

施肥方式与施用生物质炭对设施菜地氨排放的影响^①

史冬伟¹, 刘衍², 孙志华³, 黄梓恩¹, 梁琼¹, 刘云¹, 段碧华¹, 石生伟^{1*}

(1 农业农村部华北都市农业重点实验室, 北京农学院, 北京 102206; 2 农业农村部科技发展中心, 北京 100122; 3 全国畜牧总站, 北京 100125)

摘要: 采用通气法对设施菠菜和黄瓜在施用生物质炭与翻耕措施下土壤氨气(NH_3)排放进行观测, 探索设施菜地 NH_3 减排的有效途径。观测表明, 设施菠菜与黄瓜土壤 NH_3 排放主要发生在施肥后一周内。在施化肥氮总量 $300 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 条件下, 设施菠菜不施生物质炭和表施生物质炭处理的 NH_3 排放量分别占总氮投入量的 8.00% 和 10.15%, 而翻耕措施分别降低各处理 NH_3 排放 38.34% 和 56.22%($P<0.05$)。在施化肥氮总量 $600 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 条件下, 设施黄瓜不施生物质炭和表施生物质炭的 NH_3 排放量分别占总氮投入量的 3.03% 和 4.80%, 而翻耕措施分别降低各处理 NH_3 排放 9.45% 和 37.61%。设施菜地表施生物质炭增加土壤 NH_3 排放, 其中菠菜和黄瓜单位产量的 NH_3 排放量分别增加 52.58% 和 78.17%($P<0.05$)。根据设施菜地 NH_3 排放特点和不同处理的减排效果, 建议减少基肥投入以控制 NH_3 排放, 并利用翻耕措施消除表施生物质炭对 NH_3 排放的促进效应。

关键词: 生物质炭; 翻耕; 氨排放; 产量; pH

中图分类号: S153 文献标志码: A

Effects of Fertilization and Biochar Addition on Ammonia Emission from Greenhouse Vegetable Fields

SHI Dongwei¹, LIU Kan², SUN Zhihua³, HUANG Zien¹, LIANG Qiong¹, LIU Yun¹, DUAN Bihua¹, SHI Shengwei^{1*}

(1 Key Laboratory of Urban Agriculture (North China), Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China; 2 Development Center of Science and Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, Beijing 100122, China; 3 National Animal Husbandry Service, Beijing 100125, China)

Abstract: In order to explore paths to reduce ammonia (NH_3) emission in protected spinach and cucumber plots, a field experiment was conducted on the dynamics of ammonia emission fluxes under treatments of biochar addition and ploughing cultivation using aeration method. The results showed that NH_3 emissions mainly occurred within one week after fertilization in both spinach and cucumber plots. Under the condition of $300 \text{ kg}/\text{hm}^2$ of total inorganic nitrogen input, the proportion of NH_3 emission in the total nitrogen input was 8.00% under non-additional biochar treatment, and 10.15% under biochar addition treatments from spinach field, respectively. NH_3 emission after surface fertilization with ploughing cultivation was reduced by 38.34% under the treatments of non-additional biochar, and by 56.22% under the treatments of biochar addition, respectively. Under the condition of $600 \text{ kg}/\text{hm}^2$ of total nitrogen input rate, the proportion of NH_3 emission in the total nitrogen input was 3.03% under the non-additional biochar treatment, and 4.80% under the treatments of biochar addition from cucumber field, respectively. NH_3 emissions after surface fertilization with ploughing cultivation was reduced by 9.45% under the treatments of non-biochar addition, and 37.61% under the treatments of biochar addition, respectively. Surface-applied biochar has positive effect on NH_3 emission in vegetable soils. NH_3 emissions per unit yield after biochar addition were increased by 52.58% for spinach and by 78.17% for cucumber, respectively. According to the characteristics of NH_3 emission and the mitigation effect, it is suggested to reduce the base fertilizer input to control NH_3 emission from protected soils, and perform ploughing cultivation

^①基金项目: 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0208-02)、北京市自然科学基金项目(8192007)、北京市教委项目(SQKM201810020004)和北京市教委重点项目(KZ201910020024, KZ201810029025)资助。

* 通讯作者(weiweishi848@gmail.com)。

作者简介: 史冬伟(1995—), 男, 山西原平人, 硕士研究生, 主要从事土壤碳氮循环研究。E-mail: Sdw143@qq.com

after biochar addition to eliminate the promoting effect on NH_3 emission.

