]。本文选取云南长期耕作的农田土壤为研究对象,采取室内培养试验,微生物分子生态学的方法分析不同氮水平对间作玉米土壤硝化势的影响和硝化微生物的响应,旨在为作物间作生产提供科学参考,为土壤氮素循环的合理调控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验始于 2014 年,地点位于云南省昆明市,云南农业大学寻甸大河桥农场,N 23°32'、E 103°13',海拔 1 953.5 m。气候条件属于亚热带季风气候,年平均气温 14.7℃,年降水量 1 040 mm。土壤为红壤,

试验开始时,供试土壤 0~20 cm 土层含有有机质 20.79 g·kg⁻¹,速效磷(P) 10.15 mg·kg⁻¹,速效钾(K) 125.34 mg·kg⁻¹,硝态氮(NO₃⁻-N) 4.09 mg·kg⁻¹,铵态氮(NH₄⁺-N) 0.83 mg·kg⁻¹,pH 7.58。

试验设置玉米单作(MM)和玉米间作(IM)两种种植模式,间作时的配套作物为马铃薯。每个种植模式均有 4 个施氮水平,分别是不施氮(N0, 0 kg·hm⁻²)、低氮施肥(N1, 125 kg·hm⁻²)、常规施氮(N2, 250 kg·hm⁻²)、高氮施肥(N3, 375 kg·hm⁻²)。玉米氮肥分基肥、拔节期追肥、喇叭口期追肥 3 次施入,分别占总施氮量的 40%、25% 和 35%。磷肥(P₂O₅) 75 kg·hm⁻²和钾肥(K₂SO₄) 125 kg·hm⁻²均以基肥的形式施入。以上两项试验皆为随机完全区组设计,每处理重复 3 次,共 24 个种植小区。小区的面积 32.50 m²(5 m×6.5 m),在小区四周设置保护行。试验期间的管理措施按当地农民习惯进行。

1.2 土壤的采集和基本理化性质的测定

土壤样品采集用五点采样法,采样时间按照表 1 所示,采样深度为 0~20 cm。将五点采集的土壤去除根系、杂草、土壤动物和石块等杂质后过 2 mm 筛,混匀。一部分 4℃ 保存用于土壤硝化势和含水量测定,剩余的土样风干用于测定其他理化性质。2015 年 7 月 9 日(喇叭口期)另取新鲜土样于 -80℃ 冷冻保存用于土壤微生物荧光定量 PCR 分析。每次采样的时候进行温度(T)的测定,在单作玉米行间,间作玉米行间,间作玉米马铃薯行间分别插入 3 根温度计,待稳定之后进行读数。

土壤的含水量(H₂O)采用烘干法测定;土壤 pH 采用电位法(水土比 2.5:1);NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 采用 1 mol·L⁻¹ KCl 浸提,浸提液用流动分析仪测定;有机质采用重铬酸钾容量法测定;速效磷采用碳酸氢钠-分光光度计法测定;速效钾采用醋酸铵-火焰光度计法测定;测定土壤溶解性总氮(TDN)采用 1 mol·L⁻¹ KCl 浸提,过硫酸钾氧化,流动分析仪测定 NO₃⁻-N 浓度;DON 采用差减法,即溶解性总氮减去硝态氮含量。

1.3 硝化势(PNF)的测定

土壤样品采集回实验室后,立即进行硝化势的

表 1 玉米种植、收获及土壤样品采集日期

Table 1 Maize planting, harvesting and soil sample collection dates

年份	种植日期	苗期	拔节期	喇叭口期	抽穗期	成熟期	收获日期
2014 年	05-17	05-28	06-22	07-23	08-23	09-31	10-19
2015 年	05-11	05-29	06-27	07-09	08-12	09-18	10-06

测定. 采用好气培养法^[12]. 稍作修改, 具体如下: 称取 20 g 鲜土置于三角瓶中, 加入 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 调节 NH_4^+ -N 的浓度到 $40 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$, 按干土的质量计算, 田间持水量调节到 60%, 不加 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液的作为对照. 将三角瓶放到 23℃ 的黑暗培养箱中培养 48 h. 培养结束之后, 土壤 NO_3^- -N 含量的测定以 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 溶液振荡浸提, 过滤, 用流动分析仪测定.

1.4 DNA 的提取

土壤总 DNA 提取采用 PowerSoil™ Total DNA Isolation 试剂盒进行 (MO BIO Laboratories, CA, USA), 称取 0.4 g、-80℃ 保存的土壤样品, 按试剂盒提供的操作步骤进行, 以 FastPrep 细胞破碎仪 (Qbiogene Inc, USA) 进行细胞破碎处理, 速度 $5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 时间 45 s. 提取的 DNA 在 1% 的琼脂糖胶中进行电泳检测, 并将提取的 DNA 保存于 -20℃ 用于后续分析.

