

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第10期

Vol.39 No.10

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国典型城市环境大气挥发性有机物特征比值 王鸣, 陈文泰, 陆思华, 邵敏 (4393)

2015年北京大气VOCs时空分布及反应活性特征 张博韬, 安欣欣, 王琴, 闫贺, 刘保献, 张大伟 (4400)

北京市建筑类涂料VOCs排放清单编制技术方法及应用 邓子钰, 高美平, 王庆玮, 聂磊 (4408)

基于实测的建筑类涂料挥发性有机物(VOCs)含量水平及组分特征 高美平, 邓子钰, 聂磊, 邵霞, 安小栓 (4414)

2014~2016年京津冀沿山城市空气质量首要污染物特征分析 王晓彦, 王帅, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (4422)

北京市大气环境PM_{2.5}和PM₁₀及其碳质组分季节变化特征及来源分析 樊啸辰, 郎建奎, 程水源, 王晓琦, 吕喆 (4430)

南京春季北郊地区大气PM_{2.5}中主要化学组分及碳同位素特征 周一鸣, 韩珣, 王瑾瑾, 陈善莉, 沈潇雨, 章炎麟, 朱彬, 郭照冰 (4439)

热脱附法快速分析大气细颗粒物中非极性有机物 马英歌, 吴霞, 彭梦梦, 冯加良, 郁建珍, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 李莉 (4446)

杭州市空气细颗粒物浓度与哮喘就诊人次的关系 王安旭, 陈曦, 宋从波, 应颂敏, 李倩, 吴琳, 毛洪钧 (4457)

基于远程通讯技术的混动公交车SCR系统运行及NO_x排放特征 杨强, 胡馨遥, 黄成, 陈昀, 刘佳栋, 李莉, 熊忠亮, 唐伟 (4463)

基于环境风险排序的流域优先污染物筛选 李奇锋, 吕永龙, 王佩, 张悦清 (4472)

重庆远郊丰都雪玉洞流域大气无机氮湿沉降变化特征与来源分析 段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 胡刘婵, 曾泽, 吕现福 (4479)

黑龙江凉水国家级自然保护区大气氮沉降特征 宋蕾, 田鹏, 张金波, 金光泽 (4490)

脱甲河水系N₂O关键产生过程及氮素来源探讨 赵强, 吕成文, 秦晓波, 吴红宝, 万运帆, 廖育林, 鲁艳红, 李健陵 (4497)

生物炭添加对曝气人工湿地脱氮及氧化亚氮释放的影响 王宁, 黄磊, 罗星, 梁岩, 王燕, 陈玉成 (4505)

黑麦草对水体中镉-壬基酚复合污染的生理响应及修复 史广宇, 李中义, 张路, 程媛媛, 陈宏伟, 施维林 (4512)

城市黑臭水体的吸收特性分析 丁潇蕾, 李云梅, 吕恒, 朱利, 温爽, 雷少华 (4519)

岷江上游水体中DOM光谱特征的季节变化 范诗雨, 秦纪洪, 刘堰杨, 孙辉 (4530)

防渗型生物滞留中试系统降雨径流水质与三维荧光特征 林修咏, 王书敏, 李强, 谢云成 (4539)

基于δ¹⁵N和δ¹⁸O的农业区地下水河硝酸盐污染来源 盛婷, 杨平恒, 谢国文, 洪爱花, 曹聪, 谢世友, 时伟宇 (4547)

垃圾填埋场地下水溶解性有机物光谱特征 彭莉, 虞敏达, 何小松, 刘思佳, 张鹏 (4556)

铅负载颗粒沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附行为 梁舒静, 林建伟, 詹艳慧, 汪振华, 李雅灵, 何思琪, 陈海洋, 唐凤霞, 李志强 (4565)

基于紫外光谱分析的腐殖质混凝控制 张北辰, 张晓蕾, 秦兰兰, 黄海鸥 (4576)

AAO工艺联合臭氧削减污水中微量有机污染物及遗传毒性 李默, 汪震哲, 陈志强, 温沁雪 (4584)

抗生素抗性基因在两级废水处理系统中的分布和去除 李奥林, 陈吕军, 张衍, 代天娇, 田金平, 刘锐, 温东辉 (4593)

磁性壳聚糖凝胶球固定厌氧氨氧化菌对废水氨氮去除的影响 刘志文, 陈琛, 彭晓春, 谢武明, 黄镇扬, 韩庆吉 (4601)

海藻糖强化厌氧氨氧化耦合反硝化工艺处理高盐废水的脱氮除磷效能 杨振琳, 于德爽, 李津, 王晓霞, 冯莉 (4612)

低温下A²/O-BAF反硝化除磷脱氮特性 黄剑明, 赵智超, 郑隆举, 邵兆伟, 安芳娇, 陈永志 (4621)

O₃-BAC深度处理石化废水厂尾水的特性及菌群结构分析 张超, 单明皓, 许丹宁, 古明哲, 代蓓蓓, 纪轩, 孙井梅 (4628)

基于MBR不同种泥短程硝化启动的微生物群落结构分析 吴鹏, 陈亚, 张婷, 沈耀良, 徐乐中 (4636)

3种不同工艺切换下活性污泥菌群结构及代谢产物对污泥沉降性能的影响 温丹丹, 袁林江, 陈希, 王洋, 申童童, 刘小博 (4644)

硫酸盐还原菌活性污泥胞外聚合物对环丙沙星的吸附机制 张会群, 贾妍艳, 方荷婷, 阴琳婉, 吕慧 (4653)

包埋活性污泥反硝化性能的快速提高及群落分析 杨宏, 徐富, 孟琛, 苏姗, 袁星 (4661)

中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析 尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 黄彩红 (4670)

典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价 马宏宏, 余涛, 杨忠芳, 侯青叶, 曾庆良, 王锐 (4684)

秸秆与化肥减量配施对菜地土壤温室气体排放的影响 黄容, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 吕盛, 罗梅 (4694)

不同肥料施用对设施蔬菜地NH₃挥发和N₂O排放的影响 山楠, 韩圣慧, 刘继培, 陈清, 袁玉玲, 王立刚, 李虎 (4705)

施肥类型和水热变化对农田土壤氮素矿化及可溶性有机氮动态变化的影响 田飞飞, 纪鸿飞, 王乐云, 郑西来, 辛佳, 能惠 (4717)

长期不同施肥量对全程氨氧化细菌丰度的影响 王梅, 王智慧, 石孝均, 蒋先军 (4727)

典型绿洲不同土壤类型有机碳含量及其稳定碳同位素分布特征 陈新, 贡璐, 李杨梅, 安申群, 赵晶晶 (4735)

凹凸棒石及其改性材料对土壤镉生物有效性的影响与机制 陈展祥, 陈传胜, 陈卫平, 焦文涛 (4744)

天然有机物活化过硫酸盐降解土壤有机污染物效果 刘琼枝, 廖晓勇, 李尤, 龚雪刚, 曹红英, 罗俊鹏 (4752)

水分管理和外源硒对水稻吸收累积铅的影响 万亚男, 刘哲, Aboubacar Younoussa Camara, 余垚, 王琪, 李花粉 (4759)

窖水中微生物降解污染物的关键细菌 杨浩, 杨晓妮, 张国珍, 王宝山, 张翔, 李健 (4766)

砷氧化菌对胡敏酸络合As(III)的氧化作用 李泽姣, 崔岩山, 尹乃毅, 蔡晓琳, 都慧丽, 王鹏飞 (4778)

海域高温油田1株耐高温耐盐硫酸盐还原菌的筛选与生理特性及活性抑制 杨春璐, 苑美玉, 史荣久, 闫鹏举, 赵峰, 韩斯琴, 张颖 (4783)

1株耐盐异养硝化-好氧反硝化菌Zobellella sp. B307的分离及脱氮特性 白洁, 陈琳, 黄潇, 胡春辉, 赵阳国, 李岩然 (4793)

1株镰刀菌属KY123915的分离及其对17β-雌二醇的降解特性 吴蔓莉, 祝长成, 祁燕云, 时艺馨, 徐会宁, 杨瑾如 (4802)

氟喹诺酮对垂直流人工湿地性能及微生物群落的影响 李新慧, 郑权, 李静, 王晓慧, 海热提 (4809)

林可霉素菌渣堆肥微生物群落多样性分析 任省涛, 郭夏丽, 芦阿度, 张倩倩, 郭笑盈, 王岩, 王连忠, 张元宝 (4817)

DEP对蚯蚓抗氧化酶系的影响及DNA损伤 平令文, 李现旭, 张翠, 宋佩佩, 王金花, 朱鲁生, 王军 (4825)

生活垃圾焚烧飞灰矿物学特性及重金属分布 李建陶, 曾鸣 (4834)

《环境科学》征订启事 (4429) 《环境科学》征稿简则 (4471) 信息 (4529, 4777, 4816)

不同肥料施用对设施菠菜地 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响

山楠^{1,2}, 韩圣慧³, 刘继培⁴, 陈清¹, 袁玉玲², 王立刚^{2*}, 李虎^{2*}

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 3. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 4. 北京市大兴区土肥工作站, 北京 102600)

摘要: 以湖南设施菠菜地为研究对象, 采用通气法和静态箱-气相色谱法研究了设施菠菜生长季施用工厂化堆肥(SC)、农民传统堆肥(SS)和单施化肥(FC)对土壤 NH_3 和 N_2O 排放的影响. 结果表明在同等施氮水平下, 与 FC 相比, SC 处理能减少 NH_3 和 N_2O 排放量, 分别减少 52.9% 和 95.12% ($P < 0.01$); SS 处理则增加 NH_3 挥发量 24.8%, 减少 N_2O 排放量 48.8%. 不同处理 NH_3 损失率分别为 SS(10.97%) > FC(4.19%) > SC(2.74%); N_2O 排放系数分别为 FC(4.50%) > SC(2.21%) > SS(0.60%); 与 FC 处理相比, SC 处理条件下菠菜产量和作物吸氮量分别降低 19.61% 和 13.20%, 差异不显著; SS 处理则显著降低 27.9% 和 40.0% ($P < 0.05$). 在该地区冬季设施菠菜田中, 影响 NH_3 和 N_2O 排放的主要因素为土壤水分, 环境温度不是此研究中影响气体排放的主要因素. 因此, 畜禽养殖固体废物经过不同处理后作为有机肥施入菠菜田, SC 处理的菠菜可保证产量的同时, 减少 NH_3 挥发和 N_2O 排放损失.