Key words: Biochar; Ploughing; Ammonia emission; Yield; pH

氨气(NH_3)是大气环境中非常重要的碱性气体污染物,对于大气颗粒物(尤其PM2.5)的形成具有重要作用^[1]。 NH_3 排放过量不仅造成严重的雾霾天气^[1-2],而且对人体健康也会产生不利的影响^[3-4]。另外, NH_3 是大气酸沉降的重要组成部分^[5],会导致土壤酸化和水体富营养化,威胁到生态环境的健康^[6]。因此,从源头上控制大气 NH_3 排放,对于控制雾霾污染和提升环境空气质量具有重要的意义。

设施菜地具有复种指数高、灌溉频繁、施肥量大等特点^[7-8]。根据调查,约70%以上的北京市设施蔬菜存在过量施肥的现象,其中日光温室每季蔬菜平均总氮投入高达 $858 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ^[9]。山东寿光地区施氮总量高出大田作物的4倍~6倍,超过蔬菜需求量的3倍~5倍^[10]。设施菜地存在过量施肥和不合理管理,不仅造成严重的资源浪费,而且还带来严重的生态环境问题,制约设施蔬菜产业的可持续发展^[11]。不合理施用氮肥会导致大量的 NH_3 挥发损失^[12]。设施蔬菜地内频繁灌水,施肥量大,土壤颗粒表面吸附的铵离子(NH_4^+)容易进入溶液,而导致 NH_3 挥发损失加剧^[13]。Ren等^[14]对山东寿光设施蔬菜地的监测发现,高达80%以上的氮肥并未被作物吸收,而以气态或氮素淋溶途径损失。研究表明,蔬菜地 NH_3 挥发率占总施氮量的11%~18%^[15-17]。因此,控制设施菜地 NH_3 排放对于降低农业源 NH_3 排放具有一定的现实意义^[18]。

土壤 NH_3 挥发是氮素在物理、化学、生物因素综合作用下,以 NH_4^+-N 形式在土壤-土壤溶液-大气界面相互转化的复杂动力学过程^[19-20]。生物质炭(Biochar)是植物残体在完全或部分缺氧的情况下高温热解产生的一类高度芳香化难熔性物质^[21],具有较高的比表面积与孔隙度,对土壤溶液中 NH_4^+-N 和 NH_3 产生较强的吸附作用^[22]。施用生物质炭可以增强土壤对 NH_4^+-N 和 NH_3 的吸附能力,有效控制土壤 NH_4^+-N 含量,从而显著降低 NH_3 挥发^[23]。刘伟晶等^[24]发现施用生物质炭显著提高土壤对溶液中 NH_4^+-N 的吸附量,然后缓慢释放。其次,生物质炭具有酸性官能团,通过离子交换作用达到吸附固定 NH_3 的效果。

然而,部分观测表明施用生物质炭促进土壤 NH_3 挥发^[20, 25]。生物质炭一般呈碱性^[20],可以改变土壤-溶液体系的pH而调控土壤 NH_3 挥发^[25]。Laird等^[26]发现生物质炭施入土壤后,增加了土壤持水率、土壤比表面积和阳离子交换量(CEC),其中土壤pH增加近1个单位。当pH上升后,土壤溶液 NH_3 比例明显增加, NH_3 挥发速率随之加大^[25-26]。因此,生物质炭输入对土壤 NH_3 挥发过程及相关氮素转化过程存在直接和间接的影响,但已有观测结果存在较大的争议。