1.5 定量 PCR

功能基因的定量分析采用 SYBR GREEN 法, AOA 和 AOB *amoA* 基因分别采用 Arch-*amoA*F/Arch-*amoA*R 和 *amoA*-1F/*amoA*-2R 进行 PCR 扩增, 每个样品 3 次重复. 采用 TransStart® Top Green qPCR SuperMix (全式金生物技术有限公司, 北京) 试剂盒于 ABI StepOne Plus Real-Time PCR System 扩增仪上进行绝对荧光定量 PCR 分析, 反应体系 20 μL , 其中 2 μL 稀释 5 倍的 DNA 模板加反应液 18 μL , 反应液包括 10 μL TransStart® Top Green qPCR SuperMix (2 ×), 0.4 μL Passive Reference Dye I (50 ×), 前、后引物各 0.4 μL ($10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 捷基生物工程公司, 上海) 和 6.8 μL 超纯水. 试验对照用灭菌双蒸水代替 DNA 作为反应模板.

标准曲线的制作: 参照 He 等^[6]报道的方法, 以土壤中提取的混合 DNA 为模板进行 AOB 和 AOA 的 *amoA* 基因 PCR 扩增, 将扩增产物用 TIANGEN Universal DNA Purification Kit 试剂盒 (天根) 对其进行纯化回收, 按试剂盒方法用 pEASY® -T3 (pEASY-T3 Cloning Kit 北京全式金生物技术有限公司) 载体连接 PCR 产物, 然后克隆到 Trans1-T1 感受态细胞中 (Trans1-T1 Phage Resistant Chemically Competent Cell 全式金生物技术有限公司), 在氨苄青霉素平板上进行蓝白斑试验筛选阳性克隆, 取部分阳性转化菌液送至上海生工生物工程有限公司进行测序. 测序结果为阳性的菌液, 利用 TIAN Pure Midi Plasmid Kit 试剂盒 (天根) 提取重组质粒 DNA, 然后用

Nanodrop (美国) 测定重组质粒 DNA 的浓度, 根据已知质粒全序列和阿伏伽德罗常数 ($6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$), 计算 *amoA* 基因拷贝数. 以 10 倍梯度分别进行稀释, 每个稀释度进行 3 次重复, 通过荧光定量 PCR 扩增分别获得 AOA 和 AOB 的 *amoA* 基因标准曲线, 反应程序如文献 [23, 24].

1.6 数据处理

采用 SPSS 22 软件进行数据方差分析和相关性分析; ABT 分析采用 R 语言中的 “gbmpls” 程序包进行处理, 即采用的是 R 语言软件的 ABT 聚合推进树分析方法, 直接用 “gbmpls” 程序包先进行编程再进行数据分析; 用 Microsoft Excel 2010 进行数据处理、制图.

2 结果与分析

2.1 不同施氮水平和间作对玉米土壤硝化势的影响

2.1.1 施氮水平对玉米土壤硝化势的影响

由图 1 可知, 在常规施氮范围内, 玉米单作和间作的土壤硝化势随着施氮量的增加而增加, 均在 N2 处理下达到最大值, 超过常规施氮水平之后, 硝化势不再增加, 甚至出现下降的趋势, MM 土壤硝化势在 N1、N2、N3 处理下分别是 N0 的 1.5、2.0 和 1.9 倍, IM、MM 土壤硝化势在 N1、N2、N3 处理下分别是 N0 的 3.2、4.3 和 3.5 倍. 在单作玉米整个生育期内, 生长前期的土壤硝化势较低, 由苗期到抽穗期玉米土壤硝化势逐渐升高, 抽穗期达到最高, 成熟期时反而降低. 试验的两个年度间进行比较, 单作玉米土壤硝化势随着施氮量的增加变化趋势大体一致, 不同的是 2014 年玉米前两个生育期的土壤硝化势极低.

