

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.10
第41卷 第10期

目次

青岛春节期间大气污染特征及烟花燃放一、二次贡献分析 方天歌, 姚小红, 孟赫, 陈春强 (4345)

基于在线观测的天津市 PM_{2.5} 污染特征及来源解析 肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 元洁, 唐逸, 杨宁, 郑乃源, 陈魁 (4355)

2017~2018年北京大气 PM_{2.5} 中水溶性无机离子特征 李欢, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4364)

北京南部城区 PM_{2.5} 中碳质组分特征 董贵明, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4374)

成都市冬季3次灰霾污染过程特征及成因分析 冯小琼, 陈军辉, 尹寒梅, 徐雪梅, 熊文朋, 梅林德, 钱骏, 刘政 (4382)

南京北郊黑碳气溶胶分布特征及来源 谢锋, 林煜棋, 宋文怀, 鲍孟盈, 章炎麟 (4392)

2019年10~12月京津冀及周边“2+26”城市重污染减排效果评估 朱媛媛, 高愈霄, 汪巍, 鲁宁, 许荣, 刘冰, 李健军 (4402)

保定市大气污染变化趋势及特征 苟银寅, 张凯, 李金娟, 吕文丽, 竹双, 黎洁, 何珊珊, 郑悦, 支敏康 (4413)

郑州市 VOCs 组分排放清单及其臭氧生成潜势 卢轩, 张瑞芹, 韩跃钢 (4426)

郑州市少数民族运动会期间 O₃ 及 VOCs 污染特征的演变和评估 赵金帅, 于世杰, 王楠, 马双良, 王维思, 尹沙沙, 李一丹, 张栋, 张瑞芹 (4436)

我国木器涂料及汽车涂料中挥发性有机物特征 柯云婷, 孙宇航, 成海荣, 刘锐源, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (4446)

典型脱硫工艺对燃煤锅炉烟气颗粒物的影响 张进生, 吴建会, 吕瑞鹤, 宋丹林, 黄凤霞, 张裕芬, 冯银厂 (4455)

不同居民燃煤炉具大气污染物排放差异性及其减排分析 张熠晨, 薛陈利, 刘杰, 钟连红, 薛亦峰 (4462)

天津市2017年移动源高时空分辨率排放清单 刘庚, 孙世达, 孙露娜, 金嘉欣, 房键旭, 宋鹏飞, 王婷, 吴琳, 毛洪钧 (4470)

四川省基于第二次污染源普查数据的人为源大气污染源排放清单及特征 徐晨曦, 陈军辉, 李媛, 何敏, 冯小琼, 韩丽, 刘政, 钱骏 (4482)

抗大气复合污染的城市森林植物初步筛选 李品, 卫妍妍, 冯兆忠 (4495)

宝鸡市绿植叶片重金属空间分布及污染特征 张军, 梁青芳, 高煜 (4504)

潮汕地区入海河流及水生生物中 PPCPs 分布特征及风险评估 秀措, 王尘辰, 吕永龙, 陆轶峰, 王聪, 张梦, 曹祥会 (4514)

泉州山美水库及入库河流沉积物中多溴二苯醚的时空分异和降解分析 韩文亮, 刘豫, 冯凯文 (4525)

长江上游典型山地农业小流域浅层地下水硝态氮时空变异特征及影响因素 江南, 周明华, 李红, 李子阳, 章熙峰, 朱波 (4539)

沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征 王宏, 徐娅玲, 张奇, 林超文, 翟丽梅, 刘海涛, 蒲波 (4547)

基于 DPeRS 模型的海河流域面源污染潜在风险评估 冯爱萍, 王雪蕾, 徐逸, 黄莉, 吴传庆, 王昌佐, 王洪亮 (4555)

降水空间异质性和非点源关键源区识别面积变化的影响 高晓曦, 左德鹏, 马广文, 徐宗学, 胡小红, 李佩君 (4564)

硅藻群落指示的近50年来大理西湖湖泊生态系统演变规律 张晨雪, 徐敏, 董一凡, 王荣, 方凤满 (4572)

海陆交互带土壤及河流沉积物中镉含量及形态分布特征 王芳婷, 陈植华, 包科, 赵信文, 孟宪萌, 黄长生 (4581)

内蒙古河套灌区排水干沟微塑料赋存特征及质量估算 王志超, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 杨建林, 秦一鸣, 李河 (4590)

透水/不透水格局特征对汇水单元径流污染的影响 姜智绘, 廖云杰, 谢文霞, 李佳, 房志达, 赵洪涛, 李叙勇 (4599)

铁铜双金属有机骨架 MIL-101(Fe, Cu) 活化双氧水降解染料性能 梁贺, 刘锐平, 安晓强, 刘会娟 (4607)

纳米 Cu⁰@Fe₃O₄ 活化 PMS 降解对-硝基苯酚的协同反应机制 石清清, 蒲生彦, 杨犀 (4615)

紫外活化过硫酸盐降解水中三氯蔗糖动力学和机制 余韵, 陆金鑫, 吕贞, 彭明国, 徐彬煜, 杜尔登, 郑璐 (4626)

污水生物处理工艺低温下微生物种群结构 尚越飞, 王申, 宗倪, 杜海洲, 张鑫, 齐嵘, 杨敏 (4636)

不同 DN 与 PN-ANAMMOX 耦合工艺处理中晚期垃圾渗滤液的微生物群落分析 陆明羽, 李祥, 黄勇, 殷记强, 方文焯 (4644)

全程自养颗粒污泥快速启动及混合营养型脱氮性能分析 齐泽坤, 王建芳, 钱飞跃, 刘雨馨, 乔伟, 李小蝶 (4653)

不同低碳氮比废水中好氧颗粒污泥的长期运行稳定性 袁强军, 张宏星, 陈芳媛 (4661)

潮土细菌及真菌群落对化肥减量配施有机肥和秸秆的响应 吴宪, 王蕊, 胡荷, 修伟明, 李刚, 赵建宁, 杨殿林, 王丽丽, 王欣奕 (4669)

不同轮作模式下作物根际土壤养分及真菌群落组成特征 孙倩, 吴宏亮, 陈阜, 康建宏 (4682)

酒糟生物炭短期施用对贵州黄壤氮素有效性及细菌群落结构多样性的影响 张萌, 刘彦伶, 魏全全, 苟久兰 (4690)

稻油不同轮作模式对农田甲烷和氧化亚氮排放的影响 陈友德, 赵杨, 高杜娟, 罗先富, 崔婷, 童中权, 吴家梅 (4701)

解淀粉芽孢杆菌生物有机肥防控土壤氮挥发 杨亚红, 薛莉霞, 孙波, 张宝, 庄绪亮, 庄国强, 白志辉 (4711)

外源磷对镉胁迫下水稻生长及镉累积转运的影响 霍洋, 仇银燕, 周航, 胡雨丹, 邓鹏辉, 魏宾纭, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (4719)

水稻不同生育期 As 胁迫下 As 累积关键生育期 邓鹏辉, 蔡雅琴, 周航, 刘雅, 杨文俊, 辜娇峰, 廖柏寒 (4726)

铅锌矿区玉米中重金属污染特征及健康风险评价 周艳, 王金忠, 李群, 黄剑波, 张胜田, 龙涛, 邓绍坡 (4733)

浙江省台州市电子垃圾拆解地多溴联苯醚浓度水平分布特征和迁移趋势 魏抱楷, 柳晨, 王英, 金军 (4740)

重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析 王锐, 邓海, 严明书, 何忠库, 周皎, 梁绍标, 曾琴琴 (4749)