生物质炭还田是设施菜地土壤改良的一种重要途径。目前关于生物质炭还田对土壤 NH_3 挥发的作用效果和调控机制缺少全面而清晰的认识。设施菜地 NH_3 减排技术和因地适宜的生物质炭还田技术模式亦缺乏探索和实践。鉴于此,本研究以北京市典型设施菜地为研究对象,采用通气法对设施菠菜和黄瓜在施用生物质炭与不同施肥方式下土壤 NH_3 排放进行观测,结合设施蔬菜产量和影响 NH_3 挥发的主要土壤指标,探索设施菜地 NH_3 减排的有效途径。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于北京市昌平区百善镇吕各庄村设施蔬菜地(116.37°E , 40.14°N),年平均日照时数约为2 680 h,年均降水量为550.3 mm,年均气温为 11.8°C ,土壤类型为潮土。试验设施菜地的大棚已有4 a种植史,为北方典型的扇形半拱状塑料薄膜大棚,土壤理化性质见表1。设施大棚长度为150 m,宽8 m。棚顶部覆盖透明的温室棚膜,棚膜上覆盖一层可拆卸、可自动升降具有保温作用的黑色厚棉层。白天将黑色厚棉层打开,以促进蔬菜进行光合作用和热量吸收。大棚顶部和底部分别设有通风口,根据天气状况而适度打开通风口以促进空气流动和降低棚内温度。大棚内悬挂黄色粘虫板以防治害虫。

1.2 试验设计

试验作物为前茬菠菜和后茬黄瓜,两茬轮作。菠菜于2018年11月16日进行播种,2019年2月23

表1 试验设施菜地土壤基本理化性状
Table 1 soil basic physicochemical properties in vegetable plots

土壤深度 (cm)	质地	pH		有机质 (g/kg)	速效氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	全氮 (g/kg)	全钾 (g/kg)	全磷 (g/kg)
		H ₂ O	CaCl ₂							
0~20	粉砂壤土	8.4	7.7	19.6	65.5	6.5	134	0.81	27.7	0.18

日全部铲除清地。黄瓜于2019年3月17日进行培植,同年6月16日拉秧。试验采用两因素试验设计,其中施肥处理分为:单纯施化肥和“化肥+生物质炭”,施肥方式分为:表施和深施(翻耕措施)。通过两因素组合得到4个试验处理,分别为:①化肥表施(TCF);②生物质炭+化肥表施(TBCF);③化肥深施(PCF);④生物质炭+化肥深施(PBCF)。试验中菠菜季4个处理的化肥施氮总量均为300 kg/hm²,黄瓜季化肥施氮总量均为600 kg/hm²。肥料表施方式为施肥后利用钉耙与3~5 cm表层土壤混匀。深施处理为施肥后采用人工翻耕方式,翻耕厚度为15 cm。生物质炭为稻壳生物质炭,基本理化性质如下:pH 9.24、有机碳415 g/kg、有效磷1.41 g/kg、速效钾1.22 g/kg、全氮7.37 g/kg、全钾13.42 g/kg、全磷3.58 g/kg,生物质炭的施用量为10 t/hm²。采用随机区组试验设计,每个处理设置3个重复,每个小区面积为6.2 m×1.3 m=8.06 m²,小区间由田垄隔开,田垄宽0.2 m。

本试验菠菜氮肥的基施比例为50%,黄瓜氮肥的基施比例为60%。基肥为常见复合肥,养分N:P₂O₅:K₂O比例为17:17:17。每个小区施基肥后,进行菠菜和黄瓜种植。菠菜追肥为尿素,在生长过程中追施2次;黄瓜追肥为尿素和腐植酸水溶肥,在结果期大约间隔1~2周灌水追肥一次,灌水频率依据生长过程中水分亏缺而定。