关键词: 氨挥发; 氧化亚氮; 菠菜; 猪粪; 堆肥; 肥料施用

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)10-4705-12 DOI: 10.13227/j.hjkk.201803005

Emission of NH_3 and N_2O from Spinach Field Treated with Different Fertilizers

SHAN Nan^{1,2}, HAN Sheng-hui³, LIU Ji-pei⁴, CHEN Qing¹, YUAN Yu-ling², WANG Li-gang^{2*}, LI Hu^{2*}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 4. Daxing Soil and Fertilizer Workstation, Beijing 102600, China)

Abstract: Agricultural management techniques such as fertilizer or manure application have substantial influence on NH_3 and N_2O emissions and, by understanding this influence, management strategies can be developed to reduce them. An experiment was conducted in a greenhouse at Hunan Agricultural University during 2012 to 2013, to investigate effects of different fertilizers on NH_3 and N_2O emissions. The treatments included control without fertilizer (CK), swine composting fertilizer (SC), stored swine manure fertilizer (SS), and chemical fertilizer (FC). The fluxes of NH_3 and N_2O were collected by venting method and static-chamber method, respectively. The results showed that during the spinach growth season, compared with FC, loss of both NH_3 and N_2O for SC were reduced by 52.9% and 95.12%, respectively ($P < 0.01$). However, loss of NH_3 for SS increased by 24.8%, and loss of N_2O reduced by 48.8% compared with FC. Loss rate of NH_3 were SS (10.97%) > FC (4.19%) > SC(2.74%), and emission coefficient for N_2O were FC (4.50%) > SC(2.21%) > SS(0.60%). Yield and utilization of nitrogen for SC were reduced by 19.61% and 13.20% compared with FC, respectively, but not significantly; and significantly reduced by 27.9% and 40.0% compared with SS, respectively. Loss of gases (NH_3 and N_2O) for SC were 1.83%, which was the lowest, while utilization of nitrogen for SC was 13.20%, similar with FC. Greenhouse temperature was not the critical factor during the spinach planting in winter, but soil water was. Therefore, optimizing manure management could reduce ammonia volatilization and N_2O emission loss without decreasing vegetables production, and the present data indicated that SC would be optimal for better yields with reduced ammonia volatilization and N_2O emission loss.

Key words: ammonia; nitrous oxide; spinach; pig manure; compost; fertilizer

设施菜地具有集约化程度高, 复种指数高, 有机肥用量大, 养分投入高且损失多, 易受人类活动影响等特点^[1-5]. 大量有机肥和铵态氮肥施入后很快转化为硝态氮, 不仅造成土壤硝态氮的累积^[6,7] 并且是氨挥发(NH_3)和氧化亚氮(N_2O)排放的主要来源^[8-10], NH_3 挥发损失占土壤氮素损失的近 30%^[11-16]. 有研究表明氮肥施入设施菜地后, 土壤以 NH_3 和 N_2O 的气体形式损失的氮素约占投入氮素的 10%, 菜田的 N_2O 排

放占我国农田 N_2O 总排放量的 20%^[17].

收稿日期: 2018-03-01; 修订日期: 2018-04-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFF0101100, 2012BAD15B01, 2016YFD0201204); 国家自然科学基金项目(41671303); 北京市自然科学基金项目(6162024); 中央级科研院所基本科研业务费专项(1610132016042, 1610132018040); 中国农业科学院创新工程项目

作者简介: 山楠(1988~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为农业废弃物处理及资源化利用和农业环境, E-mail: sn.47@163.com

* 通信作者, E-mail: wangligang@caas.cn; lihu0728@sina.com

设施菜田作为一个特殊的生态系统,受到施肥措施、灌溉方式和种植手段等多种人为因素影响,造成影响 NH_3 和 N_2O 的产生和损失量存在巨大的复杂性和不确定性. 罗健航等^[18]采用密闭室间歇通气法测定结果表明,减少化肥用量配合施用有机肥可减少设施菜田土壤 NH_3 挥发损失率 82.96% ~ 90.45%. 毕智超等^[19]采用静态暗箱-气相色谱法,得出不同比例有机肥施用香菜、空心菜、菜秧、菠菜等不同菜田 N_2O 排放的影响,结果表明不同比例有机肥施入 4 种蔬菜的 N_2O 排放系数为 0.09% ~ 1.92%,施用有机肥比单施化肥可降低土壤 N_2O 排放最高达 64%;郝小雨等^[20]通过对设施番茄和芹菜地的研究发现有机无机肥料配施较单施化肥可显著降低 N_2O 排放量,而刘丽鹃^[21]则发现,25% 化肥 + 75% 猪粪堆肥配合施用较单施化肥会促进菜地 N_2O 排放. 畜禽粪便作为有机肥施入设施菜地引起的土壤 NH_3 和 N_2O 气体排放损失,不仅造成严重的环境问题,而且降低肥料养分的利用效率^[22]. 综合目前的研究,有关菜地土壤肥料气体排放损失的研究日益得到关注,但缺乏农民传统堆肥畜禽粪肥与工厂化畜禽粪便堆肥施用于菜地后,土壤 NH_3 和 N_2O 同时排放损失的相关研究. 因此,针对当前国内外设施菜地 N_2O 和 NH_3 排放现状,揭示不同施肥管理措施对设施菜田的 NH_3 和 N_2O 影响意义重大,本文以

农民传统猪粪堆放与工厂化堆肥猪粪产品为研究对象,探讨不同肥料施用对设施菜田土壤 NH_3 和 N_2O 的排放规律,以期为我国菜田以 NH_3 和 N_2O 形式的气态氮素损失及其减排措施制订提供科学数据.

1 材料与方法

1.1 实验设计

本实验于 2013 年 12 月 ~ 2014 年 2 月在湖南省长沙市湖南农业大学实验基地的蔬菜大棚中进行,供试蔬菜为菠菜,生长周期为 50 d. 实验设置 4 个处理,分别为不施肥处理(control blank, CK 处理)、施用工厂化堆肥有机肥处理(swine compost, SC 处理)、施用猪粪固体堆放有机肥处理(solid storage, SS 处理)、和施用化肥(复合肥, NPK = 16% 16% 16%)处理(chemical fertilizer, FC 处理). 其中农民传统堆放方式猪粪肥料来自湖南长沙周边农家,工厂化堆肥肥料来自湖南鑫广安农牧股份有限公司槽式堆肥肥料^[23,24]. 每个处理随机设置 3 次重复,施肥量按照当地的菜地施肥标准,每个处理的肥料以基肥形式一次性施入,施入标准以 N 含量为准,施用纯氮 $273 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 2013 年 12 月 21 日进行播种和施肥,施肥后第 2 d 灌溉(120 mm),此后其他田间管理方式按照当地农民习惯方式管理. 两种猪粪肥品及实验区土壤基本性状见表 1.

表 1 肥料和土壤基础理化性质

Table 1 Properties of different manure compost products and soil

项目	含水率 /%	有机质 /%	铵态氮 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	硝态氮 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH	全氮 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全碳 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$
农家传统堆肥肥料	53.13	82.67	0.046	0.012	7.83	29.16	199.54
工厂化堆肥肥料	51.61	80.84	0.008	0.004	8.36	27.02	176.99
土壤	17.32	22.69	0.003	0.001	7.42	14.42	19.55

1.2 样品采集及分析

N_2O 采集与分析:采用密闭式静态箱法^[25]测定,采集 N_2O 气体的装置为组合式静态箱,由顶箱和底座构成,均为不锈钢材质.底座凹槽内径为 5 cm,顶部设置水封槽,将底座插入土壤表层,上沿高出土壤表层 10 cm,水封槽与土壤表面保持水平.顶箱由长宽高分别为 50 cm × 50 cm × 50 cm 的箱体组成,箱体外层包了一层保护膜,用来避免由于太阳辐射导致箱体内温度升高而产生的误差.顶箱内部设置数字温度计探头,风扇(用来加速箱体内部气体的混匀),顶箱顶部设置气体平衡管和采气口,采样口连接 60 mL 的气密注射器.采气时将水装入水封槽用来进行箱体内部气体的密封,防止箱内气体扩散.将顶箱罩在底座上,每隔 5 min 收集一次气体,

每个采样点都采集 5 次气样,记录箱体温度.每次采气样的同时记录环境温度.当天采集的气体当天用气相色谱仪(安捷伦 7890D)进行监测.

N_2O 交换通量计算公式^[26]为:

$$F = \rho \frac{V \Delta c P}{A \Delta t P^0} \frac{273}{273 + T} \times 600 \quad (1)$$

式中, F 为 N_2O 排放通量, $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; ρ 为标准状态下 N_2O 的密度, $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; V 为密闭静态箱的体积, cm^3 ; A 为采样土壤的面积, cm^2 ; P 为密闭静态箱内的气压, Pa; P^0 为标准大气压 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$, 可将实验地区气压视为标准大气压. $\Delta c / \Delta t$ 为单位时间静态箱内的 N_2O 浓度变化量, 10^{-9} min^{-1} ; T 为测定时箱体内部的平均温度, $^{\circ}\text{C}$.

NH_3 采集与分析:采用通气酸吸收法^[27]. 吸收

NH₃ 的海绵浸泡在 KCl 溶液中经过振荡 1 h, 抽取浸出液, 并测出浸提液的体积 V , 用流动注射分析仪测定 NH₃ 浓度.

NH₃ 排放通量计算公式:

$$F = \frac{(c_1 + c_2)V}{At} \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中, F 为 NH₃ 挥发通量 (以 N 计, 下同), $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; c_1 和 c_2 分别为浸提液中铵态氮和硝态氮的浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; V 为浸提液的体积, mL; A 为吸收 NH₃ 的海绵的有效面积 (m^2); t 为采样时间 (h).

NH₃ 或 N₂O 气体累积排放量 M (N₂O 或 NH₃) 计算公式^[28] 如下:

$$M = \sum (F_{N_{+1}} + F_N) \times 0.5 \times (t_{N_{+1}} - t_N) \times 24 \times 10^{-2} \quad (3)$$

式中, M 为全生育期内气体累积排放量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; F 为气体排放通量, $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; N 为采样次数; t 为采样时间即距初次采样的天数. 用内插法计算相邻两次监测之间未观测日期的排放通量, 然后将观测值和未观测日计算值逐日累加得到 N₂O 和 NH₃ 排放总量.

N₂O 排放系数 =

$$\frac{\text{施氮处理 N}_2\text{O 排放量} - \text{不施氮处理 N}_2\text{O 排放量}}{\text{施氮量}} \times 100\% \quad (4)$$

NH₃ 损失率 =

$$\frac{\text{施氮处理 NH}_3 \text{ 排放量} - \text{不施氮处理 NH}_3 \text{ 排放量}}{\text{施氮量}} \times 100\% \quad (5)$$

采样时间从 2013 年 12 月 22 日 ~ 2014 年 2 月 9 日, 共 50 d. 气体采样时间定为 09:00 ~ 11:00 进行. 氮素肥料基施于冬季土壤, 较高浓度的气体排放主

要集中于施肥前 3 d, 作物生长后期气体排放量较少^[29~31], 因此本实验期间, 前 2 ~ 7 d 连续采集气样, 之后间隔 1 d 采样; 第 15 d 后, 间隔 2 d 采样; 第 27 d 后, 间隔 3 d 采样; 第 35 d 后, 间隔 4 d 采样.

使用气相色谱仪 (Agilent 7890D, 美国) 对气体样品进行测定, 高纯氮为载气, 柱温 55°C, 电子捕获检测器 (ECD) 温度为 350°C, 通过 ECD 测定 N₂O, 并用体积比为 1:9 的 CO₂/N₂ 混合气作为尾吹, 以减少样品中的 CO₂ 对 N₂O 测定的影响^[32].