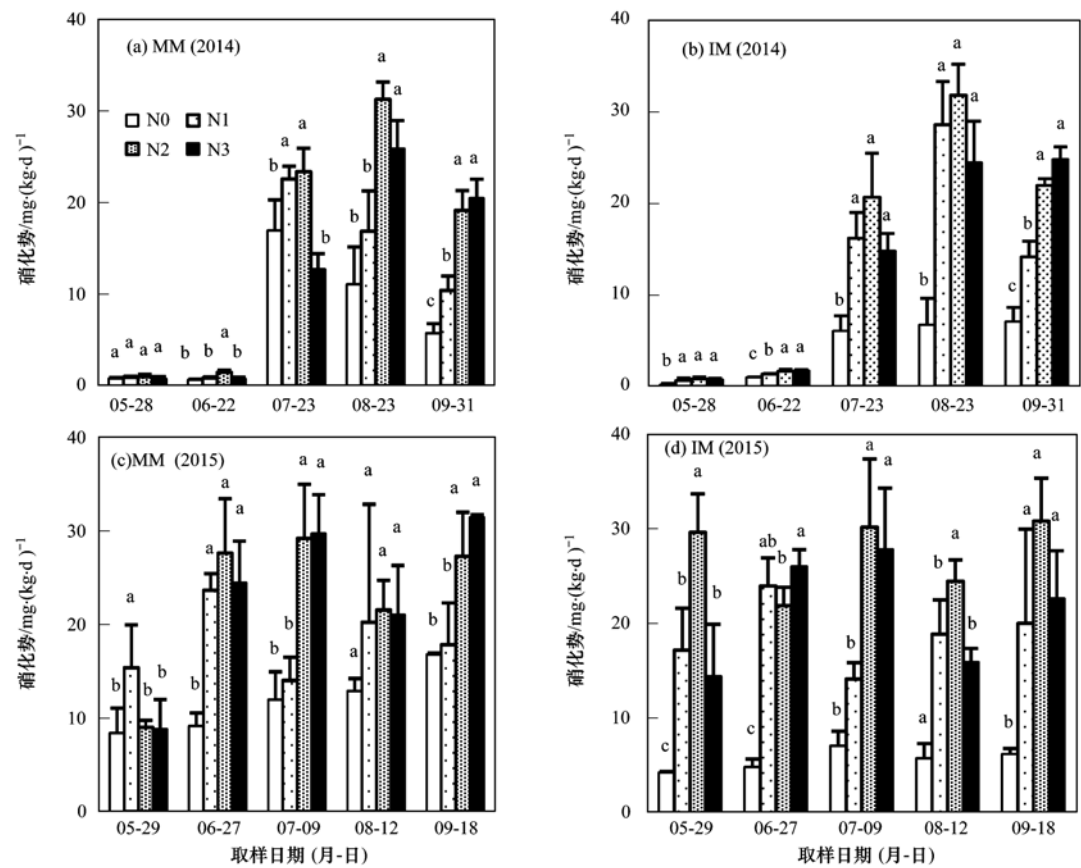
2.1.2 间作对玉米土壤硝化势的影响

间作对土壤硝化势的影响与施氮量和作物生育期有关 (表 2), 在 N0 处理下, 单作玉米土壤硝化势是间作玉米的 1.9 倍, 显著高于间作玉米, 在其它氮水平下单作玉米土壤硝化势没有显著差异. 在玉米整个生育期, 除了苗期之外, 间作有降低土壤硝化势的趋势. 2014 年, 在喇叭口期, 间作玉米土壤硝化势显著低于单作玉米, 其他生育期内没有显著差异. 两年的变化规律基本一致.

2.2 不同施氮水平和间作对玉米土壤氨氧化微生物数量的影响

2.2.1 施氮水平对玉米土壤氨氧化微生物数量的影响

依据标准曲线用 Real-time PCR 技术获得的不



MM:玉米单作,IM:玉米间作. N0:不施氮处理,N1:1/2 常规施氮处理,N2:常规施氮处理,N3:3/2 常规施氮处理;
不同小写字母表示同一生育期不同氮水平处理间差异显著($P < 0.05$)

图 1 不同氮水平对玉米土壤硝化势的影响

Fig. 1 Nitrification potential (PNF) in maize soils with different nitrogen rates

表 2 间作对玉米土壤硝化势的影响¹⁾

Table 2 Nitrification potential (PNF) in maize soils with maize and potato intercropping

年份	生育期	N0		N1		N2		N3	
		MM	IM	MM	IM	MM	IM	MM	IM
2014	苗期	0.78 ± 0.12a	0.20 ± 0.14b	0.95 ± 0.12a	0.63 ± 0.28a	1.01 ± 0.25a	0.82 ± 0.22a	0.78 ± 0.22a	0.75 ± 0.14a
	拔节期	0.67 ± 0.07b	0.98 ± 0.05a	0.86 ± 0.12b	1.36 ± 0.04a	1.48 ± 0.25a	1.66 ± 0.21a	0.78 ± 0.17b	1.72 ± 0.10a
	喇叭口期	16.94 ± 3.36a	6.05 ± 1.68b	22.57 ± 1.37a	16.18 ± 2.82b	23.36 ± 2.55a	20.66 ± 4.81a	12.72 ± 1.7a	14.8 ± 1.91a
	抽穗期	11.08 ± 4.06a	6.72 ± 2.91b	16.87 ± 4.42b	28.57 ± 4.71a	31.25 ± 1.9a	31.79 ± 3.38a	25.88 ± 3.05a	24.44 ± 4.51a
	成熟期	5.76 ± 1.03a	7.08 ± 1.55a	10.42 ± 1.56a	14.14 ± 1.73a	19.15 ± 2.15a	21.94 ± 0.73a	20.46 ± 2.09a	24.79 ± 1.36a
2015	苗期	8.42 ± 2.64a	4.24 ± 0.1a	15.38 ± 4.56a	17.2 ± 4.42a	9.03 ± 0.73b	29.64 ± 4.07a	8.84 ± 3.15a	14.42 ± 5.51a
	拔节期	9.16 ± 1.39a	4.82 ± 0.85b	23.65 ± 1.78a	23.98 ± 2.96a	27.6 ± 5.82a	21.87 ± 1.95a	24.46 ± 4.43a	26.04 ± 1.78a
	喇叭口期	11.97 ± 2.98a	7.08 ± 1.55a	14.03 ± 2.47a	14.14 ± 1.73a	29.19 ± 5.77a	30.19 ± 7.2a	29.7 ± 4.16a	27.84 ± 6.49a
	抽穗期	12.90 ± 1.32a	5.75 ± 1.55b	20.24 ± 12.59a	18.89 ± 3.59a	21.56 ± 3.16a	24.48 ± 2.24a	21.03 ± 5.27a	15.92 ± 1.43a
	成熟期	16.8 ± 0.14a	6.20 ± 0.58b	17.83 ± 4.47a	20.02 ± 9.96a	27.27 ± 4.71a	30.82 ± 4.56a	31.44 ± 0.3a	22.65 ± 5.04a