1.3 NH₃排放样品采集与测定

NH₃排放采用稀磷酸甘油溶液-海绵吸收法(通气法)收集^[27]。NH₃排放吸收装置由聚氯乙烯硬质圆柱状PVC管制成,具有“底大顶小”的特点,其中顶部内径11 cm,高5 cm,底部设置有卡槽,可以放置双层圆形海绵;下部内径20 cm,高15 cm。顶部圆柱放置的圆形海绵直径为11.5 cm,厚度为2 cm。每块海绵可以吸收15 ml稀磷酸-甘油溶液。NH₃排放吸收装置中上层海绵用来隔绝空气中NH₃干扰,底层海绵用来吸收土壤NH₃排放。两块海绵相隔约为5 cm,确保菜地土壤与外界空气之间连通。采样时将装置顶端海绵取出,用去离子水浸泡洗净备用。下层海绵作为NH₃排放收集样品,需封装在已编号的自封袋中,于当天带回实验室分析。每个小区放置3个吸收装置。吸收装置在施肥后扣入土壤表层约1 cm处。海绵样品每隔24 h取样一次。蔬菜生长期内的取样频率为间隔3~4 d。

海绵样品带回实验室后,置于250 ml广口塑料瓶中,加入1 mol/l KCl溶液浸提200 ml,在回旋振

荡式摇床里振荡30 min后手动挤压出浸提液。利用苯酚-次氯酸盐比色法(625 nm波长)测定浸提液中NH₄⁺-N浓度。根据NH₄⁺-N标准溶液浓度与吸光值的回归曲线($R^2>0.999$),计算海绵样品浸提液NH₄⁺-N浓度。根据海绵浸提液中NH₄⁺-N浓度,计算每次采样NH₃排放通量(F):

$$F=C\times V/(S\times T) \quad (1)$$

式中: F 为NH₃排放通量(mg/(m²·d),以N计); C 为浸提液NH₄⁺-N浓度(N, mg/ml); V 为待测液体积(200 ml); S 为NH₃捕获装置下半部分的横截面积(m²); T 为两次取样间隔的时间(d)。根据NH₃排放通量与时间的累计关系,计算每茬蔬菜NH₃排放量(kg/hm²,以N计)。菠菜收获期测定产量,而黄瓜自挂果开始不间断测定产量。根据不同处理NH₃排放总量和产量,计算单位产量的NH₃排放量:

$$A=M\times 1000/Y \quad (2)$$

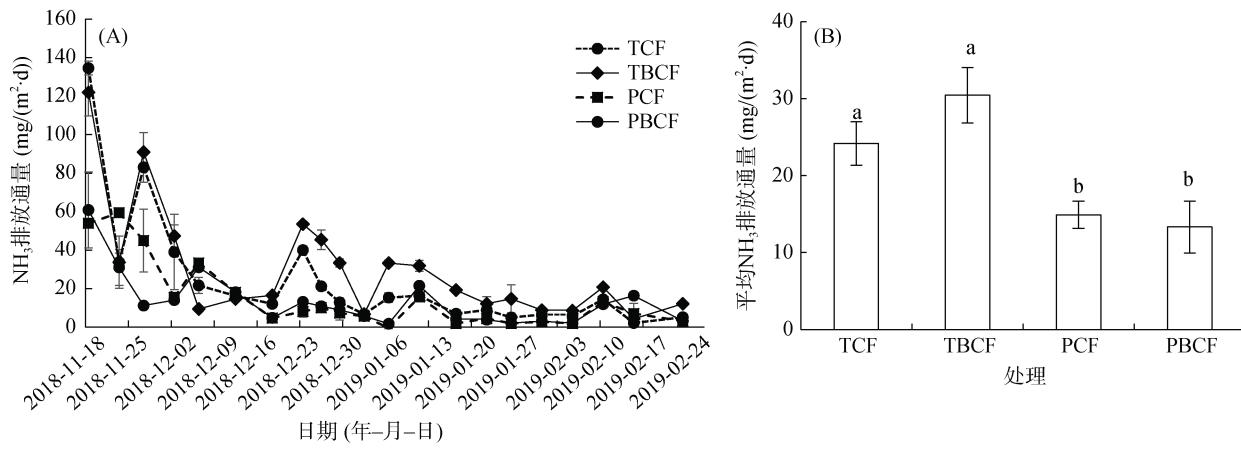
式中: A 为单位产量的NH₃排放量(mg/kg), M 是NH₃排放量(kg/hm²), Y 是蔬菜产量(kg/hm²)。