气体样品采集后, 采集土壤固体样品, 进行土壤水分测定, 分析方法按照文献^[33]. 菠菜样品在第 50 d 采集, 对菠菜的产量进行测定.

肥料氮素吸收率 = [植物对 N 肥料吸收的氮量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) - 不施氮处理植物对 N 肥料吸收的氮量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)] / N 肥料施用量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) $\times 100\%$ (6)

N₂O 或 NH₃ 排放强度: 指形成单位经济产量 N₂O (NH₃) 排放量, 即 N₂O (NH₃) 排放总量与相应处理作物产量的比值^[34].

计算公式为:

$$I = F/Y \quad (7)$$

式中, I 为排放强度 (以 N 计), $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; F 为供试土壤 N₂O (NH₃) 排放通量 (以 N 计), $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$; Y 为作物产量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.

1.3 数据处理

运用 Excel 2003 进行数据处理及作图, 统计分析应用 IBM SPSS statics 19.0.

2 结果与分析

2.1 土壤 NH₃ 挥发通量和累积量变化

不同施肥处理菠菜生育期内均观测到 NH₃ 的挥发, 整个生长季 NH₃ 挥发通量波动明显 (图 1). 与大

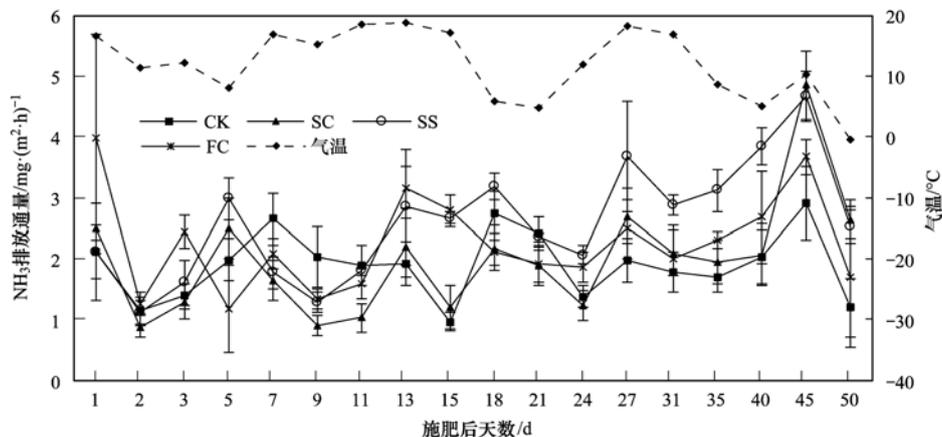


图 1 不同肥料处理温室菠菜田土壤的 NH₃ 排放通量

Fig. 1 NH₃ flux during the planting period of greenhouse vegetables with different fertilizers

田粮食作物生产系统 NH_3 挥发施肥后集中释放“高开低走”的规律不同^[35]. 4个施肥处理 NH_3 挥发动态变化趋势基本一致, NH_3 挥发通量在 1~5 d 内出现第一个峰值, 随着菠菜生长进程, 在施肥后第 45 d 土壤 NH_3 挥发排放通量达到最大值, 分别为 2.91、4.85、4.66 和 3.67 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$. 4个处理的 NH_3 挥发通量变化范围分别是: CK 0.96 ~ 2.91 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 、SC 0.88 ~ 4.85 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 、SS 1.11 ~ 4.66 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和 FC 1.17 ~ 3.67 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$.

设施蔬菜种植体系中, 不同猪粪固体处理肥料基施入温室种植菠菜田后, 随着施肥天数的增加, 设施菜田土壤的 NH_3 累积挥发排放量也出现增加的趋势(图 2). 4个处理条件下, 施肥后第 1 d 土壤 NH_3 挥发排放量分别为 0.05、0.06、0.05 和 0.10 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 第 1 d 损失比例(第 1 d 的 NH_3 挥发量/第 50 d 的 NH_3 挥发总量, 下同)分别为 2.14%、2.28%、1.46% 和 3.44%(图 2). 施肥后 31 d 内的 NH_3 挥发累积损失比例分别为 60.73%、50.45%、

53.76% 和 56.81%. 与第 1 d 相比, 增加了 58.59、48.17、52.30 和 53.37 个百分点. 粮食作物土壤施肥后在 2 d 内 NH_3 挥发损失率即达到 50%^[32]. 第 45 d NH_3 挥发累积排放量为 1.96、2.42、2.47 和 2.36 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$, NH_3 挥发累积损失比例为 86.42%、88.78%、89.23% 和 84.78%. 施肥 45 d 后温室种植菠菜土壤 NH_3 挥发排放量占 10% 左右. 与粮食作物不同, 华北地区种植小麦在施肥后 7 d 土壤 NH_3 挥发损失率即达到 90%^[35]. 4个处理(CK、SC、SS、FC)基肥施用 50 d 的土壤 NH_3 累积挥发量分别为 SS (3.48 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) > FC (2.79 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) > SC (2.64 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) > CK (2.36 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$).

t 检验结果表明, SC 与 SS ($P=0.044$) 之间的 NH_3 挥发累积损失量具有显著差异, SS 与 FC ($P=0.002$) 之间的 NH_3 挥发累积损失量具有极显著差异; CK 与 SC ($P=0.664$)、CK 与 SS ($P=0.258$)、CK 与 FC ($P=0.734$)、SC 与 FC ($P=0.473$) 的 NH_3 挥发累积损失量不显著.

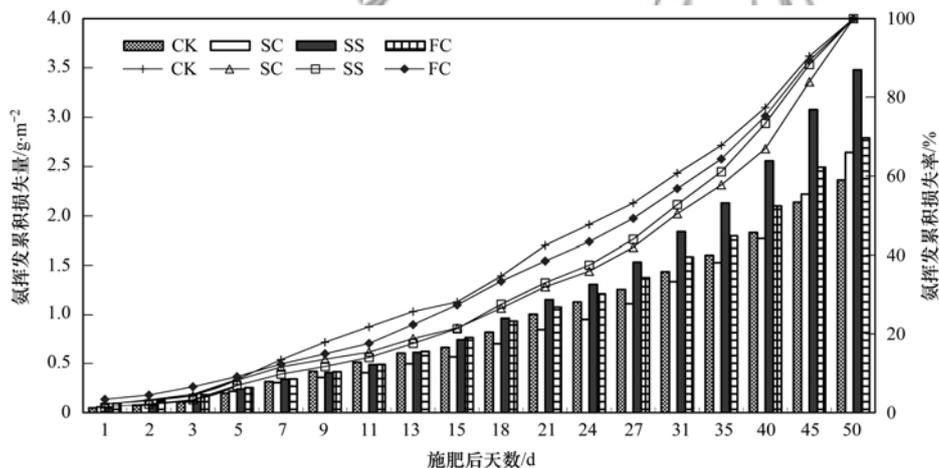


图 2 不同肥料处理菠菜田土壤 NH_3 挥发排放损失量与损失率

Fig. 2 Emissions of ammonia volatilization, accumulated loss, and loss rate for greenhouse vegetables with different fertilizers

2.2 土壤 N_2O 变化通量和累积量变化

不同施肥处理 N_2O 排放具有相似的变化规律(图 3), 整个监测期内, 4个处理菠菜地土壤 N_2O 排放通量总体呈现“前期高后期低”的逐渐下降趋势, 排放峰值主要集中在前 13 d, 但 FC 处理后期的 N_2O 排放通量高于其他处理. SC、SS、FC 处理条件下菠菜田施肥后前 2 d 土壤 N_2O 排放通量逐渐增加, 在施肥后第 2 d 达到 N_2O 排放通量峰值, 分别为 1.26、1.15、1.04 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 但 CK 处理 N_2O 排放通量峰值出现在第 7 d, 为 1.49 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 可能是由于施肥改变了土壤 C/N 和土壤微生物活性, 增强土壤微生物的硝化和反硝化

作用, 促进 N_2O 排放^[36]. 实验进行至 50 d, SC、SS 和 FC 处理的菠菜地土壤 N_2O 排放通量趋近于 0, 基本结束, 但 FC 处理后期的 N_2O 排放通量高于其他处理. 4个处理 N_2O 的排放通量变化范围分别是: CK 0.05 ~ 1.49 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 、SC 0.10 ~ 2.40 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 、SS 0.07 ~ 1.41 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 、FC 0.42 ~ 2.15 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$.

不同氮素肥料基肥一次施入条件下, 4个处理以 N_2O 形式累积 N 排放量(cumulative N)分别为 CK (0.35 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) < SS (0.41 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) < SC (0.57 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) < FC (0.80 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$), 见图 4. 从整个过程看, FC 处理排放的 N_2O 高于其它处理. 4个处理条

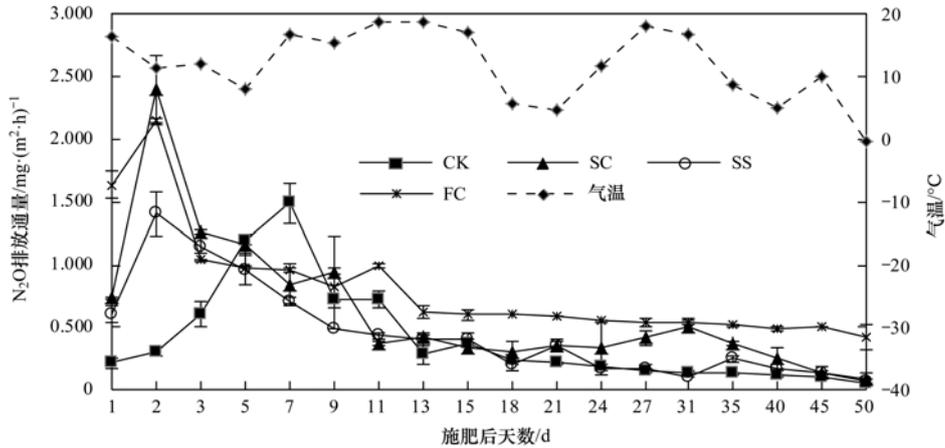


图3 不同肥料处理温室菠菜田土壤的N₂O排放通量

Fig. 3 N₂O flux during the planting period of greenhouse vegetables with different fertilizers

件下, 施肥后第 1 d 土壤N₂O累积排放量分别为 0.01、0.02、0.01 和 0.04 g·m⁻², 第 1 d 损失比例 (第 1 d 的N₂O排放量/第 50 d 的N₂O排放总量, 下同) 分别为 1.52%、3.10%、3.60% 和 4.88%。施肥后 11 d 内的N₂O累积损失比例分别为 52.47%、48.43%、54.64% 和 36.87%。与第 1 d 相比, 增加了 50.95、45.33、51.04 和 31.99 个百分点。CK 和 SS 处理在施肥后 11 d 菠菜田土壤N₂O累积损失率达到 50%, SC 和 FC 处理分别在施肥后第 13 d 和 18 d 菠菜田土壤N₂O累积损失率达到 50% 以上, 分别为 51.88% 和 50.21%, 说明经过不同处理工艺的猪粪有机肥施入设施菜地土壤, 无论在硝化-反硝化进程还是排放总量上均受到影响。第 40 d N₂O 累积排放量为 0.32、0.53、0.38 和 0.69 g·m⁻², N₂O累积损失比例为 93.36%、93.72%、92.56% 和 85.71%。

t 检验结果表明, CK 与 SC ($P = 0.026$)、CK 与 SS ($P = 0.081$) 之间N₂O累积损失量无显著差异;