重庆市畜禽粪便及菜田土壤中四环素类抗生素生态风险评价 彭秋, 王卫中, 徐卫红 (4757)

《环境科学》征订启事 (4435) 《环境科学》征稿简则 (4445) 信息 (4606, 4625, 4732)

解淀粉芽孢杆菌生物有机肥防控土壤氨挥发

杨亚红¹, 薛莉霞^{1,2}, 孙波^{2,3}, 张宝^{1,2}, 庄绪亮^{2,3}, 庄国强^{2,3}, 白志辉^{2,3*}

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 兰州 730050; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 为了验证解淀粉芽孢杆菌生物有机肥防控农田土壤氨挥发的效果,并了解其微生物生态学机制,通过温室蔬菜大棚盆栽生菜的方式,探究在施用解淀粉芽孢杆菌生物有机肥(BB)与化肥的条件下,土壤氨挥发量、作物品质及产量、土壤微生物的变化. 设置4组盆栽试验,依次为不施肥对照(CK)、100%化肥处理(C)、50% BB + 50% 化肥处理(B1)和100% BB处理(B2),3组处理的施氮量相同. 采用动态箱法对施肥后土壤氨挥发通量进行测定. 基于16S rDNA高通量测序分析,对土壤氨挥发峰值期间的细菌群落进行分析. 结果发现,与C组相比,B1和B2组的氨挥发总量分别降低79.5%和84.8%; B2组生菜硝酸盐含量最低、产量最高,相对于CK和C组分别增产50.5%和12.3%; B1组生菜的维生素C含量最高,为67.6 mg·kg⁻¹; 施用BB提高了土壤细菌群落的多样性及丰富度,特别是芽孢杆菌、硝化螺菌属相对丰度明显提升; 显示出施用BB对防治空气污染和提高氮素利用率具有重要作用.

关键词: 解淀粉芽孢杆菌; 微生物肥料; 氨挥发; 土壤细菌群落; 植物根际促生菌

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)10-4711-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201910157

Bacillus amyloliquefaciens Biofertilizer Mitigating Soil Ammonia Volatilization

YANG Ya-hong¹, XUE Li-xia^{1,2}, SUN Bo^{2,3}, ZHANG Bao^{1,2}, ZHUANG Xu-liang^{2,3}, ZHUANG Guo-qiang^{2,3}, BAI Zhi-hui^{2,3*}

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this study, we investigated the effectiveness and microbial mechanism of *Bacillus amyloliquefaciens* biofertilizer on reducing ammonia volatilization in farmland soil. Pot experiments were carried out to explore the effects of *B. amyloliquefaciens* biofertilizer (BB) and chemical fertilizer on soil ammonia volatilization, crop yield and quality, and soil microbial community. Four fertilization strategies were tested, namely no fertilizer (CK), 100% chemical fertilizer (C), 50% BB and 50% chemical fertilizer (B1), and 100% BB (B2). The dynamic flow-through chamber method was used to determine the soil ammonia volatilization flux after fertilization. The soil bacterial community during the peak period of ammonia volatilization was analyzed using 16S rDNA high-throughput sequencing. The results showed that the amount of ammonia volatilization in B1 and B2 decreased by 79.5% and 84.8%, respectively, as compared with treatment C. B2 had the lowest nitrate content and the highest yield; the yield of B2 increased by 50.5% and 12.3% as compared to that of CK and C, respectively. B1 had the highest content of vitamin C, which was 67.6 mg·kg⁻¹. The application of BB improved the diversity and richness of soil bacterial community, especially the relative abundance of *Bacillus* and *Nitrospira*. This shows that BB plays an important role in preventing air pollution and improving nitrogen utilization.

Key words: *Bacillus amyloliquefaciens*; biofertilizer; ammonia volatilization; soil bacterial community; plant growth promoting rhizobacteria

农业生态系统是大气 NH₃ 最重要的人为来源. 其中,施用合成氮肥的农田是 NH₃ 排放的主要来源^[1,2]. 氮(N)肥是世界上使用最广泛的肥料之一,是土壤-作物系统的主要氮输入源^[3,4]. 然而,在作物生产中过度使用氮肥会使其通过地表径流、淋溶、氨(NH₃)和一氧化二氮(N₂O)气体排放,造成大量氮肥损失^[5]. 其中,氨挥发是土壤-作物系统氮损失的主要途径之一^[6],化肥施用造成的氨排放占氨排放总量的53.5%,是第一大排放源^[7,8]. 氨挥发带走了大量的氮元素,导致施用的肥料发挥不了预期的养分效果^[9]. 大部分 NH₃ 在大气中存留6 d左右后返回地表,10%~20%会被氧化成氮氧化物,大部分

含氮化合物随干湿沉降进入农田、森林、草原、江河和湖泊等,引起土壤酸化和水体富营养化^[10~12]. 同时,氨也是大气气溶胶的重要前体物,可造成严重灰霾污染,还会破坏甲烷氧化,使温室效应加剧^[13,14],给环境带来巨大的影响. 因此,防控农业氨排放具有重要意义.

近年来,我国农业种植结构不断调整,蔬菜生产

收稿日期: 2019-10-22; 修订日期: 2020-03-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501404, 2018YFC0213301); 中国科学院重点部署项目(ZDRW-ZS-2016-5); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07105-001)

作者简介: 杨亚红(1976~),女,博士,副教授,主要研究方向为环境污染控制机理及其新技术, E-mail: yangyahong@lut.cn

* 通信作者, E-mail: zhbai@rcees.ac.cn

逐渐成为农村经济的支柱性产业之一^[15,16]. 河北省在全国温室蔬菜生产及产品供应方面占有重要的地位^[17]. 人们往往会通过增加施肥量来提高蔬菜产量,而过度施肥将会导致土壤环境恶化、肥料利用率降低以及蔬菜品质下降等问题^[18,19]. 张彦才等^[20]的调查显示,在河北省黄瓜生产中,平均施氮量高达 $1\ 269\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,是当地推荐施氮量的数倍,这无疑会带来严重的氨挥发损失问题. 因此,提高肥料利用率及防控农业氨排放仍是当前亟待解决的重要问题之一^[21].

植物根际促生细菌 (plant growth promoting rhizobacteria, PGPR) 在植物生长和病虫害防治中发挥着重要作用^[22]. 以畜禽粪便和农作物秸秆等废弃生物质为原料经无害化处理、腐熟制备成的有机物料可作为良好的载体,与 PGPR 复合,可得绿色高效的生物有机肥. 生物有机肥可以促进植物对氮的吸

收、磷的增溶和植物激素的分泌^[23,24],在农业系统中发挥着重要的作用. 本研究考察了解淀粉芽孢杆菌生物有机肥 (BB) 对土壤氨挥发防控及其可能机制,以期为提高氮素利用率,改善农业种植环境提供依据.

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

本试验地点位于河北省廊坊市永清县,地处河北中部,京、津、保三角地带中心,北纬 $38^{\circ}28' \sim 40^{\circ}15'$ 、东经 $116^{\circ}7' \sim 117^{\circ}14'$ 之间. 试验区域属北温带亚湿润气候区,大陆性季风气候,年平均日照 $2\ 740\ \text{h}$,雨热同季,年平均降雨量 $540\ \text{mm}$,年平均气温 11.5°C . 供试土壤为园区大棚内的碱性土壤. 施肥前土壤样品采用 5 点采样法,风干过筛 $2\ \text{mm}$ 后,测得其理化性质见表 1 所示.