每茬蔬菜试验结束后,采集不同处理10 cm土壤,分别测定pH和速效态氮含量。利用Microsoft Excel 2018对观测数据进行整理。采用SPSS Statistics 22软件进行不同处理间NH₃排放通量、NH₃排放量、产量和单位产量的NH₃排放量的差异显著性检验,显著性水平设置为0.05;采用LSD法进行均值比较。

2 结果与分析

2.1 施肥方式与施用生物质炭对菠菜季土壤NH₃排放通量的影响

菠菜季土壤NH₃排放主要发生在生长初期,一周后迅速降低(图1A)。施肥后当天NH₃排放通量最大,其中化肥表施和施用生物质炭处理的NH₃排放通量分别高达134.57 mg/(m²·d)和121.95 mg/(m²·d),而翻耕措施下对应处理的NH₃排放相对较低。菠菜季随着灌溉次数增加,肥料表施均出现脉冲式NH₃排放的特点。施肥方式对菠菜地土壤NH₃排放影响显著,其中化肥表施平均NH₃排放通量为24.19 mg/(m²·d),显著大于化肥翻耕处理(14.91 mg/(m²·d))($P<0.05$);生物质炭表施处理的平均NH₃排放通量为30.45 mg/(m²·d),显著大于对应翻耕处理(13.33 mg/(m²·d))($P<0.05$)(图1B)。在相同化肥用量条件下,表施生物质炭增加菠菜季土壤NH₃排放26%,而翻耕措施下施用生物质炭降低NH₃排放11%,但与各自不施生物质炭的对照处理均不存在差异显著。这说明施肥方式是影响菠菜季土壤NH₃排放的主要因素。

(A. NH_3 排放通量的动态变化; B. 平均 NH_3 排放通量; 柱状图上方不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$), 下同)图 1 不同施肥处理对设施菠菜季土壤 NH_3 排放通量的影响
Fig. 1 Effects of different fertilization on soil NH_3 emission fluxes from spinach fields

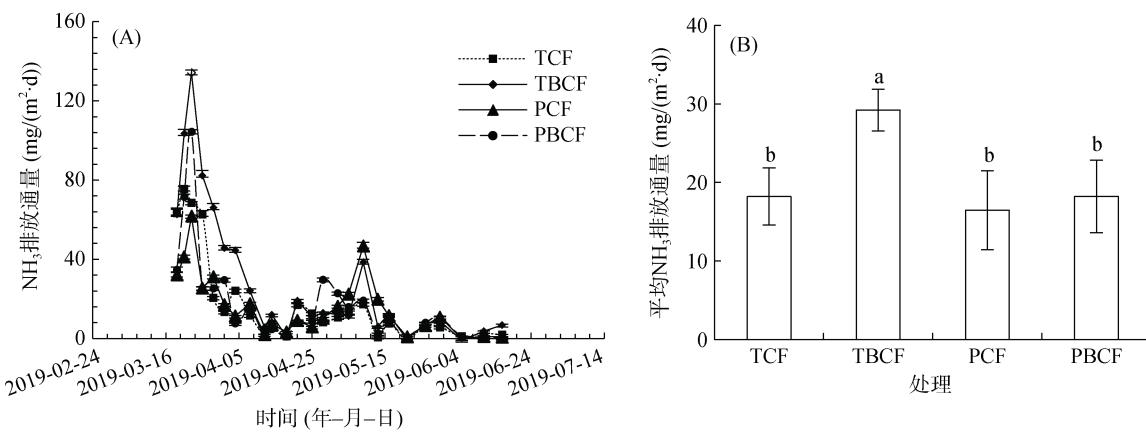
2.2 施肥方式与施用生物质炭对黄瓜季土壤 NH_3 排放通量的影响

黄瓜季土壤 NH_3 排放峰值主要发生在定植后 1 周内。生长前期排放量较大, 后期急剧降低。追肥后出现小的 NH_3 排放峰值, 但均远低于生长初期的排放(图 2A)。在相同施肥条件下, 不施生物质炭处理的平均排放通量为 $18.21 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 显著小于表施生物质炭处理的平均 NH_3 排放通量($29.22 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)。在翻耕措施下, 施用生物质炭处理的平均 NH_3 排放通量