1) 不同小写字母表示同一施氮水平条件下单间作处理间差异显著($P < 0.05$)

同施肥处理的 AOA *amoA* 基因拷贝数(以干土计,下同)在 $1.808 \times 10^4 \sim 4.413 \times 10^4$ copies·g⁻¹ 之间, AOB *amoA* 基因拷贝数在 $1.223 \times 10^4 \sim 2.7 \times 10^5$ copies·g⁻¹ 之间,结果如图 2. N2 和 N3 处理的 MM 土壤中 AOA 的 *amoA* 基因拷贝数显著高于 N0 和 N1 处理,在 N2 处理下达到最大值,MM 土壤 AOA

数量在 N1、N2、N3 处理下分别是 N0 的 1.05、1.67 和 1.55 倍. IM 的 AOA 数量在 N2 处理下最高,显著高于 N0 处理,施氮处理间没有显著差异,IM 土壤 AOA 数量在 N1、N2、N3 处理下分别是 N0 的 1.26、1.56 和 1.40 倍.

MM 土壤中 AOB 的 *amoA* 基因拷贝数随着施氮

量的增加先增加后降低,在 N2 处理下达到最大值,显著高于其他处理,分别是 N0、N1 和 N3 的 7.62、7.10 和 1.25 倍. IM 土壤的 AOB 数量随着施氮量的增加而增加,在 N3 处理下达到最大值,各施氮处理间达到显著差异.

2.2.2 间作对玉米土壤氨氧化微生物数量的影响

由图 2 可知,在 N0 处理下,MM 土壤中 AOA 基因拷贝数显著高于 IM,其它施氮条件下单间作玉米之间 AOA 数量没有显著差异;在 N0 和 N2 条件下,MM 土壤中 AOB 基因拷贝数显著高于 IM,在另外两个施氮处理下则刚好相反,为 IM 显著高于 MM.

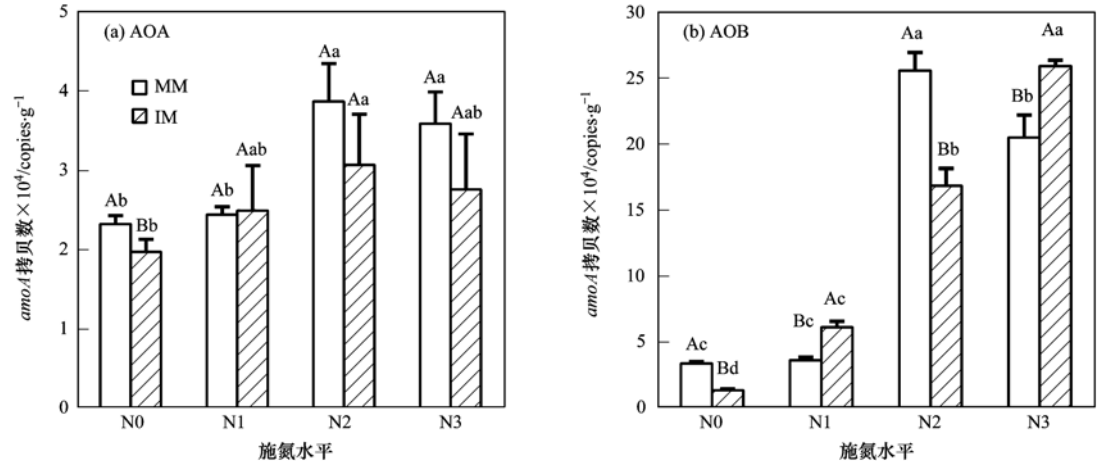
通过比较同一作物同一施氮处理下土壤中 AOA 和 AOB 的数量可知,除了 N0 条件下 IM 土壤中 AOA 数量显著高于 AOB 数量之外,其他处理土壤中均为 AOB 数量显著高于 AOA 数量,AOB 和 AOA 数量比例可达 0.68~9.76,两者比例随着施氮水平的增加而增加,IM 在 N3 处理下的差异最大,表明玉米土壤中 AOA 占据氨氧化微生物数量上的

优势.

2.3 氨氧化微生物数量、PNF 和土壤理化性质的相关性分析

将 PNF、AOA、AOB 和土壤理化性质进行相关性分析(表 3),结果表明:Cw 与玉米土壤的 PNF 都呈极显著正相关,不同的是无机氮、有机氮和 *T* 与 PNF 呈显著负相关; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TDN、P 和 *T* 与 MM 的 PNF 呈显著负相关; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TDN 和 pH 与 IM 的 PNF 呈显著负相关. 玉米土壤的 AOA、AOB 数量与土壤因子的相关性和 MM 的相关性一致,都是 Cw 与 AOA 呈极显著正相关, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、DON、TDN 和 P 与 AOA、AOB 呈显著负相关,而 IM 的 AOA 和影响因子没有相关性,IM 的 AOB 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、DON、TDN 呈显著负相关.