表 1 土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil

项目	pH	含水率 /%	有机质 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	NH_4^+-N $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	NO_3^--N $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	总氮 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效磷 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
参数值	8.67	9.49	27.9	5.53	5.25	1320	48.0	160

1.2 试验设计

在蔬菜大棚内,采用盆栽试验,每个花盆中装入菜地土壤 $15\ \text{kg}$,从 2018 年 12 月下旬开始到 2019 年 2 月上旬结束. 根据当地一季蔬菜种植所需施肥量,确定施氮量为 $0.25\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,化肥选用复合肥 (N- P_2O_5 - K_2O 含量均为 17%),生物有机肥和化肥的施用量根据氮含量确定,保持每个试验组的含氮量相同. 生物有机肥含氮量为 5.11%,有效活菌数符合标准 NY884-2012. 本试验不同处理的肥料作为基肥一次性施入,施肥方式采用混施,每盆种植生菜 8 株. 除了肥料种类不同,各个处理的其他生产管理措施均一致. 各处理均采用五点法对土壤样品进行采集,采集时间为施肥后第一周每天采集 1 次,之后 $2 \sim 3\ \text{d}$ 采集一次,直至蔬菜收割. 本试验设 4 个处理 4 个平行,随机排列. 4 个处理分别为:不施肥处理 (CK)、100% 化肥处理 (C)、50% 解淀粉芽孢杆菌生物有机肥 + 50% 化肥处理 (B1) 和 100% 解淀粉芽孢杆菌生物有机肥处理 (B2).

1.3 氨挥发测定

如图 1 所示,本试验采用动态箱法测定每日的氨挥发量^[25],该方法适用于田间小区对比研究,其基本原理是以真空泵作为动力源,利用空气置换密闭室内的 NH_3 ,挥发出来的 NH_3 随着抽气气流进入吸收瓶中,以含有甲基红-亚甲基蓝混合指示剂的 2% 硼酸溶液 $50\ \text{mL}$ 作为氨吸收液,最后用标准

$0.005\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的稀硫酸溶液滴定来计算氨挥发量,待含有甲基红-亚甲基蓝混合指示剂的硼酸吸收液观察不到明显颜色变化时,试验结束. 本试验测定氨挥发采样时间为每天 $10:00 \sim 14:00$ 连续采集 4 h. 施肥后第一周每天测一次氨挥发,之后 $2 \sim 3\ \text{d}$ 测一次,与土样采集日期一致.

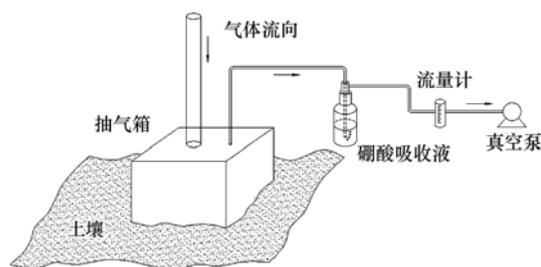


图 1 氨挥发收集装置示意

Fig. 1 Ammonia volatilization collection device

土壤氨挥发速率计算公式如下 (用 $0.005\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的标准酸滴定硼酸吸收液,再将滴定消耗的硫酸体积代入公式计算氨挥发量):

$$\text{土壤氨发速率} [\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{d})^{-1}] = \left(\frac{M}{A \times D} \right) \times 10^{-2}$$

式中, M 为密闭法单个装置每次测得的氨 (NH_3 , mg); A 为捕获装置的横截面积 (hm^2); D 为每次连续捕获的时间 (d).

1.4 土壤微生物高通量测序分析

取氨挥发峰值期间的土壤样品,利用

FastDNA[®] SPIN Kit for Soil(MP Biomedicals, USA) 提取土壤 DNA, 操作步骤按照试剂盒说明手册, 并做简单修改. 提取的 DNA 样品送至北京美吉桑格生物医药科技有限公司进行 Illumina MiSeq 高通量测序. 基于细菌 16S rRNA 基因的 V3-V4 区进行 PCR (ABI GeneAmp[®] 9700 型) 扩增, 引物序列为 338F (5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3') 和 806R (5'-GGAC TACHVGGGTWTCTAAT-3'). PCR 试验采用 TransGen AP221-02; TransStart Fastpfu DNA Polymerase, 20 μ L 反应体系. 反应参数: ①1 \times (3 minutes at 95 $^{\circ}$ C); ②循环数 \times (30 seconds at 95 $^{\circ}$ C; 30 seconds at 退火温度 $^{\circ}$ C; 45 seconds at 72 $^{\circ}$ C); ③10 minutes at 72 $^{\circ}$ C, 10 $^{\circ}$ C until halted by user. 扩增完成后利用 2% 琼脂糖凝胶电泳检测 PCR 产物, 并对目标条带进行切胶回收.

1.5 土壤理化性质、蔬菜产量和品质等指标测定方法

土壤样品 pH 值(1:2.5 土壤: 去除 CO₂ 的水) 采用实验室 pH 计(METTLER TOLEDO)测定^[26]. 土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量(1:5 土壤: 1 mol·L⁻¹ KCl 溶液) 采用连续流动分析仪(BRAN + LUEBBE, AA3, Germany)测定^[6]. 蔬菜收割后, 将各处理的所有生菜用蒸馏水清洗干净, 并吸去表面的水分, 称重测定其产量. 蔬菜总氮、硝酸盐和维生素 C 分别按照国家标准方法测定^[27-29].

1.6 数据分析

本试验所有数据均由 Microsoft Excel 2010 及 Origin 8 (Origin Lab, USA) 生成. 单因素方差分析采用 SPSS 分析 (Statistical Product and Service Solutions 24.0 Windows, SPSS Inc, Chicago, USA), 若 $P < 0.05$, 则处理组间存在显著性差异. 不同施肥处理组间群落组成差异采用偏最小二乘法判别分析 (partial least squares discriminant analysis, PLS-DA).

2 结果与讨论

2.1 解淀粉芽孢杆菌生物有机肥对 NH₃ 挥发的影响

如图 2 所示为各处理的土壤氨挥发速率. 在施肥后, 所有处理均快速出现氨挥发, 在升至峰值后开始下降, 直至土壤氨挥发接近对照处理水平. 其中, C 处理在施肥后快速出现氨挥发, 并急剧上升, 在第 5d 达到峰值, 为 6.93 kg·(hm²·d)⁻¹. B1 和 B2 处理的氨挥发速率分别在施肥后的第 6d 和第 4d 达到峰值, 为 0.57 kg·(hm²·d)⁻¹ 和 0.96 kg·(hm²·d)⁻¹, 相对于处理 C 的氨挥发速率峰值分别降低了 91.8% 和 86.1%. CK 处理达到氨挥发通量峰值所需的时间也与 B2 相同, 在施肥后的第 4d 达到峰值, 为 0.87 kg·(hm²·d)⁻¹.

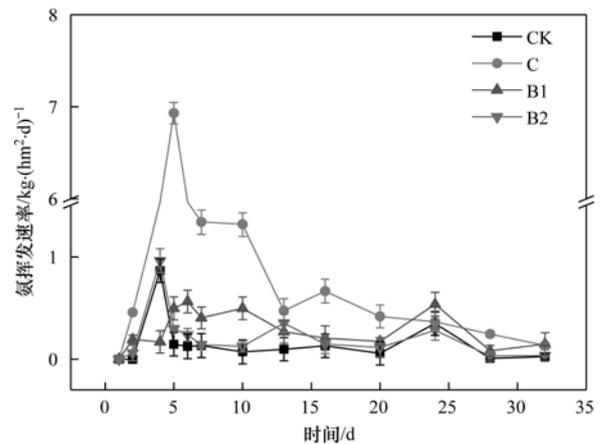


图 2 不同施肥处理的土壤的氨挥发速率

Fig. 2 Soil ammonia volatilization rate of different fertilization treatments

氮肥利用率低的一个重要原因就是氨挥发损失, 氨挥发量越大, 则氮肥利用率越低. 土壤氨挥发累积量如图 3 所示, 在相同施氮量的条件下, 氨挥发总量趋势为: C > B1 > B2 > CK. 其中, CK 处理的氨挥发总量为 1.67 kg·hm⁻², B2 处理的氨挥发总量为 2.11 kg·hm⁻², B1 处理的氨挥发总量为 2.85 kg·hm⁻², C 处理的氨挥发总量为 13.9 kg·hm⁻². 相对于 C 处理, B1 和 B2 处理氨挥发量均有大幅度降低, 其中, B1 处理氨挥发总量降低 79.5%, B2 处理氨挥发总量降低 84.8%.