SC 与 SS ($P = 0.011$)、SC 与 FC ($P = 0.018$), 表明 SS、FC 与 SC 处理之间N₂O累积损失量差异显著; CK 与 FC ($P = 0.000$)、SS 与 FC ($P = 0.001$), CK、SS 与 FC 处理之间温室种植菠菜土壤N₂O累积损失量差异极显著。

2.3 土壤水分变化及其对气体排放的影响

以不同施肥处理的 NH₃ 挥发和土壤N₂O排放的通量进行平均, 作为各处理土壤 NH₃ 挥发和土壤 N₂O排放平均通量。以各处理土壤 NH₃ 挥发和土壤 N₂O排放平均通量为因变量, 环境温度、土壤温度和土壤水分为自变量进行逐步回归分析, 得知土壤水分条件是影响 NH₃ 挥发和N₂O排放的主要环境因子。结果表明在显著性 $P = 0.05$ 水平上, 各处理土壤 NH₃ 挥发平均通量与土壤水分可建立如下回归方程:

$$Y = -1.38X + 5.212$$

$$(R^2 = 0.404, P < 0.01)$$

各处理土壤N₂O排放平均通量与土壤水分可建立如

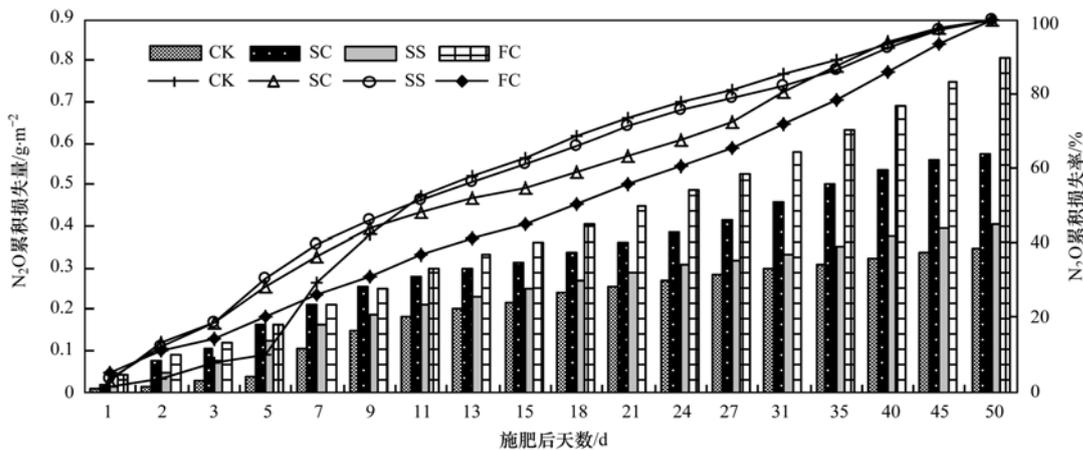


图4 不同肥料处理设施菜田土壤N₂O累积排放量与累积损失率

Fig. 4 Emissions of N₂O, accumulated loss and loss rate for greenhouse vegetables with different fertilizers

下回归方程:

$$Y = 0.98X - 1.578$$

$$(R^2 = 0.596, P < 0.01)$$

观测期间各处理土壤水分变化动态基本一致(图5),菠菜种植第1d施肥后灌水,4个处理土壤水分在第2d达到最高值(27.15%~27.47%),随着种植时间的延长各处理土壤水分逐渐降低.4个处理土壤水分分别CK:17.00%~27.15%、SC:17.02%~27.26%、SS:17.06%~27.47%和FC:17.01%~27.23%.SS处理条件下土壤水分与CK、SC和FC处理差异显著,CK、SC和FC这3个处理之间差异不显著.

相关分析表明(表2),菠菜生长季的CK、SC和SS处理土壤N₂O排放通量与土壤水分呈极显著正相关,FC处理与土壤水分呈显著正相关;SC和SS处理土壤NH₃挥发通量与土壤水分呈极显著负相关,FC处理与土壤水分呈显著负相关,CK处理土壤NH₃挥发通量与土壤水分无相关性.

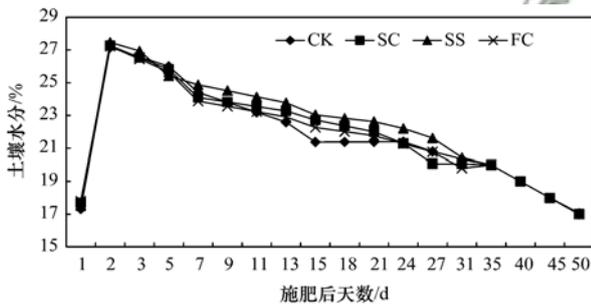


图5 各处理土壤水分变化

Fig. 5 Dynamic changes of soil water for each treatment

表2 不同处理菠菜生长季NH₃和N₂O排放通量与土壤水分相关性分析¹⁾

Table 2 Correlations of NH₃ and N₂O fluxes in the spinach field with soil water across the treatments

处理	土壤水分			
	NH ₃ 挥发通量		N ₂ O 排放通量	
	r	P	r	P
CK	-0.182	>0.05	0.653**	<0.01
SC	-0.617**	<0.01	0.733**	<0.01
SS	-0.602**	<0.01	0.746**	<0.01
FC	-0.529*	<0.05	0.505*	<0.05

1) *表示0.05水平显著; **表示0.01水平极显著

2.4 排放强度与氮素去向

肥料品种不同,菠菜株高和产量不同(图6).4个处理菠菜产量分别为:FC(20333.30 kg·hm⁻²)>SC(17000 kg·hm⁻²)>SS(14666.70 kg·hm⁻²)>CK(10000 kg·hm⁻²).FC、SC和SS相对CK分别增产103.3%、70%、46.67%,说明施加氮素肥

料能够增加蔬菜产量,相同施氮水平下SC和SS处理蔬菜产量比商品肥FC处理产量低很多,说明化肥氮分解快,而有机肥分解较慢,随着作物的生长,植物对氮素吸收量增大^[37],化肥N的投入能够快速供给作物生长必须的N素营养,保证作物获得较高的产量.

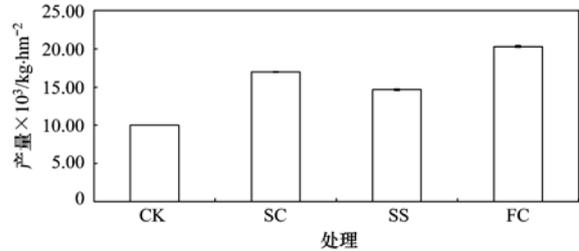


图6 不同肥料处理温室菠菜产量

Fig. 6 Yields of greenhouse spinach with different fertilizers

不同施肥处理条件下NH₃和N₂O的排放强度不同.4个处理NH₃排放强度(以N计,下同)分别为:FC(1.37 g·kg⁻¹)<SC(1.55 g·kg⁻¹)<CK(2.36 g·kg⁻¹)<SS(2.37 g·kg⁻¹),见图7;与FC处理相比,SC处理和SS处理分别增加了18.17%和42.19%(P<0.05)的NH₃排放强度,各处理间NH₃排放强度差异不显著.对于N₂O排放强度(图8),4个处理分别为:SS(0.28 g·kg⁻¹)<SC(0.34 g·kg⁻¹)<CK(0.35 g·kg⁻¹)<FC(0.40 g·kg⁻¹);与FC处理相比,SC处理和SS处理分别显著减少了15.0%和30.0%的N₂O排放强度.综合来看,施用工厂化堆肥有机肥(SC)处理在保

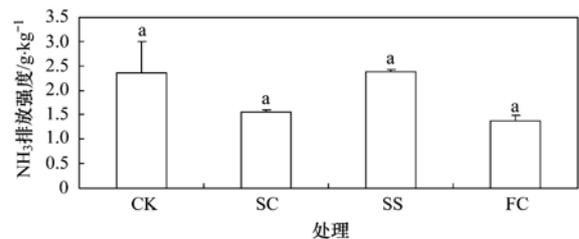


图7 不同处理条件下NH₃排放强度

Fig. 7 NH₃ emission intensities from four different management treatments

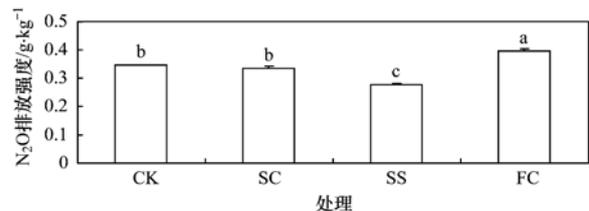


图8 不同处理条件下N₂O排放强度

Fig. 8 N₂O emission intensities from four different management treatments

持菠菜产量的基础上能有效地减少 NH_3 和 N_2O 排放, 值得推荐.

本研究考察了以 NH_3 挥发、 N_2O 排放和蔬菜吸收利用这 3 种 N 素去向(表 3). 4 个处理中菠菜对氮素的吸收利用量分别为 FC($12.60 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) > SC($10.91 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) > SS($7.50 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) > CK($5.38 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$), 施用肥料 SC 和 FC 处理的菠菜植株吸氮量显著高于不施肥处理(CK), 分别增加了 1.03 倍和 1.34 倍, 且 SC 处理与 FC 处理之间差异不显著, 有机肥料的施入促进了土壤微生物的大量繁殖, 增加了土壤对无机肥料的固持, 减少了作物生育前期的氮素损失, 从而使得成熟期作物体内氮素吸收量均与单施化肥处理差异不显著^[38]. 张树清等^[39]的研究表明, 畜禽粪中多种重金属元素、兽药残留、盐分含量以及一些有害微生物含

量超高, 这些也可能是导致 SS 处理产量等指标低于 SC 处理, 且 SS 处理条件下菠菜植株吸氮量较 CK 增加不显著的因素. 氮素损失比例最大的是以 NH_3 挥发气态形式损失的氮素, 其中 SC、SS 和 FC 处理的 NH_3 挥发占投入氮素比例分别为 2.74%、10.97% 和 4.19%; N_2O 损失率分别为 2.21%、0.60% 和 4.50%. SC 处理条件下 NH_3 和 N_2O 气体排放损失最小, 菠菜对氮素肥料的吸收率与 FC 处理差异不显著. 综合分析温室气体减排及生物产量, 施用工厂化堆肥处理猪粪有机肥(SC)比单独施用 N 素化肥(FC)和农民传统堆放猪粪有机肥(SS)处理更有利于温室气体减排及增加作物产量, 可见合理施用高品质的有机肥不仅可以提高蔬菜产量, 还可以节约施肥成本, 减少环境污染风险.