为 $18.23 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 与不施生物质炭处理的平均 NH_3 排放通量($16.49 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)差异不显著(图 2B)。由此可见, 采用翻耕措施可消除施用生物质炭对 NH_3 排放的正效应。

2.3 施肥方式与施用生物质炭对蔬菜产量与单位产量 NH_3 排放的影响

不同处理间菠菜和黄瓜产量的差异均不显著, 但 NH_3 排放总量和单位产量的 NH_3 排放量存在显著差异($P<0.05$, 表 2)。在施化肥氮总量 $300 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 条件

(A. NH_3 排放通量动态变化; B. 平均 NH_3 排放通量)图 2 不同施肥处理对设施黄瓜季土壤 NH_3 排放通量的影响
Fig. 2 Effects of different fertilization on soil NH_3 emission fluxes from cucumber fields表 2 不同试验处理对蔬菜产量与 NH_3 排放量的影响Table 2 Effects of different fertilization on NH_3 emissions and vegetable yields

处理	菠菜产量 (kg/m^2)	黄瓜产量 (kg/m^2)	菠菜 NH_3 排放量 (kg/hm^2)	菠菜 NH_3 排放量/总氮(%)	黄瓜 NH_3 排放量 (kg/hm^2)	菠菜单位产量 量/总氮(%)	NH_3 排放(mg/kg)	黄瓜单位产量 量/总氮(%)	NH_3 排放(mg/kg)
TCF	$2.23 \pm 0.29\text{a}$	$12.81 \pm 1.03\text{a}$	$24.18 \pm 2.81\text{a}$	$8.00 \pm 0.90\text{a}$	$18.21 \pm 3.63\text{b}$	$3.03 \pm 0.61\text{b}$	$10.84 \pm 1.00\text{a}$	$1.42 \pm 3.52\text{b}$	
TBCF	$1.84 \pm 0.31\text{a}$	$11.49 \pm 1.03\text{a}$	$30.45 \pm 3.61\text{a}$	$10.15 \pm 1.20\text{a}$	$29.22 \pm 5.03\text{a}$	$4.80 \pm 0.84\text{a}$	$16.54 \pm 1.00\text{a}$	$2.53 \pm 1.39\text{a}$	
PCF	$2.95 \pm 0.04\text{a}$	$11.91 \pm 1.19\text{a}$	$14.91 \pm 1.78\text{b}$	$4.97 \pm 0.59\text{b}$	$16.49 \pm 5.03\text{b}$	$2.75 \pm 0.84\text{b}$	$5.05 \pm 1.00\text{b}$	$1.38 \pm 4.22\text{b}$	
PBCF	$2.95 \pm 0.19\text{a}$	$9.96 \pm 0.70\text{a}$	$13.33 \pm 3.38\text{b}$	$4.44 \pm 1.13\text{b}$	$18.23 \pm 5.03\text{b}$	$3.04 \pm 0.84\text{b}$	$4.52 \pm 0.23\text{b}$	$1.83 \pm 1.49\text{b}$	

注: 同列数据小写字母不同表示不同处理间差异显著($P<0.05$), 下表同。

下, 不施生物质炭和表施生物质炭处理的菠菜季土壤 NH_3 排放量分别为 $24.18 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 和 $30.45 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 占各自总氮投入量的 8.00% 和 10.15%。在施化肥氮总量 $600 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 条件下, 不施生物质炭和表施生物质炭处理的黄瓜季土壤 NH_3 排放量分别为 $18.21 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 和 $29.22 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 占各自总氮投入量的 3.03% 和 4.80%。