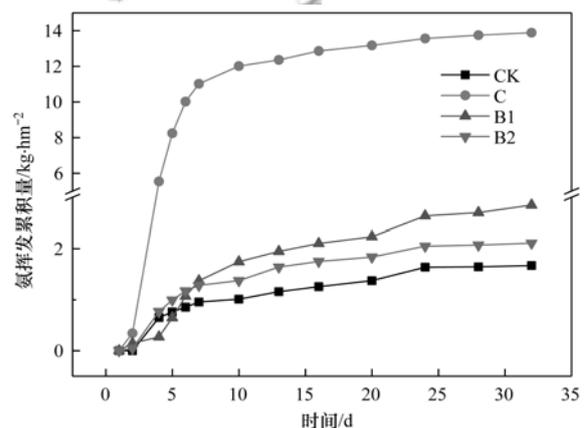


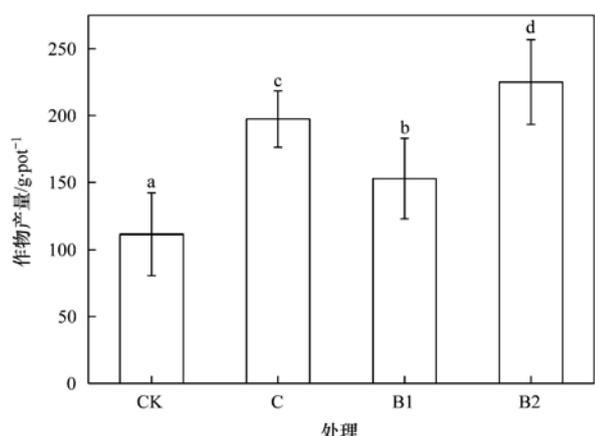
图 3 不同施肥处理的土壤的氨挥发累积量

Fig. 3 Soil ammonia volatilization accumulation of different fertilization treatments

2.2 解淀粉芽孢杆菌生物有机肥对生菜产量及品质的影响

每盆生菜在不同施肥处理条件下的产量如图 4 所示, 总体趋势为: B2 > C > B1 > CK. B2 处理产量最高为 225 g·pot⁻¹, 相对于 CK 和 C 处理分别增产 50.5% 和 12.3%, 且差异显著.

人体摄入的硝酸盐大部分来自蔬菜, 过量硝酸盐摄入会在人体内还原成为亚硝酸盐, 对人体健康



不同小写字母表示处理差异显著, $P < 0.05$

图 4 不同肥料处理的生菜产量

Fig. 4 Lettuce yield of different fertilization treatments

构成危害^[30]. 蔬菜积累的硝酸盐含量不仅与生物学特性、光照和湿度等有关外,还与栽培基质中氮营养水平、氮素形态及氮、磷、钾比例和硫营养状况等有关^[31, 32]. 本试验的结果表明,各试验组收获的生菜中硝酸盐的含量都低于标准限值 ($\leq 3000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, GB 19338-2003)^[33],食用安全性较高. 维生素C含量是蔬菜营养品质的重要指标,化肥与BB混合施用的生菜维生素C含量最高(表2).

表 2 不同肥料处理对生菜品质的影响¹⁾

Table 2 Effect of different fertilizer treatments on the quality of lettuce

处理	总氮 /mg·kg ⁻¹	硝酸盐 /mg·kg ⁻¹	维生素C /mg·kg ⁻¹
CK	1 800 ± 177a	232 ± 120a	20.9 ± 0.5a
C	2 500 ± 93c	446 ± 37b	43.8 ± 0.8b
B1	2 320 ± 160b	532 ± 92c	67.6 ± 1.2c
B2	1 800 ± 204a	238 ± 97a	23.0 ± 0.4a

1) 同列不同小写字母表示处理差异显著, $P < 0.05$

2.3 解淀粉芽孢杆菌生物有机肥对土壤理化性质的影响

本试验期间各处理的土壤 pH 变化如图 5 所示,在施肥后土壤 pH 均开始逐渐下降,这与土壤氨挥发速率成正相关,土壤 pH 越低,氨挥发速率越小. 试验结束后,各处理土壤 pH 均比施肥前低,这是由于化肥中的成分大多属于酸性肥料(如过磷酸钙、硫酸铵和氯化铵等),即植物吸收肥料中的养分离离子后,土壤中氢离子增多,易造成土壤酸化. 加之大量的 NH_4^+ 、 K^+ 和土壤胶体吸附的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子发生交换,使土壤结构被破坏,导致土壤板结、土壤有机质下降,化肥无法补偿有机质的缺乏,进一步影响了土壤微生物的生存,降低了肥效. 因此,长时间且过度施用化肥不仅会导致土壤酸化,还会引起土壤板结,肥力下降. 本试验期间,CK 处理土壤 pH 较高且相对稳定,为 8.53 ~ 8.21. C 处理的土

壤 pH 降低最多,降低了 1.10 个 pH 单位. CK 处理的土壤 pH 降低最少,降低了 0.29 个 pH 单位. 在作物收获后,CK、C、B1 和 B2 处理的土壤 pH 分别为 8.23、7.60、7.86 和 8.22.

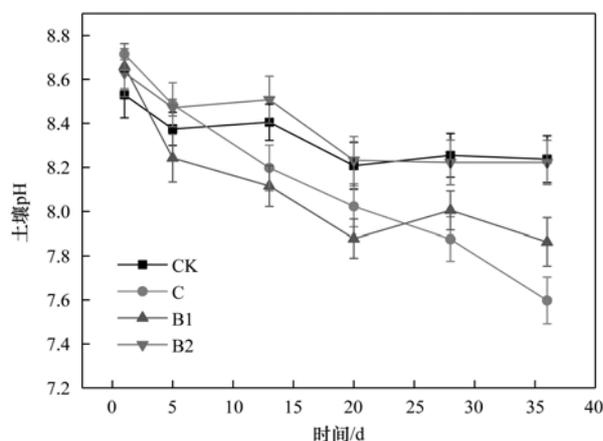


图 5 不同肥料处理的土壤 pH 的变化

Fig. 5 Changes in soil pH of different fertilizer treatments

硝化过程(nitrification)是指氨在微生物作用下氧化为硝酸的过程^[34]. 在土壤中,硝化细菌可以将产生的 NH_4^+ -N 氧化为 NO_3^- -N,这样既可提高氮元素的利用效率,也会降低土壤的氨挥发. 因此,土壤中 NH_4^+ -N 的含量是影响氨挥发重要元素之一. 图 6 为施用不同肥料后的土壤 NH_4^+ -N 的含量变化,所有处理土壤 NH_4^+ -N 含量都是在施肥后 0 ~ 5 d 迅速上升,且达到峰值,然后又开始下降,直至趋于稳定,这与土壤氨挥发速率成正相关,土壤样品的 NH_4^+ -N 含量越高,氨挥发速率越大. C 处理的土壤 NH_4^+ -N 含量显著高于 B1 和 B2 处理 ($P < 0.05$),表明施用一定比例的 BB 可有效降低土壤中 NH_4^+ -N 的积累.