表 3 温室菠菜田土壤不同处理肥料氮素去向¹⁾

Table 3 Fate of fertilizer N under different kinds of application in spinach field

处理	作物吸收		NH_3 -N 损失		N_2O -N 损失		NH_3 -N + N_2O -N 损失	
	含量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	占比/%	含量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	占比/%	含量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	占比/%	含量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	占比/%
CK	5.38 b	—	2.36a	—	0.35c	—	2.71a	—
SC	10.91 a	20.26	2.64a	2.74	0.57b	2.21	3.21a	1.83
SS	7.50 b	7.77	3.48a	10.97	0.41c	0.60	3.89a	4.32
FC	12.60 a	26.45	2.79a	4.19	0.80a	4.50	3.59a	3.22

1) 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

3 讨论

3.1 不同肥料对设施菜田 NH_3 、 N_2O 损失的影响

不同肥料类型主要通过影响土壤中铵态氮浓度, 进而影响 NH_3 挥发. 不同的肥料对土壤微生物生物量氮的影响不同, 本实验中 SC 处理, 秸秆和猪粪两种有机物料经高温好氧堆肥后 C/N 比上升, 所能提供的碳源也增加^[40], 猪粪经工厂高温好氧堆肥后施入土壤使得最初带入的 NH_4^+ 较少^[41], 减少了 NH_3 挥发量; 而 SS 处理只由农民简单堆置于户外, 不能满足微生物发酵所需要的最佳条件, 不但堆积时间长, 且堆料未达到完全腐熟程度, 猪粪与秸秆未能充分反应, 氮素肥料可能大量累积于土壤中, 或者通过其他途径如 N_2 排放和 N 素淋洗损失, 有许多研究表明土壤 N 素养分主要以反硝化成 N_2 损失和硝酸盐的迁移及淋洗为主, 以不同形态残留在土壤的 N 素占投入总氮的 37.5%^[42,43]; 且 SS 处理猪粪未经高温翻堆处理, 含有较高的兽药、盐分以及一些有害微生物^[39], 这些也可能是导致 SS 处理产量等较低, 损失量较大的原因. 无机氮肥施入土壤迅速水解成铵态氮, 易挥发损失, 故 FC

处理前 15 d 的 NH_3 挥发累积损失量高于其他处理, 为 $0.93 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 第 18 d 以后 SS 处理 NH_3 挥发累积损失量成为超过其他处理最高值, 说明有机肥施入土壤有明显的损失滞后性.

本实验中, SC 和 SS 处理的有机肥施入菠菜地后土壤能使投入的氮素缓慢释放, 降低土壤有效氮含量, 从而减少 N_2O 的排放, 其排放因子较化肥氮(FC)处理显著降低, 其 N_2O 的排放系数分别为 2.21% 和 0.60%. Aguilera 等^[44]也指出在控制水分条件下, 有机肥的施用可以减少 N_2O 的排放. SS 处理土壤 N_2O 排放损失最低, 且该处理条件下菠菜产量较低, 可能由于农田土壤 N 素大部分以硝态氮的形式大量盈余^[45]. SC 处理 N_2O 排放因子低于 FC, 可能由于猪粪经过工厂化堆肥后, 适宜的 C/N 条件提高了土壤中微生物活性, 土壤矿化产生的无机氮增加, 促进了作物的生长和提高了氮素利用率^[46], 土壤有效氮源少, N_2O 排放少. SC 处理的工厂化堆肥有机肥作为氮素肥料替代化肥, 可使投入的氮素缓慢释放, 降低土壤有效氮含量, 从而减少 N_2O 的排放, 其排放因子显著小于化肥处理. FC 处理条件下, 菠菜地土壤 N_2O 排放系数最大, 可能是

由于其过量的化肥 N 素投入, 增加土壤中铵态氮浓度, 加之冬季气温低, 土壤矿化产生的无机氮量也低, 从而为土壤硝化-反硝化微生物提供更多的反应底物, 增加 N_2O 的排放. SC 处理土壤 N_2O 排放系数值在全球水平上因施肥引起的土壤 N_2O 排放系数范围内 (2.2% ~ 2.7%)^[47], SS 处理介于国内研究的 0.27% ~ 1.13% 之间^[48], 且与南京郊区菜地土壤 N_2O 平均排放系数 0.73% 较接近^[17,49]. FC 处理土壤 N_2O 排放系数为 4.50%, 符合其他人研究化肥和有机肥施入设施蔬菜地 N_2O -N 排放系数在 0 ~ 6.8% 之间^[50], 且与贾俊香等^[51] 研究南京郊区芹菜-空心菜-小白菜-苋菜轮作菜地的土壤 N_2O 排放系数为 4.6% 较为接近. SC 和 FC 处理 N_2O 排放系数均高于 IPCC 1% 的推荐值.

3.2 影响设施菜田土壤 NH_3 、 N_2O 排放的因子

作物生长期间, 氮素肥料的 NH_3 挥发引起的气态损失是氮肥损失的主要途径之一^[52,53]. 氮肥施入土壤迅速水解成铵态氮, 易挥发损失, 导致实验期间施肥后前 3 d 菠菜地 NH_3 挥发变化通量较高. 研究显示氮肥施用后 1 ~ 2 周是氮素发生 NH_3 挥发和反硝化损失的主要阶段^[54,55]. 气象因子中除风速外, 温度是影响 NH_3 挥发的一个重要因子. 本实验期间(图 1), 温度 -0.4 ~ 18.65℃, 温度较低, N 素肥料水解慢, 延缓了氮素的水解和铵态氮形成进程, 表层土壤的 NH_3 分压(浓度)较低, 导致菠菜生长期间 NH_3 挥发持续进行, 到施肥后 30 d 累积 NH_3 挥发损失率才达到 50%. 当温度低时, 脲酶活性低, 不利于尿素水解, 因而产生 NH_3 少^[56], 所以温度波动是后期 NH_3 挥发波动的一个因素. 本实验中, 施肥后第 45 d 出现的 NH_3 排放高峰是由于温度升高出现, 温度突升到 10.2℃, CK、SC、SS、FC 这 4 个处理的土壤 NH_3 挥发通量在温度突升条件下分别为 2.91、4.85、4.66 和 3.67 $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$, 且 CK 处理土壤 NH_3 挥发通量与温度的相关系数分别为 $r = 1.000$ ($n = 3$, $P < 0.05$), 呈显著相关; FC 处理土壤 NH_3 挥发通量与温度的相关系数分别为 $r = 1.000$ ($n = 3$, $P < 0.01$), 呈极显著相关, 山楠等^[35] 通过对 2011 ~ 2012 年京郊地区化肥施入小麦田 NH_3 挥发规律, 发现温度回升是影响 NH_3 挥发通量短暂升高的一个重要的环境因素; 而 SC 和 SS 处理 NH_3 挥发与环境温度无显著相关, 由于猪粪与秸秆混合处理后施入土壤, 秸秆的添加有可能对铵态氮有固定作用, 使得温度不再是影响 NH_3 挥发显

著因子. 总体来看, 4 个处理土壤 NH_3 挥发与温度无显著相关性, 可能是冬季温度较低, 脲酶活性降低, 不利于 N 素水解. 此外, 有研究指出 60% 左右的土壤水分环境为 NH_3 排放提供了较高的潜势^[17,57], NH_3 挥发量与土壤水分散失呈正相关^[58]. 在本研究中, 土壤水分含量在 17.00% ~ 27.47% 之间, 除 CK 外, 各处理土壤 NH_3 挥发损失与土壤水分呈显著负相关(表 2), 可能由于土壤水分含量降低时, 土壤中含有较多的 NH_3 , NH_3 扩散作用增强, NH_3 挥发量增大^[58], 与万合锋等^[16] 在北京通州地区研究 2011 年 ~ 2012 年冬季施用不同畜禽粪便堆肥品的温室油麦菜地的 NH_3 排放特征结果一致. 以各处理土壤 NH_3 挥发平均通量为因变量, 环境气温、土壤温度和土壤水分为自变量进行逐步回归分析, 得出回归方程:

$$Y = -1.38X + 5.212 \quad (R^2 = 0.404, P < 0.01)$$

综合结果表明, 本研究中土壤水分是影响 NH_3 挥发的主要环境因子. 测定方法也是影响土壤 NH_3 挥发测定结果的因子之一. 本实验结果中, SC 和 FC 处理土壤 NH_3 损失率 (2.74% 和 4.19%) 较低, 可能是由于 NH_3 采集装置采用较为简单的通气法^[27], 与郝小雨等^[59] 采用通气法研究天津地区温室内种植芹菜施用有机肥 NH_3 挥发排放率为 0.65% ~ 4.40% 范围相近, 且与万合锋等^[16] 利用通气法研究北京通州温室种植油麦菜施用堆肥有机肥条件下土壤 NH_3 损失率 2.0% ~ 3.98% 接近. 龚巍巍等^[60] 利用在线风洞系统收集 NH_3 效率达 90%, 其研究结果表明深圳地区青菜地化肥施入土壤 NH_3 的挥发损失率达 24.0%, 说明改进 NH_3 挥发收集方式可以提高监测 NH_3 挥发精度.

氮肥施入土壤易发生硝化与反硝化反应, N_2O 是这 2 个过程中氮素损失的主要形式, 土壤水分和温度是影响土壤硝化与反硝化作用的重要因子. 氮肥施入土壤后发生硝化与反硝化作用, 在生成 N_2O 的过程中, 介质的温度条件起着至关重要的作用. 环境温度显著影响着农田土壤 N_2O 日排放通量^[61]. 土壤 N_2O 排放所呈现的日变化与季节变化规律均与当日和当年的平均气温有关^[62]. 然而本研究中, 菠菜地土壤 N_2O 排放与环境温度无相关性, 可能是菠菜生长时期为冬季, 平均气温为 -0.4 ~ 18.65℃, 低温环境不利于微生物活动, 影响了土壤硝化反硝化顺利进行, 与于亚军等^[63] 研究成都平原地区菜地土壤 N_2O 排放冬季与环境温度相关不显著结果