设施菠菜地不施生物质炭和表施生物质炭处理的 NH_3 排放量占总氮投入量的比例均显著大于翻耕措施下对应处理的结果($P<0.05$)。当不施用生物质炭时, 采用翻耕措施后菠菜季土壤 NH_3 排放总量和单位产量 NH_3 排放量分别降低 38.34% 和 53.41%, 黄瓜季土壤 NH_3 排放总量和单位产量 NH_3 排放量分别降低 9.45% 和 2.81%; 在施用生物质炭条件下, 采用翻耕措施后菠菜季土壤 NH_3 排放总量和单位产量 NH_3 排放量分别降低 56.22% 和 72.67%, 黄瓜季土壤 NH_3 排放总量和单位产量 NH_3 排放量分别降低

37.61% 和 27.67%($P<0.05$, 表 2)。相比不施生物质炭处理, 施用生物质炭均显著增加菠菜和黄瓜单位产量的 NH_3 排放量, 增加幅度分别为 52.58% 和 78.17% ($P<0.05$)。因此, 施用生物质炭将增加设施菜地单位产量 NH_3 排放的风险, 而采用翻耕措施可以有效降低施化肥和施用生物质炭对 NH_3 排放的促进作用。

2.4 施肥方式与施用生物质炭对设施菜地土壤 pH 与有效氮的影响

不同施肥处理对土壤 pH 具有显著的影响($P<0.05$, 表 3)。在相同耕作条件下, 添加生物质炭相比单纯施化肥处理提高菠菜和黄瓜地土壤 pH。在相同施肥条件下, 翻耕措施比表施措施提高土壤 pH(表 3)。生物质炭表施处理显著降低菠菜与黄瓜地土壤 NH_4^+ -N 含量, 显著增加菠菜地 NO_3^- -N 含量($P<0.05$)。翻耕措施显著降低菠菜土壤 NH_4^+ -N 含量, 增加 NO_3^- -N 含量($P<0.05$)。

表 3 不同施肥处理对设施菜地土壤 pH 与有效氮的影响
Table 3 Effects of different fertilization on soil pH and available nitrogen contents in protected vegetable plots

处理	菠菜地 pH	黄瓜地 pH	菠菜地土壤 NH_4^+ -N (mg/kg)	菠菜地土壤 NO_3^- -N (mg/kg)	黄瓜地土壤 NH_4^+ -N (mg/kg)	黄瓜地土壤 NO_3^- -N (mg/kg)
TCF	6.71 ± 0.11 b	6.29 ± 0.08 b	22.99 ± 1.06 a	11.93 ± 1.30 b	18.10 ± 0.13 a	24.51 ± 0.79 a
TBCF	6.89 ± 0.13 ab	6.51 ± 0.14 ab	9.31 ± 2.47 b	23.60 ± 2.19 a	10.20 ± 0.17 b	23.03 ± 0.26 a
PCF	6.98 ± 0.07 a	6.48 ± 0.02 b	7.35 ± 0.30 b	22.51 ± 4.48 a	17.50 ± 0.01 a	12.38 ± 11.55 b
PBCF	7.01 ± 0.09 a	6.74 ± 0.10 a	7.86 ± 5.77 b	20.26 ± 4.62 a	13.11 ± 3.02 ab	8.19 ± 12.51 c