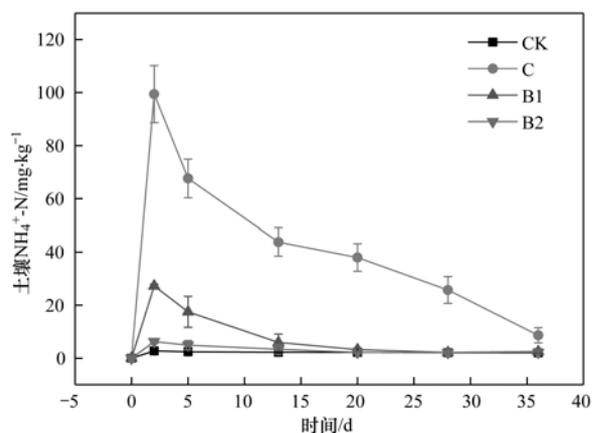


图 6 不同肥料处理的土壤 NH_4^+ -N 的变化

Fig. 6 Changes in soil NH_4^+ -N of different fertilizer treatments

NO_3^- -N 在土壤中的含量变化是土壤硝化作用的重要指标之一. 图 7 为施用不同肥料后土壤 NO_3^- -N 的含量变化. 所有施肥处理土壤 NO_3^- -N 含量基本都

呈现出先迅速上升,后缓慢升高,大约在第 20 d 之后,逐渐趋于稳定.可见,施用一定比例的 BB 可以减少土壤中 NO_3^- -N 的积累.

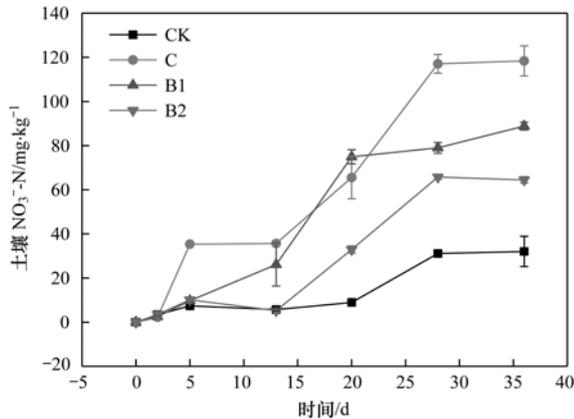


图 7 不同肥料处理土壤 NO_3^- -N 的变化

Fig. 7 Changes in soil NO_3^- -N of different fertilizer treatments

2.4 不同施肥方式对土壤微生物群落结构的影响

2.4.1 土壤样品测序有效序列及 OTU 统计

在 12 个土壤样品的细菌群落分析中,共获得

表 3 不同处理土壤细菌 16S rRNA 基因 V3-V4 区测序深度、多样性及丰富度指数

Table 3 Sequencing depth, diversity, and richness index of V3-V4 region of 16S rRNA gene in different soils

处理	Sobs 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	ACE 指数	Chao 指数	Coverage 指数
CK	2010	6.41	0.005 2	2 669.77	2 640.16	0.956 2
C	2011	6.46	0.005 3	2 756.42	2 678.59	0.955 9
B1	2023	6.35	0.006 8	2 860.69	2 865.31	0.955 6
B2	2030	6.42	0.005 2	2 829.54	2 838.28	0.955 2

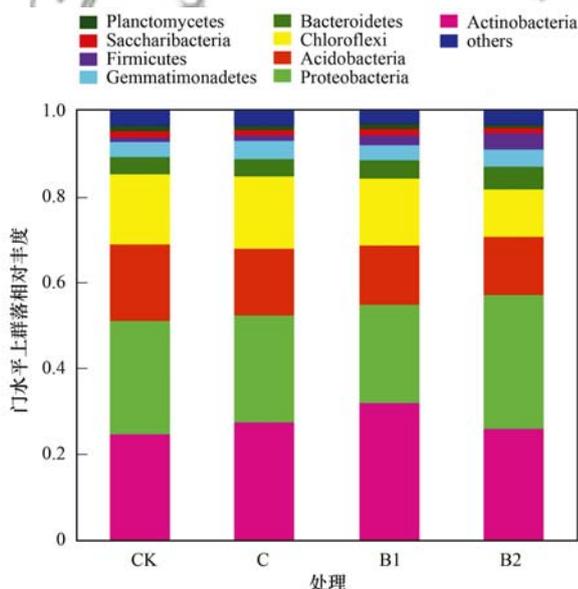


图 8 门水平上不同肥料处理土壤样品中主要群落结构组分

Fig. 8 Composition of main community structure components in soil samples treated with different fertilizers at the level of the phylum

后土壤样品中主要有以下优势微生物,分别为放线菌门(Actinobacteria)、变形菌门(Proteobacteria)、酸

226 392 个高质量序列,均一化后的样品序列在 97% 的相似水平下将其聚类为不同的 OTUs,共得到 3 541 个 OTUs.

2.4.2 土壤微生物的多样性及丰富度分析

如表 3 所示,不同处理土壤细菌 16S rRNA 基因 V3-V4 区样本的测序深度指数 Coverage 均较高,说明此次测序能够覆盖样本中绝大多数的微生物信息,可以反映样本的真实情况. Shannon 指数和 Simpson 指数常用于反映群落多样性,其中 Shannon 指数数值越大说明样本的多样性就越高, Simpson 指数则与之相反. 本研究中所有处理样品的 Shannon 指数均较高且相近,而 Simpson 指数均较低且相近,所以土壤微生物群落多样性均较高,各处理间无明显变化. ACE 和 Chao 指数一般用来反映群落丰富度,所有处理 ACE 和 Chao 丰富度指数趋势为 B1 > B2 > C > CK,说明 B1 处理细菌群落最丰富,CK 处理则最稀少.

2.4.3 土壤中微生物群落结构变化分析

如图 8 所示,在门的分类水平上,不同肥料处理

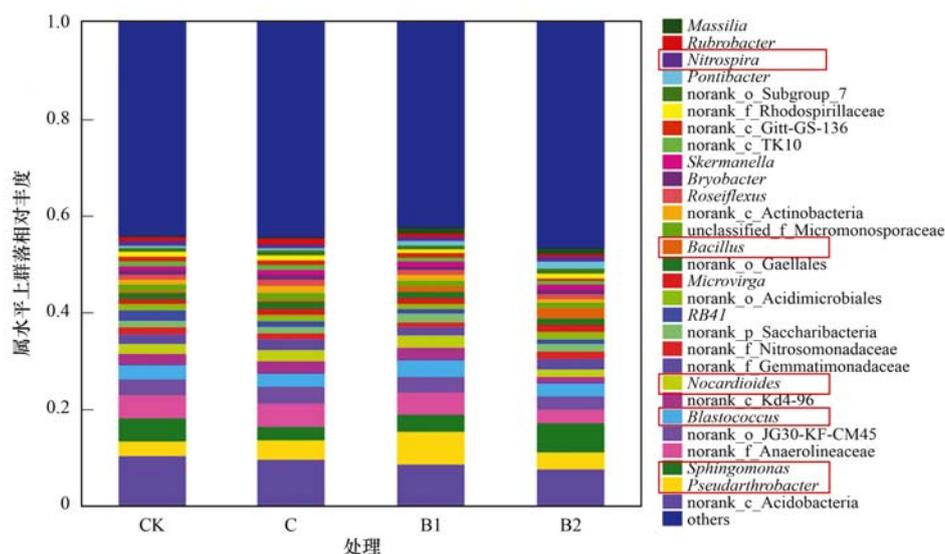
杆菌门(Acidobacteria)、绿弯菌门(Chloroflexi)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)和厚壁菌门(Firmicutes)等.