一致, 有研究显示硝化微生物活动的适宜温度范围是 $15 \sim 35^\circ\text{C}$ [61,64,65]。土壤水分高低均通过反硝化和硝化作用产生 N_2O , 土壤空隙含水率在 $40\% \sim 60\%$ 之间有利于 N_2O 产生和排放 [63]。本实验中, FC 处理 N_2O 排放通量与土壤水分相关系数为 $r = 0.505$ ($n = 18, P < 0.05$), 呈显著相关; 其他 3 个处理条件下土壤 N_2O 与土壤水分均呈极显著相关性, 可能由于无机氮素肥料施入土壤消耗土壤水分进行水解作用, 从而导致施用化肥处理 (FC) 土壤水分与 N_2O 排放响应机制不敏感。3 种施肥处理菠菜地土壤 N_2O 排放均高于 CK 处理, 可能由于人工施肥措施造成土壤扰动, 导致土壤产生的 N_2O 更易向大气排放, 与 Pihlatie 等 [66] 的研究结果一致: 土壤耕作对上层土壤的扰动程度大于下层, 从而造成表层土壤疏松多孔, 利于产生的土壤气体向大气扩散。本研究结果中, 以各处理土壤 N_2O 排放平均通量为因变量, 环境气温、土壤温度和土壤水分作为自变量进行逐步回归分析, 得出回归方程:

$$Y = 0.98X - 1.578 \quad (R^2 = 0.596, P < 0.01)$$

综合结果表明, 本研究中土壤水分是影响 N_2O 排放的主要环境因子。农田土壤中的 N_2O 产生与排放受到土壤固有的物理性状、参与反应的土壤活性酶和微生物的影响, 农田周围的自然环境条件也是影响土壤 N_2O 排放的因素之一。张婧等 [67] 研究北京郊区设施菜地典型种植模式 (番茄-白菜-生菜) 下土壤 N_2O 排放特征结果除温度和水分等环境因子外, 土壤铵态氮和硝态氮含量变化是土壤硝化-反硝化作用和 N_2O 排放的限制因子。设施蔬菜种植系统中, 反应底物如铵态氮、硝态氮、微生物量碳、可溶性有机碳的变化以及一些功能菌群与土壤酶的作用下各个氮转化过程反应机制, 尚不清楚, 有待进一步研究。

4 结论

(1) 本实验中, 设施菜田 SC、SS 和 FC 处理下土壤的 NH_3 挥发损失率分别为: 2.74% 、 10.97% 和 4.19% ; N_2O 排放系数分别为 2.21% 、 0.60% 和 4.50% 。同等施氮水平下, 与 FC 相比, SC 处理能减少 NH_3 和 N_2O 排放量, 分别减少 52.9% 和 95.12% ($P < 0.01$)。该实验冬季温室种植菠菜, 整个生长周期中水分是与土壤 NH_3 和 N_2O 排放呈极显著线性关系, 分别为 ($R^2 = 0.404, P < 0.01$) 和 ($R^2 = 0.596, P < 0.01$), 是不同肥料施用条件下温室种植菠菜土壤 NH_3 和 N_2O 排放的主要因素, 环境温

度不是其主要影响因素。

(2) 冬季温室菠菜种植过程中, 3 种处理产量分别为 $\text{FC} (20\,333.30 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}) > \text{SC} (17\,000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}) > \text{SS} (14\,666.70 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2})$ 。设施菜地施用氮素肥料可以增加作物产量, SC 的菠菜可保证产量的同时, 减少 NH_3 挥发和 N_2O 排放损失。优化畜禽粪便处理措施不仅可以提高设施蔬菜产量, 同时减少有畜禽粪便对环境的污染, 提高肥料利用率。本实验中施用工厂化堆肥有机肥处理 (SC), 温室菠菜产量较高, NH_3 和 N_2O 损失较低。

参考文献:

- [1] 郑建初, 张岳芳, 陈留根, 等. 稻麦轮作系统冬小麦农田耕作措施对氧化亚氮排放的影响[J]. 生态学报, 2012, **32** (19): 6138-6146.
Zheng J C, Zhang Y F, Chen L G, et al. Nitrous oxide emissions affected by tillage measures in winter wheat under a rice-wheat rotation system [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32** (19): 6138-6146.
- [2] 于静, 虞敏达, 蓝艳, 等. 北方典型设施蔬菜种植区地下水水质特征[J]. 环境科学, 2017, **38** (9): 3696-3704.
Yu J, Yu M D, Lan Y, et al. Analysis of the characteristics of groundwater quality in a typical vegetable field, northern China [J]. Environmental Science, 2017, **38** (9): 3696-3704.
- [3] 邱炜红, 刘金山, 胡承孝, 等. 不同施氮水平对菜地土壤 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29** (11): 2238-2243.
Qiu W H, Liu J S, Hu C X, et al. Effects of nitrogen application rates on nitrous oxide emission from a typical intensive vegetable cropping system [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, **29** (11): 2238-2243.
- [4] Bellarby J, Surridge B W J, Haygarth P M, et al. The stocks and flows of nitrogen, phosphorus and potassium across a 30-year time series for agriculture in Huantai county, China [J]. Science of the Total Environment, 2017, **619-620**: 606-620.
- [5] 余海英, 李廷轩, 张锡洲. 温室栽培系统的养分平衡及土壤养分变化特征[J]. 中国农业科学, 2010, **43** (3): 514-522.
Yu H Y, Li T X, Zhang X Z. Nutrient budget and soil nutrient status in greenhouse system [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, **43** (3): 514-522.
- [6] Ju X T, Kou C L, Zhang F S, et al. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain [J]. Environmental Pollution, 2006, **143** (1): 117-125.
- [7] Shi W M, Yao J, Yan F. Vegetable cultivation under greenhouse conditions leads to rapid accumulation of nutrients, acidification and salinity of soils and groundwater contamination in South-Eastern China [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2009, **83** (1): 73-84.
- [8] 李剑睿, 苏芳, 黄彬香, 等. 鸡粪施入农田土壤的氨挥发研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28** (9): 1959-1964.
Li J R, Su F, Huang B X, et al. Ammonia volatilization from field-applied chicken manure in Beijing [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, **28** (9): 1959-1964.
- [9] 马腾飞, 危常州, 王娟, 等. 不同灌溉方式下土壤中氨挥发

- 损失及动态变化[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2010, **28**(3): 294-298.
- Ma T F, Wei C Z, Wang J, *et al.* Nitrogen loss and dynamic change of soil ammonia volatilization in different irrigation methods[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2010, **28**(3): 294-298.
- [10] 金雪霞, 范晓晖, 蔡贵信. 菜地土氮素的主要转化过程及其损失[J]. 土壤, 2005, **37**(5): 492-499.
- Jin X X, Fan X H, Cai G X. Nitrogen transformation and losses in soils grown with vegetables[J]. Soils, 2005, **37**(5): 492-499.
- [11] 习斌, 张继宗, 左强, 等. 保护地菜田土壤氨挥发损失及影响因素研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, **16**(2): 327-333.
- Xi B, Zhang J Z, Zuo Q, *et al.* Study on the losing of ammonia volatilization and its influencing factors on the protected vegetable fields' soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, **16**(2): 327-333.
- [12] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China: contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, **63**(2-3): 117-127.
- [13] Rochette P, Angers D A, Chantigny M H, *et al.* Ammonia volatilization following surface application of urea to tilled and no-till soils: a laboratory comparison[J]. Soil and Tillage Research, 2009, **103**(2): 310-315.
- [14] 李鑫, 巨晓棠, 张丽娟, 等. 不同施肥方式对土壤氨挥发和氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(1): 99-104.
- Li X, Ju X T, Zhang L J, *et al.* Effects of different fertilization modes on soil ammonia volatilization and nitrous oxide emission [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, **19**(1): 99-104.
- [15] 张翀, 李雪倩, 苏芳, 等. 施氮方式及测定方法对紫色土夏玉米氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(6): 1194-1201.
- Zhang C, Li X Q, Su F, *et al.* Effects of different fertilization and measurement methods on ammonia volatilization of summer maize in purple soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(6): 1194-1201.
- [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] 曹兵, 贺发云, 徐秋明, 等. 南京郊区番茄地中氮肥的效应与去向[J]. 应用生态学报, 2006, **17**(10): 1839-1844.
- Cao B, He F Y, Xu Q M, *et al.* Use efficiency and fate of fertilizer N in tomato field of Nanjing suburb[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, **17**(10): 1839-1844.
- [18] 罗健航, 赵营, 任发春, 等. 有机无机肥配施对宁夏引黄灌区露地菜田土壤氨挥发的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, **33**(4): 75-81.
- Luo J H, Zhao Y, Ren F C, *et al.* Effects of different combined applications of organic-inorganic fertilizers on soil ammonia volatilization in open vegetable field of the Yellow River Irrigation Region in Ningxia[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, **33**(4): 75-81.
- [19] 毕智超, 张浩轩, 房歌, 等. 不同配比有机无机肥料对菜地 N₂O 排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, **23**(1): 154-161.
- Bi Z C, Zhang H X, Fang G, *et al.* Effects of combined organic and inorganic fertilizers on N₂O emissions in intensified vegetable field[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, **23**(1): 154-161.
- [20] 郝小雨, 高伟, 王玉军, 等. 有机无机肥料配合施用对设施菜田土壤 N₂O 排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, **18**(5): 1073-1085.
- Hao X Y, Gao W, Wang Y J, *et al.* Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on N₂O emission from greenhouse vegetable soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, **18**(5): 1073-1085.
- [21] 刘丽鹃. 有机无机配施对大棚和露地蔬菜生长及土壤性状和温室气体排放的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- Liu L J. Effect of ratio of organic manure/chemical fertilizer on vegetables' growth, soil properties and greenhouse gas emission under greenhouse and open field conditions [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.
- [22] Deng J, Zhou Z X, Zheng X H, *et al.* Annual emissions of nitrous oxide and nitric oxide from rice-wheat rotation and vegetable fields: a case study in the Tai-Lake region, China[J]. Plant and Soil, 2012, **360**(1-2): 37-53.
- [23] 袁玉玲. 猪粪固体废弃物堆放和堆肥方式下含氮气体排放规律研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014.
- Yuan Y L. Research on the rule and affecting factors in nitrogen gas emission on the swine manure solid storage and compost[D]. Changsha: Agricultural University of Hunan, 2014.
- [24] 丁钢强. 猪粪固体堆放/堆肥过程中温室气体和氨气排放特征研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2014.
- Ding G Q. Emissions of greenhouse gas and ammonia from swine manure solid storage and composting [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2014.
- [25] 王艳强. 川中丘陵区草地土壤-植物系统 CO₂、N₂O 和 CH₄ 通量研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2005.
- Wang Y Q. Research on fluxes of CO₂, N₂O and CH₄ from grassland soil-vegetation system in central Sichuan hilly area [D]. Chongqing: Southwest University, 2005.
- [26] 王连峰, 蔡祖聪. 淹水与湿润水分前处理对旱地酸性土壤氧化亚氮和二氧化碳排放的影响[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(8): 1736-1744.
- Wang L F, Cai Z C. Nitrous oxide and carbon dioxide emissions from upland acidic soils under flooding and moistening pretreatments[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, **31**(8): 1736-1744.
- [27] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氨挥发的原位测定——通气法[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, **8**(2): 205-209.
- Wang Z H, Liu X J, Ju X T, *et al.* Field in situ determination of ammonia volatilization from soil: venting method [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, **8**(2): 205-209.
- [28] 山楠, 赵同科, 毕晓庆, 等. 适宜施氮量降低京郊小麦-玉米农田 N₂O 排放系数增加产量[J]. 农业工程学报, 2016, **32**(22): 163-170.