PNF 和 AOA、AOB 的 *amoA* 基因拷贝数的线性回归分析结果显示,PNF 和 AOA、AOB 之间存在极显著的线性正相关关系,且相关系数分别达到 0.786、0.845($P<0.01$,图 3).



不同小写字母表示同一种植模式下不同施氮处理间差异显著,不同大写字母表示同一施氮水平条件下单间作处理间差异显著($P<0.05$)

图 2 不同氮水平和间作对土壤氨氧化古菌(AOA)和氨氧化细菌(AOB)数量的影响

Fig. 2 Abundance of AOA and AOB in soil with different nitrogen rates and maize intercropping

表 3 土壤理化性质和 PNF、*amoA* 数量的 Pearson 相关系数¹⁾

	$\text{NO}_3^-\text{-N}$ /mg·kg ⁻¹	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ /mg·kg ⁻¹	DON /mg·kg ⁻¹	TDN /mg·kg ⁻¹	Cw	P /mg·kg ⁻¹	K /mg·kg ⁻¹	<i>T</i>	pH
硝化势(IMP)	-0.256 **	-0.319 **	-0.227 *	-0.435 **	0.428 **	-0.120	0.088	-0.225 *	-0.131
硝化势(MM)	-0.251	-0.299 **	-0.249	-0.490 **	0.360 **	-0.286 *	-0.017	-0.359 **	0.119
硝化势(IM)	-0.266 *	-0.383 **	-0.235	-0.412 **	0.496 **	-0.027	0.179	-0.099	-0.311 *
AOA(IMP)	-0.563 **	-0.240	-0.455 *	-0.649 **	0.643 **	-0.551 **	-0.123	-0.338	-0.057
AOA(MM)	-0.791 **	-0.458	-0.734 **	-0.848 **	0.748 **	-0.661 *	-0.138	-0.089	-0.167
AOA(IM)	-0.374	-0.435	-0.375	-0.535	0.498	-0.457	-0.084	-0.312	0.084
AOB(IMP)	-0.799 **	-0.395	-0.558 **	-0.884 **	0.700 **	-0.619 **	-0.006	-0.215	-0.210
AOB(MM)	-0.867 **	-0.488	-0.695 **	-0.905 **	0.863 **	-0.725 **	-0.087	-0.050	-0.207
AOB(IM)	-0.728 **	-0.615 *	-0.634 *	-0.892 **	0.477	-0.500	0.099	-0.345	-0.221

1) * 表示 0.05 水平显著, ** 表示 0.01 水平显著; DON: 溶解性有机氮; TDN: 溶解性总氮; Cw: 质量含水量; P: 速效磷; K: 速效钾; *T*: 温度

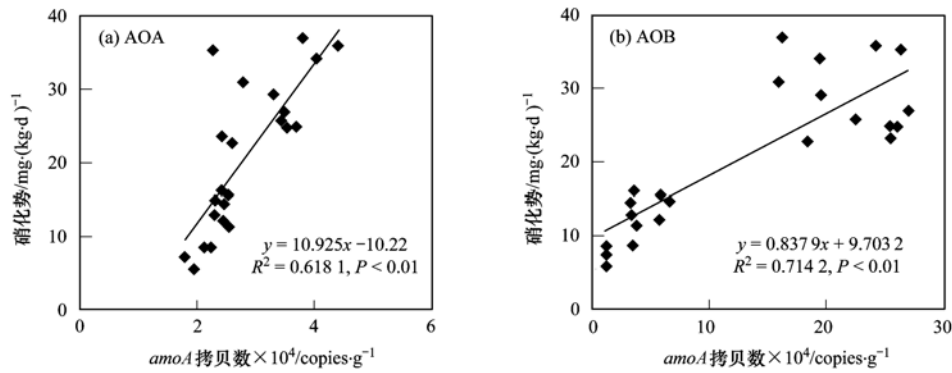


图3 PNF和AOA、AOB丰度相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis between PNF and abundance of AOA, AOB