结果表明,施用化肥和解淀粉芽孢杆菌生物有机肥均使得土壤微生物群落相对丰度发生改变.相对于 CK 处理,C、B1 和 B2 处理厚壁菌门相对丰度分别提高 25.6%、55.4% 和 73.2%.芽孢杆菌属于厚壁菌门,作为常见的植物促生菌,在植物健康生长中发挥了重要作用.因此,厚壁菌门丰度的增加可能是由于解淀粉芽孢杆菌的定殖引起的.此外,化肥 C 处理和解淀粉芽孢杆菌生物有机肥 B2 处理中参与硝化过程的相关功能微生物硝化螺旋菌门(Nitrospirae)的相对丰度分别为 0.84% 和 1.00%,这与氨挥发损失呈负相关,硝化功能微生物丰度越高,越有利于 NH_4^+ -N 氧化为 NO_3^- -N.可能导致了解淀粉芽孢杆菌生物有机肥处理的氨挥发损失低于常规化肥处理.

如图 9 所示,在属的分类水平上(除不能被准确识别的菌属外),分别为:*Pseudarthrobacter*、鞘氨醇单胞菌(*Sphingomonas*)、芽球菌属(*Blastococcus*)、类

诺卡氏属(*Nocardioides*)、芽孢杆菌(*Bacillus*)和硝化螺菌属(*Nitrospira*)等. CK 处理土样品中,主要优势菌属占比从高到低分别为:鞘氨醇单胞菌(4.63%)、*Pseudarthrobacter*(3.23%)、芽球菌属(2.81%)、类诺卡氏属(1.86%)、硝化螺菌属(0.65%)和芽孢杆菌(0.50%). C 处理土壤样品中,主要优势菌属占比从高到低分别为:*Pseudarthrobacter*(3.99%)、芽球菌属(2.87%)、鞘氨醇单胞菌(2.81%)、类诺卡氏属(2.22%)、硝化螺菌属(0.83%)和芽孢杆菌(0.71%). B1 处理土壤样品中,主要优势菌属占比从高到低分别为:*Pseudarthrobacter*(6.73%)、鞘氨醇单胞菌(3.50%)、芽球菌属(3.51%)、类诺卡氏属

(2.46%)、芽孢杆菌(1.34%)和硝化螺菌属(0.90%). B2 处理土壤样品中,主要优势菌属占比从高到低分别为:鞘氨醇单胞菌(6.24%)、*Pseudarthrobacter*(3.47%)、芽球菌属(2.76%)、芽孢杆菌(2.32%)、类诺卡氏属(1.58%)和硝化螺菌属(0.99%). 结果表明,相对于 C 处理,施用解淀粉芽孢杆菌生物有机肥的 B1 和 B2 处理土壤中,芽孢杆菌分别提高 47.0% 和 69.4%,有利于作物对养分的吸收利用,可能是由于解淀粉芽孢杆菌的定殖引起的. 具有硝化作用的 *Nitrospira* 属相对丰度也有所提升,从而促进土壤硝化过程,减少土壤中氨氮的含量,对土壤氨挥发防控起到积极作用.



红色框标注了不同肥料处理后土壤样品中主要优势菌属

图 9 属水平上不同肥料处理土壤样品中主要群落结构组分

Fig. 9 Composition of major community structure components in soil samples treated with different fertilizers at the level of the genus

进一步分析不同施肥处理组间群落组成差异,如图 10 为 PLS-DA 分析. PLS-DA 是多变量数据分析技术中的判别分析法,经常用来处理分类和判别

问题. 通过对主成分适当的旋转,PLS-DA 可以有效地对组间观察值进行区分. 结果表明, B1、B2、C 及 CK 处理组可明显区分并聚成 4 个类群,说明不同的施肥策略对土壤微生物群落结构造成了显著

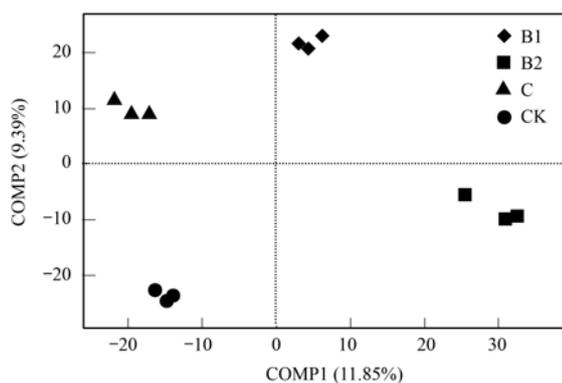


图 10 不同施肥处理组间群落组成差异分析

Fig. 10 Analysis of community composition differences between different fertilization treatment groups

3 结论

(1) 与施用化肥相比,在相同施氮量条件下,施用解淀粉芽孢杆菌生物有机肥,替代部分或全部化肥,能够降低农田土壤的氨挥发量 70% 以上;同时,蔬菜硝酸盐含量降低 46.6%,产量增加 12.3%.

(2) 解淀粉芽孢杆菌生物有机肥的施用,提高了土壤细菌群落的多样性及丰富度,特别是芽孢杆菌、硝化螺菌属相对丰度明显提升,促进了土壤硝化过程,从而减少了氨挥发.