- Shan N, Zhao T K, Bi X Q, *et al.* Suitable nitrogen application reducing N_2O emission and improving grain yield in wheat-maize crop rotation system in Beijing suburb [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32** (22): 163-170.
- [29] 邵立明, 邱伟坚, 张后虎, 等. 渗滤液灌溉土壤 N_2O 释放及氨挥发的研究 [J]. *环境科学*, 2008, **29** (12): 3520-3524.
- Shao L M, Qiu W J, Zhang H H, *et al.* N_2O emissions and ammonia volatilization from leachate irrigated soils [J]. *Environmental Science*, 2008, **29** (12): 3520-3524.
- [30] 万合峰. 猪粪堆肥及其在蔬菜地利用全过程中温室气体 (N_2O 、 CH_4) 和 NH_3 排放特征研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2012.
- [31] 山楠. 京郊小麦—玉米轮作体系氮素利用与损失研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2014.
- Shan N. Nitrogen utilization and loss in winter wheat-summer maize rotation system of Beijing Suburb [D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2014.
- [32] Zheng X H, Mei B L, Wang Y H, *et al.* Quantification of N_2O fluxes from soil-plant systems may be biased by the applied gas chromatograph methodology [J]. *Plant and Soil*, 2008, **311** (1-2): 211-234.
- [33] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [34] 江雨倩, 李虎, 王艳丽, 等. 滴灌施肥对设施菜地 N_2O 排放的影响及减排贡献 [J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35** (8): 1616-1624.
- Jiang Y Q, Li H, Wang Y L, *et al.* Effects of fertigation on N_2O emissions and their mitigation in greenhouse vegetable fields [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35** (8): 1616-1624.
- [35] 山楠, 赵同科, 毕晓庆, 等. 不同施氮水平下小麦田氨挥发规律研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33** (9): 1858-1865.
- Shan N, Zhao T K, Bi X Q, *et al.* Ammonia volatilization from wheat soil under different nitrogen rates [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33** (9): 1858-1865.
- [36] 林伟, 张薇, 李玉中, 等. 有机肥与无机肥配施对菜地土壤 N_2O 排放及其来源的影响 [J]. *农业工程学报*, 2016, **32** (19): 148-153.
- Lin W, Zhang W, Li Y Z, *et al.* Effects of combined application of manure and inorganic fertilizer on N_2O emissions and sources in vegetable soils [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32** (19): 148-153.
- [37] 孙雅杰, 吴文良, 刘原庆, 等. 有机肥和化肥对盆栽番茄氮素利用以及损失的影响 [J]. *中国农业大学学报*, 2017, **22** (4): 37-46.
- Sun Y J, Wu W L, Liu Y Q, *et al.* Effects of organic and mineral fertilizers on nitrogen utilization and losses [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, **22** (4): 37-46.
- [38] 郁洁, 蒋益, 徐春森, 等. 不同有机物及其堆肥与化肥配施对小麦生长及氮素吸收的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, **18** (6): 1293-1302.
- Yu J, Jiang Y, Xu C M, *et al.* Effects of combined application of inorganic fertilizer with straw and pig slurry and their compost on wheat growth and nitrogen uptake [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, **18** (6): 1293-1302.
- [39] 张树清, 张夫道, 刘秀梅, 等. 规模化养殖畜禽粪主要有害成分测定分析研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, **11** (6): 822-829.
- Zhang S Q, Zhang F D, Liu X M, *et al.* Determination and analysis on main harmful composition in excrement of scale livestock and poultry feedlots [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, **11** (6): 822-829.
- [40] 王聪, 沈健林, 郑亮, 等. 猪粪化肥配施对双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放及其全球增温潜势的影响 [J]. *环境科学*, 2014, **35** (8): 3120-3127.
- Wang C, Shen J L, Zheng L, *et al.* Effects of combined applications of pig manure and chemical fertilizers on CH_4 and N_2O emissions and their global warming potentials in paddy fields with double-rice cropping [J]. *Environmental Science*, 2014, **35** (8): 3120-3127.
- [41] 刘红江, 郭智, 张丽萍, 等. 有机-无机肥不同配施比例对稻季 CH_4 和 N_2O 排放的影响 [J]. *生态环境学报*, 2016, **25** (5): 808-814.
- Liu H J, Guo Z, Zhang L P, *et al.* Effects of different combined application ratio of organic-inorganic fertilization on CH_4 and N_2O emissions in paddy season [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25** (5): 808-814.
- [42] 串丽敏, 何萍, 赵同科, 等. 中国小麦季氮素养分循环与平衡特征 [J]. *应用生态学报*, 2015, **26** (1): 76-86.
- Chuan L M, He P, Zhao T K, *et al.* Nitrogen cycling and balance for wheat in China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26** (1): 76-86.
- [43] 胡晓霞, 丁洪, 张玉树, 等. 不同菜地土壤硝化与反硝化活性 [J]. *农业环境科学学报*, 2009, **28** (12): 2657-2662.
- Hu X X, Ding H, Zhang Y S, *et al.* Nitrification and denitrification potential in soils grown with vegetables [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, **28** (12): 2657-2662.
- [44] Aguilera E, Lassaletta L, Sanz-Cobena A, *et al.* The potential of organic fertilizers and water management to reduce N_2O emissions in Mediterranean climate cropping systems. A review [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, **164**: 32-52.
- [45] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 不同氮肥施用后土壤各氮库的动态研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2004, **12** (1): 92-94.
- Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Dynamics of different soil nitrogen pools after applying different types of nitrogen fertilizers [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, **12** (1): 92-94.
- [46] 江立庚, 曹卫星. 水稻高效利用氮素的生理机制及有效途径 [J]. *中国水稻科学*, 2002, **16** (3): 261-264.
- Jiang L G, Cao W X. Physiological mechanism and approaches for efficient nitrogen utilization in rice [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2002, **16** (3): 261-264.
- [47] van Beek C L, Pleijter M, Kuikman P J. Nitrous oxide emissions from fertilized and unfertilized grasslands on peat soil [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, **89** (3): 453-461.
- [48] He F F, Jiang R F, Chen Q, *et al.* Nitrous oxide emissions from an intensively managed greenhouse vegetable cropping system in Northern China [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157** (5): 1666-1672.
- [49] Xiong Z Q, Xie Y X, Xing G X, *et al.* Measurements of nitrous oxide emissions from vegetable production in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40** (12): 2225-2234.

- [50] 王耀聪, 王利英, 高志岭, 等. 施用有机肥、化肥对设施番茄土壤 N_2O 排放的影响[J]. 河北农业大学学报, 2016, **39**(3): 1-6.
Wang Y C, Wang L Y, Gao Z L, *et al.* Effects of applying organic manure and chemical fertilizers on N_2O emissions from tomato greenhouse soil[J]. Journal of Agricultural university of Hebei, 2016, **39**(3): 1-6.
- [51] 贾俊香, 张曼, 熊正琴, 等. 南京市郊区集约化大棚蔬菜地 N_2O 的排放[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(3): 739-744.
Jia J X, Zhang M, Xiong Z Q, *et al.* N_2O emission from an intensively managed greenhouse vegetable field in Nanjing suburb, Jiangsu Province of East China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, **23**(3): 739-744.
- [52] 李伟波, 李运东, 王辉. 用 ^{15}N 研究吉林黑土春玉米对氮肥的吸收利用[J]. 土壤学报, 2001, **38**(4): 476-482.
Li W B, Li Y D, Wang H. Application and recovery of ^{15}N -fertilizer for spring maize in black soil of Jilin [J]. Acta Pedologica Sinica, 2001, **38**(4): 476-482.
- [53] 丁洪, 蔡贵信, 王跃思, 等. 玉米-小麦轮作系统中氮肥反硝化损失与 N_2O 排放量[J]. 农业环境科学学报, 2003, **22**(5): 557-560.
Ding H, Cai G X, Wang Y S, *et al.* Nitrification-denitrification loss and N_2O emission from maize-wheat rotation system in North China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2003, **22**(5): 557-560.
- [54] 山楠, 杜连凤, 毕晓庆, 等. 用 ^{15}N 肥料标记法研究潮土中玉米氮肥的利用率与去向[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, **22**(4): 930-936.
Shan N, Du L F, Bi X Q, *et al.* Nitrogen use efficiency and behavior studied with ^{15}N labeled fertilizer in maize in fluvo-aquic soils[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, **22**(4): 930-936.
- [55] 山楠, 毕晓庆, 杜连凤, 等. 基施氮肥对麦田冬前氨挥发损失的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2013, (6): 47-51.
Shan N, Bi X Q, Du L F, *et al.* Effect of basal nitrogen fertilization on cornfield ammonia volatilization loss ahead of winter in-site conditions [J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2013, (6): 47-51.
- [56] 王朝辉, 田霄鸿, 李生秀. 冬小麦生长后期地上部分氮素的氨挥发损失[J]. 作物学报, 2001, **27**(1): 1-6.
Wang Z H, Tian X H, Li S X. Nitrogen losses from winter wheat plant by NH_3 volatilization in late growing stage [J]. Acta Agronomica Sinica, 2001, **27**(1): 1-6.
- [57] 徐雨晴, 何吉成, 李凌浩, 等. 内蒙古半干旱草原的氨气挥发研究[J]. 资源与生态学报(英文版), 2010, **1**(1): 68-74.
Xu Y Q, He J C, Li L H, *et al.* Ammonia volatilization in a semi-arid rangeland in Inner Mongolia[J]. Journal of Resources and Ecology, 2010, **1**(1): 68-74.
- [58] 高鹏程, 张一平. 氨挥发与土壤水分散失关系的研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2001, **29**(6): 22-26.
Gao P C, Zhang Y P. Research on relationship between volatilization of ammonia and evaporation of soil water [J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science), 2001, **29**(6): 22-26.
- [59] 郝小雨, 高伟, 王玉军, 等. 有机无机肥料配合施用对日光温室土壤氨挥发的影响[J]. 中国农业科学, 2012, **45**(21): 4403-4414.
Hao X Y, Gao W, Wang Y J, *et al.* Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on ammonia volatilization from greenhouse vegetable soil [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, **45**(21): 4403-4414.
- [60] 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.
- [61] 徐文彬, 洪业汤, 陈旭晖, 等. 贵州省旱田土壤 N_2O 释放及其环境影响因素[J]. 环境科学, 2000, **21**(1): 7-11.
Xu W B, Hong Y T, Chen X H, *et al.* N_2O Emission from upland soils in Guizhou and its environmental controlling factors [J]. Environmental Science, 2000, **21**(9): 7-11.
- [62] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 稻麦轮作生态系统中土壤湿度对 N_2O 产生与排放的影响[J]. 应用生态学报, 1996, **7**(3): 273-279.
Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, *et al.* Impact of soil humidity on N_2O production and emission from a rice-wheat rotation ecosystem [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1996, **7**(3): 273-279.
- [63] 于亚军, 朱波, 荆光军. 成都平原土壤-蔬菜系统 N_2O 排放特征[J]. 中国环境科学, 2008, **28**(4): 313-318.
Yu Y J, Zhu B, Jing G J. N_2O emission from soil-vegetable system and impact factors in Chengdu Plain of Sichuan Basin [J]. China Environmental Science, 2008, **28**(4): 313-318.
- [64] 徐文彬, 刘维屏, 刘广深. 温度对旱田土壤 N_2O 排放的影响研究[J]. 土壤学报, 2002, **39**(1): 1-8.
Xu W B, Liu W P, Liu G S. Effect of temperature on N_2O emissions from sub-tropical upland soils [J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, **39**(1): 1-8.
- [65] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田 N_2O 产生与排放的影响[J]. 环境科学, 1997, **18**(5): 1-5.
Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, *et al.* Impacts of temperature on N_2O production and emission [J]. Environmental Science, 1997, **18**(5): 1-5.
- [66] Pihlatie M, Pumpanen J, Rinne J, *et al.* Gas concentration driven fluxes of nitrous oxide and carbon dioxide in boreal forest soil[J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 2007, **59**(3): 458-469.
- [67] 张婧, 李虎, 王立刚, 等. 京郊典型设施蔬菜地土壤 N_2O 排放特征[J]. 生态学报, 2014, **34**(14): 4088-4098.
Zhang J, Li H, Wang L G, *et al.* Characteristics of nitrous oxide emissions from typical greenhouse vegetable fields in Beijing suburbs [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(14): 4088-4098.