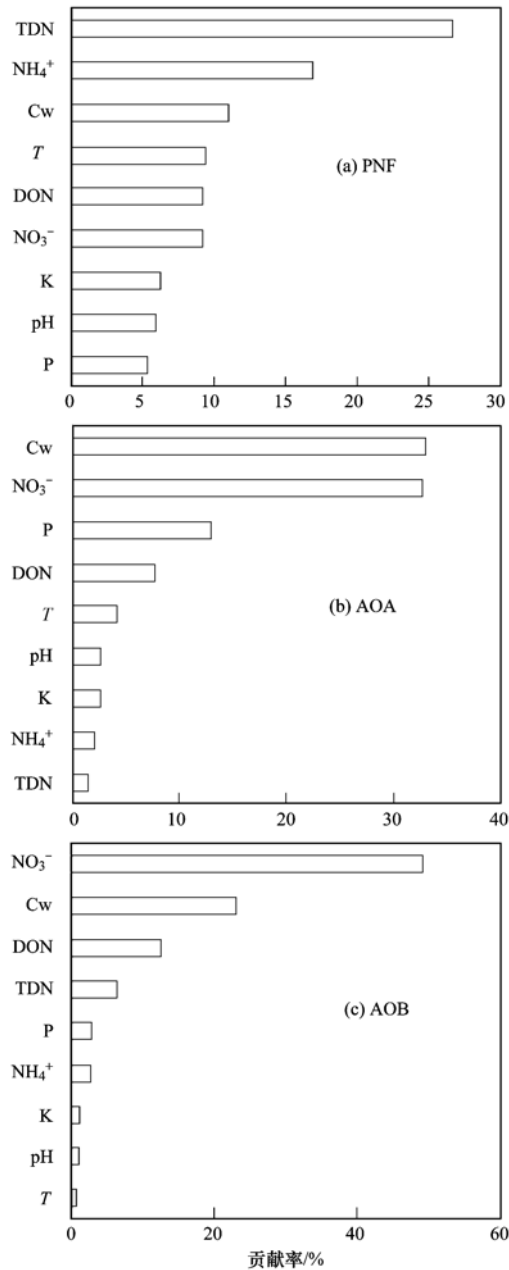


图4 环境因子对PNF、AOA和AOB丰度的相对贡献
Fig. 4 Relative contribution between environmental factor of PNF and abundance of AOA, AOB

2.4 环境因子对PNF、AOA和AOB丰度的相对贡献

采用ABT (aggregated boosted tree) 分析了土壤因子对PNF、AOA和AOB丰度的单独的解釋量(图4). 结果表明,土壤理化性质对PNF、AOA和AOB有不同的响应. 对于PNF来说,各个环境因子对PNF的相对贡献率依次为TDN > NH₄⁺-N > Cw > T > DON > NO₃⁻-N > K > pH > P, TDN和NH₄⁺-N分别占到所有变量可解釋量的26.72%和16.8%. 对于AOA和AOB来说,Cw和NO₃⁻-N是贡献率最大的两大因素,在AOA中分别占到33.1%和32.78%,而在AOB中分别占到23.18%和49.25%的解釋量.

3 讨论

土地种植模式、施肥、管理以及土壤特性会对微生物数量、活性与种群结构产生较大影响^[25,26]. 本研究结果发现施氮提高了作物土壤中的PNF,这与前人研究结果基本一致,如Wertz等^[27]分析了长期施肥对森林土壤硝化势的影响,他们发现施肥显著提高了土壤的硝化势;Chu等^[12]研究发现施用氮肥土壤的硝化势是不施肥的13~21倍,长期施肥(尤其是氮肥)可以增加土壤的硝化势. 土壤硝化势的增加主要是施氮肥带来了无机N,随着施氮量的增加,硝化速率和硝化势也增加的情况在其他研究中都有报道^[28~30]. 并且笔者发现施氮增加了作物土壤的TDN含量,然而通过ABT研究发现,TDN含量是所有环境因子中对PNF解釋量最大的,因此推测TDN含量的增加导致了硝化势含量的增加. 在一定施氮范围内,土壤硝化势随着施氮量的增加而增加,而在高氮处理下降低.

另外,土地种植方式对硝化势的影响结果表明,在同一施氮处理下,间作玉米显著降低了土壤的硝化势,这可能是由于间作引起硝化微生物的变化. 为了探讨玉米马铃薯间作土壤对施肥和种植方式差

异性响应的微生物机制,本研究采用 Q-PCR 技术,通过分析编码施氮以及间作对土壤中 AOA、AOB *amoA* 基因丰度的影响。研究结果表明,施肥显著增加了 AOA、AOB 的基因丰度。相关研究表明,施肥显著促进 AOA 和 AOB 生长这种现象具有一定的普遍性,Song 等^[31]研究发现施肥显著增加了水稻土壤中 AOA 和 AOB 的基因丰度。本研究中,在 N2 处理下,间作显著降低了 AOA 和 AOB 的基因丰度,土壤中 AOA 和 AOB 丰度随着施氮量的增加呈现先增加后降低的趋势,在 N2 水平下达到最大值,而且都是 AOA *amoA* 拷贝数高于 AOB,表明在该试验条件下 AOA 更敏感,这与前人研究结果一致^[32,33],说明土壤微生物数量会随着施氮量以及种植方式的不同而发生变化,但也有可能是施氮和种植模式的差异导致微生物群落结构的改变,从而导致微生物数量上的差异,但对于这一原因推测是否合理还需要在接下来的试验中进行深入的研究。

前人的研究结果认为土壤 pH 会影响 AOA 和 AOB 的群落结构和丰度^[33~35],但在本研究结果中,pH 介于 7.76~7.84,各处理之间土壤 pH 没有显著差异,另外 ABT 分析发现 pH 对 PNF、AOA 和 AOB 丰度的贡献率分别为 5.98%、2.66% 和 1.08%,占所有解释变量的比例较低,因此在本试验条件下不是主要影响因子。ABT 分析发现 Cw 对 AOA 和 AOB 的解释变量最大,逐步回归分析显示 PNF 和 AOA、AOB 之间存在极显著的线性正相关,相关分析表明,Cw 和 PNF、AOA、AOB 都显著正相关,说明水分是硝化作用的主要影响因子,这与曾泽彬等^[36]的研究结果一致,因此认为间作降低了 Cw,进而影响氨氧化微生物的数量最终导致 PNF 降低。然而 AOB 和 PNF 的相关系数更高,说明 AOB 的丰度与土壤硝化势的关联更为密切。