致谢:感谢河北省恒都美业农业科技园区对本

研究的支持。樊浩南、王时杰、郑晓旭和徐立娜在试验准备方面的帮助,刘小珍和张颖颖等在蔬菜田间管理和试验方面提供帮助,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] Li S Q, Zheng X H, Zhang W, *et al.* Modeling ammonia volatilization following the application of synthetic fertilizers to cultivated uplands with calcareous soils using an improved DNDC biogeochemistry model [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **660**: 931-946.
- [2] 王一宇,王圣森,戴九兰. 生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响 [J]. *环境科学*, 2019, **40** (8): 3738-3745.
Wang Y Y, Wang S S, Dai J L. Effect of biochar on ammonia volatilization in saline-alkali soil [J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (8): 3738-3745.
- [3] Shan L N, He Y F, Chen J, *et al.* Ammonia volatilization from a Chinese cabbage field under different nitrogen treatments in the Taihu Lake Basin, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **38**: 14-23.
- [4] Chen X P, Cui Z L, Fan M S. Producing more grain with lower environmental costs [J]. *Nature*, 2014, **514** (7523): 486-489.
- [5] Alva A K, Paramasivam S, Fares A, *et al.* Nitrogen best management practice for citrus trees: II. Nitrogen fate, transport, and components of N budget [J]. *Scientia Horticulturae*, 2006, **109** (3): 223-233.
- [6] Wang X, Xu S J, Wu S H, *et al.* Effect of *Trichoderma viride* biofertilizer on ammonia volatilization from an alkaline soil in northern China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **66**: 199-207.
- [7] 孙猛,徐媛,刘茂辉,等. 天津市农田氮肥施用氨排放量估算及分布特征分析 [J]. *中国生态农业学报*, 2016, **24** (10): 1364-1370.
Sun M, Xu Y, Liu M H, *et al.* Emission and distribution characteristics of ammonia from nitrogen application in farmland of Tianjin [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, **24** (10): 1364-1370.
- [8] 邹娟,胡学玉,张阳阳,等. 不同地表条件下生物炭对土壤氨挥发的影响 [J]. *环境科学*, 2018, **39** (1): 348-354.
Zou J, Hu X Y, Zhang Y Y, *et al.* Effect of biochar on ammonia volatilization from soils of different surface conditions [J]. *Environmental Science*, 2018, **39** (1): 348-354.
- [9] 董全勇. 日光温室土壤氨挥发影响因素分析 [J]. *现代农村科技*, 2016, (5): 38.
- [10] Jenkinson D S. An introduction to the global nitrogen cycle [J]. *Soil Use and Management*, 1999, **6** (2): 55-61.
- [11] Van Meter K J, Basu N B, Van Cappellen P. Two centuries of nitrogen dynamics: legacy sources and sinks in the Mississippi and Susquehanna River Basins [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2017, **31** (1): 2-23.
- [12] 龚巍巍,张宜升,何凌燕,等. 菜地氨挥发损失及影响因素原位研究 [J]. *环境科学*, 2011, **32** (2): 345-350.
Gong W W, Zhang Y S, He L Y, *et al.* In-situ measurement on volatilization loss of ammonia in the vegetable field and its influencing factors [J]. *Environmental Science*, 2011, **32** (2): 345-350.
- [13] 沈兴玲,尹沙沙,郑君瑜,等. 广东省人为源氨排放清单及减排潜力研究 [J]. *环境科学学报*, 2014, **34** (1): 43-53.
Shen X L, Yin S S, Zheng J Y, *et al.* Anthropogenic ammonia emission inventory and its mitigation potential in Guangdong Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34** (1): 43-53.
- [14] 尤翔宇,刘湛,张青梅,等. 长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征 [J]. *环境科学*, 2016, **37** (1): 94-101.
You X Y, Liu Z, Zhang Q M, *et al.* Anthropogenic ammonia emission inventory and its spatial distribution in Chang-Zhu-Tan Region [J]. *Environmental Science*, 2016, **37** (1): 94-101.
- [15] 李银坤,梅旭荣,武雪萍,等. 不同水氮条件对日光温室冬春茬黄瓜栽培氨挥发的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2012, **20** (11): 1413-1419.
Li Y K, Mei X R, Wu X P, *et al.* Effects of irrigation and nitrogen application on ammonia volatilization in solar greenhouse soils in winter-spring cucumber cultivation [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, **20** (11): 1413-1419.
- [16] 万合锋,赵晨阳,钟佳,等. 施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH₄、N₂O 和 NH₃ 排放特征 [J]. *环境科学*, 2014, **35** (3): 892-900.
Wan H F, Zhao C Y, Zhong J, *et al.* Emission of CH₄, N₂O and NH₃ from vegetable field applied with animal manure composts [J]. *Environmental Science*, 2014, **35** (3): 892-900.
- [17] 陈贵林,张进文. 河北省设施蔬菜生产可持续发展问题的探讨 [J]. *沈阳农业大学学报*, 2000, **31** (1): 29-31.
Chen G L, Zhang J W. Problems and countermeasures on sustainable development of protected vegetable production in Hebei Province [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2000, **31** (1): 29-31.
- [18] Guo R Y, Li X L, Christie P, *et al.* Seasonal temperatures have more influence than nitrogen fertilizer rates on cucumber yield and nitrogen uptake in a double cropping system [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **151** (3): 443-451.
- [19] Di H J, Cameron K C. Nitrate leaching in temperate agroecosystems: sources, factors and mitigating strategies [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, **64** (3): 237-256.
- [20] 张彦才,李巧云,翟彩霞,等. 河北省大棚蔬菜施肥状况分析与评价 [J]. *河北农业科学*, 2005, **9** (3): 61-67.
Zhang Y C, Li Q Y, Zhai C X, *et al.* The condition and appraisal of the vegetable apply fertilizer in greenhouse in Hebei province [J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2005, **9** (3): 61-67.
- [21] 张增杰,张双,韩玉花,等. 农业源氨排放控制对策初步研究 [J]. *江苏农业科学*, 2016, **44** (1): 439-442.
- [22] Mandal S, Thangarajan R, Bolan N S, *et al.* Biochar-induced concomitant decrease in ammonia volatilization and increase in nitrogen use efficiency by wheat [J]. *Chemosphere*, 2016, **142**: 120-127.
- [23] 徐文思,姜瑛,李引,等. 一株植物促生菌的筛选、鉴定及其对花生的促生效应研究 [J]. *土壤*, 2014, **46** (1): 119-125.
Xu W S, Jiang Y, Li Y, *et al.* Isolation, identification of plant growth-promoting bacteria and its promoting effects on peanuts [J]. *Soils*, 2014, **46** (1): 119-125.
- [24] Bashan Y, de-Bashan L E, Prabhu S R, *et al.* Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: formulations and practical perspectives (1998-2013) [J]. *Plant and Soil*, 2014, **378** (1-2): 1-33.
- [25] Sun L Y, Wu Z, Ma Y C, *et al.* Ammonia volatilization and atmospheric N deposition following straw and urea application from a rice-wheat rotation in southeastern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **181**: 97-105.
- [26] NY/T 1121.2-2006, 土壤检测 第 2 部分: 土壤 pH 的测定 [S].
- [27] GB 5009.5-2016, 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定 [S].
- [28] GB 5009.33-2016, 食品安全国家标准 食品中亚硝酸盐与硝

- 酸盐的测定[S].
- [29] GB 5009.86-2016, 食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定[S].
- [30] 郭开秀, 姚春霞, 陈亦, 等. 上海市秋季蔬菜硝酸盐含量及风险摄入评估[J]. 环境科学, 2011, **32**(4): 1177-1181.
Guo K X, Yao C X, Chen Y, *et al.* Nitrate contents in autumn vegetables and assessment of nitrate intake in shanghai [J]. Environmental Science, 2011, **32**(4): 1177-1181.
- [31] 赵凤艳, 魏自民, 陈翠玲. 氮肥用量对蔬菜产量和品质的影响[J]. 农业系统科学与综合研究, 2001, **17**(1): 43-44.
Zhao F Y, Wei Z M, Chen C L. The effect of N application rate on yield and quality of vegetable [J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2001, **17**(1): 43-44.
- [32] 王朝辉, 宗志强, 李生秀, 等. 蔬菜的硝态氮累积及菜地土壤的硝态氮残留[J]. 环境科学, 2002, **23**(3): 79-83.
Wang Z H, Zong Z Q, Li S X, *et al.* Nitrate accumulation in vegetables and its residual in vegetable fields[J]. Environmental Science, 2002, **23**(3): 79-83.
- [33] GB 19338-2003, 蔬菜中硝酸盐限量[S].
- [34] 刘帅. 典型生境中氨氧化古菌(AOA)和氨氧化细菌(AOB)的微生物生态学研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
Liu S. Microbial ecology of Ammonia-Oxidizing Archaea (AOA) and Ammonia-Oxidizing Bacteria (AOB) in typical ecosystems [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.