CONTENTS

Ratios of Volatile Organic Compounds in Ambient Air of Various Cities of China	WANG Ming, CHEN Wen-tai, LU Si-hua, <i>et al.</i> (4393)
Temporal Variation, Spatial Distribution, and Reactivity Characteristics of Air VOCs in Beijing 2015	ZHANG Bo-tao, AN Xin-xin, WANG Qin, <i>et al.</i> (4400)
Research and Application of the Technical Method for the Compilation of VOCs Emission Inventories from Architectural Coatings in Beijing	DENG Zi-yu, GAO Mei-ping, WANG Qing-wei, <i>et al.</i> (4408)
Content Levels and Compositions Characteristics of Volatile Organic Compounds(VOCs) Emission from Architectural Coatings Based on Actual Measurement	GAO Mei-ping, DENG Zi-yu, NIE Lei, <i>et al.</i> (4414)
Characteristics of Primary Pollutants of Air Quality in Cities Along the Taihang Mountains in Beijing-Tianjin-Hebei Region During 2014-2016	WANG Xiao-yan, WANG Shuai, ZHU Li-li, <i>et al.</i> (4422)
Seasonal Variation and Source Analysis for PM _{2.5} , PM ₁ and Their Carbonaceous Components in Beijing	FAN Xiao-chen, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4430)
Chemical Constitution and Carbon Isotopic Compositions of PM _{2.5} in the Northern Suburb of Nanjing in Spring	ZHOU Yi-ming, HAN Xun, WANG Jin-jin, <i>et al.</i> (4439)
Analysis of Non-polar Organic Compounds in PM _{2.5} by Rapid Thermo-desorption Method Coupled with GC/MS	MA Ying-ge, WU Xia, PENG Meng-meng, <i>et al.</i> (4446)
Association Between Fine Particulate Matter and Asthma Hospital Outpatient Visits in Hangzhou	WANG An-xu, CHEN Xi, SONG Cong-bo, <i>et al.</i> (4457)
Hybrid Electric Bus SCR System Operation and NO _x Emission Characteristics Based on Remote Communication Technology	YANG Qiang, HU Qing-yao, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (4463)
Selection of Priority Contaminants in a Watershed Using Risk Ranking Methodology	LI Qi-feng, LÜ Yong-long, WANG Pei, <i>et al.</i> (4472)
Characteristics and Sources of Atmospheric Inorganic Nitrogen Wet Deposition in Xueyu Cave Watershed, Outer Suburbs of Chongqing City	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (4479)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve	SONG Lei, TIAN Peng, ZHANG Jin-bo, <i>et al.</i> (4490)
Key Production Process of Nitrous Oxide and Nitrogen Sources in Tuojia River	ZHAO Qiang, LÜ Cheng-wen, QIN Xiao-bo, <i>et al.</i> (4497)
Impact of Biochar on Nitrogen Removal and Nitrous Oxide Emission in Aerated Vertical Flow Constructed Wetland	WANG Ning, HUANG Lei, LUO Xing, <i>et al.</i> (4505)
Physiological Responses of Ryegrass in Cadmium-Nonylphenol Co-contaminated Water and the Phytoremediation Effects	SHI Guang-yu, LI Zhong-yi, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (4512)
Analysis of Absorption Characteristics of Urban Black-odor Water	DING Xiao-lei, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (4519)
Seasonal Variations of DOM Spectral Characteristics in the Surface Water of the Upstream Minjiang River	FAN Shi-yu, QIN Ji-hong, LIU Yan-yang, <i>et al.</i> (4530)
Water Quality and Three-Dimensional Fluorescence of Stormwater Runoff from Lined Bioretention Field Cells	LIN Xiu-yong, WANG Shu-min, LI Qiang, <i>et al.</i> (4539)
Nitrate-Nitrogen Pollution Sources of an Underground River in Karst Agricultural Area Using ¹⁵ N and ¹⁸ O Isotope Technique	SHENG Ting, YANG Ping-heng, XIE Guo-wen, <i>et al.</i> (4547)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Landfill Groundwater	PENG Li, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4556)
Adsorption Behavior of Phosphate from Water on Zirconium-loaded Granular Zeolite-amended Sediment	LIANG Shu-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (4565)
Control of Coagulant Dosing for Humic Substances Based on Ultraviolet Spectrum Analysis	ZHANG Bei-chen, ZHANG Xiao-lei, QIN Lan-lan, <i>et al.</i> (4576)
Reduction of Wastewater Organic Micro-pollutants and Genotoxicity in a Hybrid Process Involving Anaerobic-anoxic-oxic and Ozonation Treatments	LI Mo, WANG Zhen-zhe, CHEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4584)
Distribution and Removal of Antibiotic Resistance Genes in Two Sequential Wastewater Treatment Plants	LI Ao-lin, CHEN Li-jun, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (4593)
Effect of Magnetic Chitosan Hydrogel Beads with Immobilized Feamox Bacteria on the Removal of Ammonium from Wastewater	LIU Zhi-wen, CHEN Chen, PENG Xiao-chun, <i>et al.</i> (4601)
Enhanced Nitrogen and Carbon Removal Performance of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) with Trehalose Addition Treating Saline Wastewater	YANG Zhen-lin, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (4612)
Characteristics of Denitrifying Phosphorus Removal by A ² /O-BAF at Low Temperatures	HUANG Jian-ming, ZHAO Zhi-chao, ZHENG Long-ju, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics of Advanced Treatment of Treated Petrochemical Water by O ₃ -BAC and Analysis of Consortium Structure	ZHANG Chao, SHAN Ming-hao, XU Dan-ning, <i>et al.</i> (4628)
Microbial Community Characteristics of Shortcut Nitrification Start-up in Different MBR-Inoculated Sludges	WU Peng, CHEN Ya, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (4636)
Effect of Microbial Community Structure and Metabolites on Sludge Settling Ability Under Three Different Switching Condition Processes	WEN Dan-dan, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4644)
Adsorption Mechanisms of Ciprofloxacin by Extracellular Polymeric Substances of Sulfate-reducing Bacteria Sludge	ZHANG Hui-qun, JIA Yan-yan, FANG He-ting, <i>et al.</i> (4653)
Rapid Improvement of Denitrification Performance of Embedded Activated Sludge and Community Analysis	YANG Hong, XU Fu, MENG Chen, <i>et al.</i> (4661)
Spatial-Temporal Trends and Pollution Source Analysis for Heavy Metal Contamination of Cultivated Soils in Five Major Grain Producing Regions of China	SHANG Er-ping, XU Er-qi, ZHANG Hong-qi, <i>et al.</i> (4670)
Spatial Interpolation Methods and Pollution Assessment of Heavy Metals of Soil in Typical Areas	MA Hong-hong, YU Tao, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i> (4684)
Effect of Straw Residues in Combination with Reduced Fertilization Rate on Greenhouse Gas Emissions from a Vegetable Field	HUANG Rong, GAO Ming, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (4694)
Emission of NH ₃ and N ₂ O from Spinach Field Treated with Different Fertilizers	SHAN Nan, HAN Sheng-hui, LIU Ji-pei, <i>et al.</i> (4705)
Effects of Various Combinations of Fertilizer, Soil Moisture, and Temperature on Nitrogen Mineralization and Soluble Organic Nitrogen in Agricultural Soil	TIAN Fei-fei, JI Hong-fei, WANG Le-yun, <i>et al.</i> (4717)
Long-term Fertilization Effects on the Abundance of Complete Ammonia Oxidizing Bacteria(<i>Comammox Nitrospira</i>) in a Neutral Paddy Soil	WANG Mei, WANG Zhi-hui, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4727)
Spatial Variation of Soil Organic Carbon and Stable Isotopes in Different Soil Types of a Typical Oasis	CHEN Xin, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i> (4735)
Effect and Mechanism of Attapulgite and Its Modified Materials on Bioavailability of Cadmium in Soil	CHEN Zhan-xiang, CHEN Chuan-sheng, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4744)
Persulfate Oxidation Effect of Soil Organic Pollutants by Natural Organic Matters	LIU Qiong-zhi, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4752)
Lead Uptake and Accumulation in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) with Water Management and Selenite Fertilization	WAN Ya-nan, LIU Zhe, Aboubacar Younoussa Camara, <i>et al.</i> (4759)
Key Bacteria for the Microbial Degradation of Pollutants in Cellar Water	YANG Hao, YANG Xiao-ni, ZHANG Guo-zhen, <i>et al.</i> (4766)
Oxidation of Humic Acid Complexing As(III) by As(III)-Oxidizing Bacteria	LI Ze-jiao, CUI Yan-shan, YIN Nai-yi, <i>et al.</i> (4778)
A Thermotolerant and Halotolerant Sulfate-reducing Bacterium in Produced Water from an Offshore High-temperature Oilfield in Bohai Bay, China; Isolation, Phenotypic Characterization, and Inhibition	YANG Chun-lu, YUAN Mei-yu, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> (4783)
Isolation and Nitrogen Removal Characteristics of Salt-tolerant Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacteria <i>Zobellella</i> sp. B307	BAI Jie, CHEN Lin, HUANG Xiao, <i>et al.</i> (4793)
Isolation, Identification and Degradation Characteristics of a 17β-estradiol Degrading Strain <i>Fusarium</i> sp. KY123915	WU Man-li, ZHU Chang-cheng, QI Yan-yun, <i>et al.</i> (4802)
Effect of Fluoroquinolones on Performance and Microbial Community of a Vertical Flow Constructed Wetland	LI Xin-hui, ZHENG Quan, LI Jing, <i>et al.</i> (4809)
Microbial Community Diversity Analysis During Composting of Lincomycin Mycelia Dreg with Manure	REN Sheng-tao, GUO Xia-li, LU A-qian, <i>et al.</i> (4817)
Oxidative Stress and DNA Damage Induced by DEP Exposure in Earthworms	PING Ling-wen, LI Xian-xu, ZHANG Cui, <i>et al.</i> (4825)
Mineralogy Characteristics and Heavy Metal Distribution of MSWI Fly Ash	LI Jian-tao, ZENG Ming (4834)