4 结论

(1)不同施肥和间作对土壤硝化势具有明显的影响作用,在常规施氮范围内,随着施氮的增加土壤硝化势也在增加,但是超过常规施氮之后硝化势不再增加,甚至出现下降的趋势。

(2)随着施氮量的增加,单间作玉米土壤中 AOA 呈现先增加后降低的趋势,MM 的 AOB 变化趋势和 AOA 一致,而 IM 的 AOB 丰度随着施氮量的增加而增加;间作玉米的氨氧化微生物数量低于单作玉米。玉米土壤中 AOB 的丰度高于 AOA。

(3)ABT 分析表明,含水量和 NO_3^- -N 对 AOA 和

AOB 的相对贡献率最大。相关分析表明,硝化势与含水量、AOA、AOB 丰度显著正相关,说明 PNF 的变化与 AOA 和 AOB 的丰度显著相关。

参考文献:

- [1] 贾俊仙,李忠佩,刘明,等.施用氮肥对不同肥力红壤性水稻土硝化作用的影响[J].生态与农村环境学报,2010,26(4):329-333.
- [2] Dessureault-Rompré J, Zebarth B J, Georgallas A, et al. Temperature dependence of soil nitrogen mineralization rate: Comparison of mathematical models, reference temperatures and origin of the soils[J]. Geoderma, 2010, 157(3-4): 97-108.
- [3] Ye C, Cheng X L, Zhang Y L, et al. Soil nitrogen dynamics following short-term revegetation in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China [J]. Ecology Engineer, 2012, 38(1): 37-44.
- [4] Xiao K C, Xu J M, Tang C X, et al. Differences in carbon and nitrogen mineralization in soils of differing initial pH induced by electrokinesis and receiving crop residue amendments [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 67: 70-84.
- [5] Ke X B, Angel R, Lu Y H, et al. Niche differentiation of ammonia oxidizers and nitrite oxidizers in rice paddy soil [J]. Environmental Microbiology, 2013, 15(8): 2275-2292.
- [6] He J Z, Shen J P, Zhang L M, et al. Quantitative analyses of the abundance and composition of ammonia-oxidizing bacteria and ammonia-oxidizing archaea of a Chinese upland red soil under long-term fertilization practices [J]. Environmental Microbiology, 2007, 9(9): 2364-2374.
- [7] Wang J, Li G, Lai X, et al. Differential responses of ammonia-oxidizers communities to nitrogen and water addition in *Stipa baicalensis* Steppe, Inner Mongolia, Northern China [J]. Journal of Resources and Ecology, 2015, 6(1): 1-11.
- [8] 方宇,景晓明,王飞,等.长期施肥对氨氧化古菌丰度及群落结构的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(6):1607-1614.
- [9] Hermansson A, Lindgren P E. Quantification of ammonia-oxidizing bacteria in arable soil by real-time PCR [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2001, 67(2): 972-976.
- [10] Okano Y, Hristova K R, Leutenegger C M, et al. Application of real-time PCR to study effects of ammonium on population size of ammonia-oxidizing bacteria in soil [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2004, 70(2): 1008-1016.
- [11] Ai C, Liang G Q, Sun J W, et al. Different roles of rhizosphere effect and long-term fertilization in the activity and community structure of ammonia-oxidizers in a calcareous fluvo-aquic soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 57: 30-42.
- [12] Chu H Y, Fujii T, Morimoto S, et al. Community structure of ammonia-oxidizing bacteria under long-term application of mineral fertilizer and organic manure in a sandy loam soil [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2007, 73(2): 485-491.
- [13] Zhang F S, Li L. Using competitive and facilitative interactions in intercropping system to enhances crop productivity and nutrient-use efficiency [J]. Plant and Soil, 2003, 248(1-2):