环 境 科 学

CONTENTS

Analysis of Pollution Characteristics and Primary, Secondary Contributions of Firework Burnings in Qingdao During the Spring Festival	FANG Tian-ge, YAO Xiao-hong, MENG He, <i>et al.</i> (4345)
Characterization and Source Apportionment of PM _{2.5} Based on the Online Observation in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Li-wei, <i>et al.</i> (4355)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} in Beijing During 2017-2018	LI Huan, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4364)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Southern Beijing	DONG Gui-ming, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4374)
Characteristics and Formation Mechanism of Three Haze Pollution Processes in Chengdu in Winter	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, YIN Han-mei, <i>et al.</i> (4382)
Distribution Characteristics and Source of Black Carbon Aerosols in the Northern Suburbs of Nanjing	XIE Feng, LIN Yu-chi, SONG Wen-huai, <i>et al.</i> (4392)
Assessment of Emergency Emission Reduction Effect During the Heavy Air Pollution Episodes in Beijing, Tianjin, Hebei, and Its Surrounding Area(“2+26” Cities) from October to December 2019	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, WANG Wei, <i>et al.</i> (4402)
Variational Trend and Characteristics of Air Pollution in Baoding City	GOU Yin-yin, ZHANG Kai, LI Jin-juan, <i>et al.</i> (4413)
Emission Inventory of VOCs Components in Zhengzhou and Their Ozone Formation Potential	LU Xuan, ZHANG Rui-qin, HAN Luo-kai (4426)
Evolution and Evaluation of O ₃ and VOCs in Zhengzhou During the National Traditional Games of Ethnic Minorities Period	ZHAO Jin-shuai, YU Shi-jie, WANG Nan, <i>et al.</i> (4436)
Characteristics of Volatile Organic Compounds in Wood Coatings and Automotive Coatings in China	KE Yun-ting, SUN Yu-hang, CHENG Hai-rong, <i>et al.</i> (4446)
Influence of Typical Desulfurization Process on Flue Gas Particulate Matter of Coal-fired Boilers	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, LÜ Rui-he, <i>et al.</i> (4455)
Investigation on the Emission Difference of Air Pollutants from Common Residential Coal Stoves and Suggestions for Emission Reduction	ZHANG Yi-chen, XUE Chen-li, LIU Jie, <i>et al.</i> (4462)
Mobile Source Emission Inventory with High Spatiotemporal Resolution in Tianjin in 2017	LIU Geng, SUN Shi-da, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (4470)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollution Sources Based on Second Pollution Source Census Data in Sichuan Province	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (4482)
Preliminary Screening for the Urban Forest Against Combined Air Pollution	LI Pin, WEI Yan-yan, FENG Zhao-zhong (4495)
Spatial Distribution and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Plant Leaves in Baoji City	ZHANG Jun, LIANG Qing-fang, GAO Yu (4504)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Aquatic Organisms in Chaoshan Coastal Area along the South China Sea	XIU Cuo, WANG Chen-chen, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (4514)
Spatiotemporal Differentiation and Degradation Analysis of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments of Shanmei Reservoir and Its Inflowing River, Quanzhou, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, FENG Kai-wen (4525)
Spatial-temporal Variations and the Regulators of Nitrate Status in Shallow Groundwater of the Typical Mountainous Agricultural Watershed in the Upper Reaches of the Yangtze River	JIANG Nan, ZHOU Ming-hua, LI Hong, <i>et al.</i> (4539)
Emission Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Typical Agricultural Small Watershed in Tuojiang River Basin	WANG Hong, XU Ya-ling, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4547)
Assessment of Potential Risk of Diffuse Pollution in Haihe River Basin Based Using DPERS Model	FENG Ai-ping, WANG Xue-lei, XU Yi, <i>et al.</i> (4555)
Impact of Spatial Heterogeneity of Precipitation on the Area Change in Critical Source Area of Non-point Sources Pollution	GAO Xiao-xi, ZUO De-peng, MA Guang-wen, <i>et al.</i> (4564)
Sedimentary Diatom Records Reveal the Succession of Ecosystem in Lake Xihu, Dali over the Past 50 Years	ZHANG Chen-xue, XU Min, DONG Yi-fan, <i>et al.</i> (4572)
Content and Distribution of Cadmium in Soil and Fluvial Sediments in the Sea-Land Interaction Zone	WANG Fang-ting, CHEN Zhi-hua, BAO Ke, <i>et al.</i> (4581)
Occurrence Characteristics and Quality Estimation of Microplastics in Drainage Ditches in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia	WANG Zhi-chao, YANG Fan, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (4590)
Influence of Pervious/Impervious Pattern on Runoff and Pollution in Parcel-based Catchment	JIANG Zhi-hui, LIAO Yun-jie, XIE Wen-xia, <i>et al.</i> (4599)
Activating Efficiency of Iron-copper Bimetallic Organic Framework MIL-101(Fe, Cu) Toward H ₂ O ₂ for Degradation of Dyes	LIANG He, LIU Rui-ping, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i> (4607)
Synergistic Reaction Mechanism of Cu ⁰ @Fe ₃ O ₄ Activated PMS for Degradation of <i>p</i> -nitrophenol	SHI Qing-qing, PU Sheng-yan, YANG Xi (4615)
Kinetics and Mechanism of Sucralose Degradation in Water Using UV-activated Persulfate Process	YU Yun, LU Jin-xin, LÜ Zhen, <i>et al.</i> (4626)
Microbial Community Structure for Sewage Wastewater Treatment Plants in Winter	SHANG Yue-fei, WANG Shen, ZONG Ni, <i>et al.</i> (4636)
Microbial Community Analysis of Different DN and PN-ANAMMOX Coupling Modes for Mature Landfill Leachate Treatment	LU Ming-yu, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4644)
Analysis of Rapid Start-up and Mixed Nutritional Nitrogen Removal Performance of Complete Autotrophic Granular Sludge	QI Ze-kun, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4653)
Long-term Stability of Aerobic Granular Sludge Under Low Carbon to Nitrogen Ratio	YUAN Qiang-jun, ZHANG Hong-xing, CHEN Fang-yuan (4661)
Response of Bacterial and Fungal Communities to Chemical Fertilizer Reduction Combined with Organic Fertilizer and Straw in Fluvo-aquic Soil	WU Xian, WANG Rui, HU He, <i>et al.</i> (4669)
Characteristics of Soil Nutrients and Fungal Community Composition in Crop Rhizosphere Under Different Rotation Patterns	SUN Qian, WU Hong-liang, CHEN Fu, <i>et al.</i> (4682)
Effects of Short-term Application of Moutai-flavor Vinasse Biochar on Nitrogen Availability and Bacterial Community Structure Diversity in Yellow Soil of Guizhou Province	ZHANG Meng, LIU Yan-ling, WEI Quan-quan, <i>et al.</i> (4690)
Effects of Different Rotation Patterns of Oil-Rice on Methane and Nitrous Oxide Emissions in Rice Fields	CHEN You-de, ZHAO Yang, GAO Du-juan, <i>et al.</i> (4701)
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> Biofertilizer Mitigating Soil Ammonia Volatilization	YANG Ya-hong, XUE Li-xia, SUN Bo, <i>et al.</i> (4711)
Effects of Exogenous Phosphorus on Rice Growth and Cadmium Accumulation and Transportation Under Cadmium Stress	HUO Yang, QIU Yin-yan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4719)
Key Stage of As Accumulation in Rice Under As Stress at Different Growth Stages	DENG Peng-hui, CAI Ya-qin, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4726)
Heavy Metal Contamination and Health Risk Assessment of Corn Grains from a Pb-Zn Mining Area	ZHOU Yan, WAN Jin-zhong, LI Qun, <i>et al.</i> (4733)
Polybrominated Diphenyl Ether in E-waste Dismantling Sites in Taizhou City, Zhejiang Province: Concentration, Distribution, and Migration Trend	WEI Bao-kai, LIU Chen, WANG Ying, <i>et al.</i> (4740)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils in Southern Youyang County, Chongqing	WANG Rui, DENG Hai, YAN Ming-shu, <i>et al.</i> (4749)
Ecological Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Livestock Manure and Vegetable Soil of Chongqing	PENG Qiu, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong (4757)