- 305-312.
- [14] Li L, Sun J H, Zhang F S, *et al.* Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping. I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients[J]. *Field Crops Research*, 2001, **71**(2): 123-137.
- [15] Li L, Tang C X, Rengel Z, *et al.* Chickpea facilitates phosphorus uptake by intercropped wheat from an organic phosphorus source[J]. *Plant and Soil*, 2003, **248**(1-2): 305-312.
- [16] Li L, Zhang F S, Li X L, *et al.* Interspecific facilitation of nutrient uptake by intercropped maize and faba bean [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, **65**(1): 61-71.
- [17] 高阳, 申孝军, 李新强, 等. 间作群体内土壤呼吸和硝化-反硝化作用研究[J]. *灌溉排水学报*, 2015, **34**(2): 16-19.
- [18] Song Y N, Marschner P, Li L, *et al.* Community composition of ammonia-oxidizing bacteria in the rhizosphere of intercropped wheat (*Triticum aestivum* L.) maize (*Zea mays* L.), and faba bean (*Vicia faba* L.) [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, **44**(2): 307-314.
- [19] He X H, Zhu S S, Wang H N, *et al.* Crop diversity for ecological disease control in potato and maize [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, **1**(1): 45-50.
- [20] 黄鹏, 张恩和, 柴强. 施氮对新灌区不同间套种植模式产量及茬口养分特性的影响[J]. *草业学报*, 2001, **10**(1): 86-91.
- [21] 刘景辉, 曾昭海, 焦立新, 等. 不同青贮玉米品种与紫花苜蓿的间作效应[J]. *作物学报*, 2006, **32**(1): 125-130.
- [22] 陈阜, 逢焕成. 冬小麦/春玉米/夏玉米间套作复合群体的高产机理探讨[J]. *中国农业大学学报*, 2000, **5**(5): 12-16.
- [23] Rotthauwe J H, Witzel K P, Liesack W. The ammonia monooxygenase structural gene *amoA* as a functional marker: molecular fine-scale analysis of natural ammonia-oxidizing populations [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, **63**(12): 4704-4712.
- [24] Francis C A, Roberts K J, Beman J M, *et al.* Ubiquity and diversity of ammonia-oxidizing archaea in water columns and sediments of the ocean[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, **102**(41): 14683-14688.
- [25] Hansel C M, Fendorf S, Jardine P M, *et al.* Changes in bacterial and archaeal community structure and functional diversity along a geochemically variable soil profile [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2008, **74**(5): 1620-1633.
- [26] Nemergut D R, Costello E K, Hamady M, *et al.* Global patterns in the biogeography of bacterial taxa [J]. *Environmental Microbiology*, 2011, **13**(1): 135-144.
- [27] Wertz S, Leigh A K K, Grayston S J. Effects of long-term fertilization of forest soils on potential nitrification and on the abundance and community structure of ammonia oxidizers and nitrite oxidizers [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2012, **79**(1): 142-154.
- [28] Chu H Y, Hosen Y, Yagi K, *et al.* Soil microbial biomass and activities in a Japanese Andisol as affected by controlled release and application depth of urea[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, **42**(2): 89-96.
- [29] Shi W, Norton J M. Microbial control of nitrate concentrations in an agricultural soil treated with dairy waste compost or ammonium fertilizer[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**(10): 1453-1457.
- [30] Webster G, Embley T M, Prosser J I. Grassland management regimens reduce small-scale heterogeneity and species diversity of β -proteobacterial ammonia oxidizer populations[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, **68**(1): 20-30.
- [31] Song Y N, Lin Z M. Abundance and community composition of ammonia-oxidizers in paddy soil at different nitrogen fertilizer rates[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, **13**(4): 870-880.
- [32] 王亚男, 曾希柏, 俄胜哲, 等. 施肥对设施菜地氨氧化细菌群落和丰度的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(12): 2425-2432.
- [33] 孟德龙, 杨扬, 伍延正, 等. 多年蔬菜连作对土壤氨氧化微生物群落组成的影响[J]. *环境科学*, 2013, **33**(4): 1331-1338.
- [34] 李虎, 黄福义, 苏建强, 等. 浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(12): 4659-4666.
- [35] Nicol G W, Leininger S, Schleper C, *et al.* The influence of soil pH on the diversity, abundance and transcriptional activity of ammonia oxidizing archaea and bacteria [J]. *Environmental Microbiology*, 2008, **10**(11): 2966-2978.
- [36] 曾泽彬, 朱波, 朱雪梅, 等. 施肥对夏玉米季紫色土 N_2O 排放及反硝化作用的影响[J]. *土壤学报*, 2013, **50**(1): 130-137.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China	CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)
Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China	LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (2823)
Diurnal Variation of PM _{2.5} Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date	MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)
Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2847)
Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang	ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)
Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain	JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)
Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaying City	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)
Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2881)
Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case	LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)
Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin	GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, <i>et al.</i> (2897)
Assessment of Gaseous Nitrogen (NH ₃ and N ₂ O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation	FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)
Soil CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons	WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)
Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2924)
Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir	ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (2932)
Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (2940)
Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai	XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (2947)
Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River	WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, <i>et al.</i> (2957)
Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream	LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)
Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2979)
Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area	LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (2989)
Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region	CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (3001)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China	WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, <i>et al.</i> (3007)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River	CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)
Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland	WANG Qi-dong, SONG Jin-ning, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)
Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)
Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan	CHANG Sheng, ZHAO Xing-nu, LIU Yan, <i>et al.</i> (3041)
Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3049)
Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, <i>et al.</i> (3058)
Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce ³⁺ and Cu ²⁺ Ions	ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, <i>et al.</i> (3067)
Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor	DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3073)
Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol	XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)
Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO ₂ in Aqueous Solution	YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, <i>et al.</i> (3086)
Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)
Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater	LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)
Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)
Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment	LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (3114)
Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia	GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (3120)
Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)
Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid	HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (3135)
Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province	WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (3144)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics	ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (3151)
Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties	FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)
Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method	LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (3169)
Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu ²⁺ , Zn ²⁺ Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions	ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)
Preparation and NH ₄ ⁺ -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges	WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)
Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions	ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (3192)
Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (3201)
Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization	JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)
Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance	LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, <i>et al.</i> (3224)
Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils	LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, <i>et al.</i> (3229)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年8月15日 第37卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 8 Aug. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行