3 讨论

3.1 不同处理措施对菠菜季和黄瓜季土壤 NH_3 排放效果的差异

施用生物质炭对氨挥发的影响随着施用量、种植作物、种植季节和土壤类型存在差异^[13, 15]。本试验观测表明, 两种设施蔬菜土壤 NH_3 排放对相同处理措施的响应存在差异, 主要表现为翻耕措施对菠菜季土壤 NH_3 的减排幅度远大于对应黄瓜季土壤 NH_3 的减排幅度。例如, 在不施用生物质炭时, 翻耕措施对菠菜季土壤 NH_3 排放总量和单位产量 NH_3 排放量的减排幅度为 38.34% 和 53.41%, 而黄瓜季土壤 NH_3 排放总量和单位产量 NH_3 排放量的减排幅度仅为 9.45% 和 2.81%; 在施用生物质炭时, 翻耕措施对菠菜季土壤 NH_3 排放总量和单位产量 NH_3 排放量的减排幅度为 56.22% 和 72.67%, 分别为黄瓜季土壤 NH_3 排放对应指标的 1.5 倍和 2.6 倍(表 2)。就 NH_3 减排效果而言, 翻耕措施对黄瓜季土壤 NH_3 的减排幅度明显低于菠菜季。

本研究认为该差异可以从两方面来解释:①菠菜

季和黄瓜季的灌溉状况导致土壤 NH_4^+ -N 有效吸附和迁移存在差异。本试验中菠菜种植于冬季而黄瓜定植于 3 月中旬以后。为避免灌溉降低土壤温度而不利于冬茬作物生长, 菠菜季灌溉量较小且频率低。黄瓜季大棚内气温较高, 尤其挂果期灌溉量大且灌溉频繁, 导致土壤条件比较湿润, 易发生土壤表层 NH_4^+ -N 随水分逐渐向底层移动, 加剧了氮素的淋溶损失^[26], 直接影响翻耕措施对黄瓜季土壤 NH_3 排放的减排效果。②本试验中黄瓜施氮量设置为 $600 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 低于北京市设施黄瓜的平均施氮量 $880 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ^[9], 而菠菜施氮总量为 $300 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。相比设施菠菜, 设施黄瓜生长期较长且维持高产。例如, 本试验中不同处理的黄瓜产量约为对应处理菠菜产量的 4 倍~6 倍。菠菜生长期短, 追肥次数少, 生产力低, 化肥表施后表层土壤 NH_4^+ -N 维持较高含量而有利于 NH_3 排放(表 3)。相反, 黄瓜生长期随灌溉追肥, 氮素以少量多次的形式追施, 易于被作物吸收, 具有相对较高肥料利用效率。采用翻耕措施有利于黄瓜生长前期肥料氮素被土壤吸附固定而降低 NH_3 排放, 但中后期所有处理追肥形式和数量均相同。因此, 采用翻耕措施后菠菜季

的 NH_3 减排效果比黄瓜季更明显。

3.2 控制设施菜地土壤 NH_3 排放的主导因素

设施菜地 NH_3 排放速率与表层土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量和 pH 均呈显著的正相关关系^[13, 28]。施用生物质炭对土壤 NH_3 排放产生 3 方面的效应：①生物质炭利用自身的比表面积、空隙结构和阳离子交换等性质，增加土壤对肥料 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的有效吸附从而降低土壤 NH_3 挥发^[29]；②施用生物质炭后土壤容重降低，土壤通气性增加，有利于提高硝化微生物的生理活性从而加速硝化过程^[20]；③施用生物质炭会提高土壤 pH，从而促进土壤 NH_3 挥发^[28]。本试验中施用生物质炭均能显著降低设施菠菜与黄瓜地化肥表施处理中表层土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量，同时在一定程度上提高了土壤 pH(表 3)。如果效应①为施用生物质炭影响 NH_3 排放的主导因素，添加生物质炭将减少 NH_3 排放。然而，本试验发现施用生物质炭显著增加黄瓜地土壤 NH_3 排放，并在一定程度上增加菠菜地土壤 NH_3 排放。相比目前大多数田间试验^[23]，本试验生物质炭施用量($10 \text{ t}/\text{hm}^2$)相对偏低，从而导致对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 吸附过程作用不明显。因此，在该生物质炭投入水平下利用生物质炭的吸附作用而有效减少 NH_3 排放是不可行的。设施菜地长期过量施肥导致土壤酸化。相比单纯施化肥处理，施用生物质炭后显著提高菠菜地土壤 pH 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量(表 3)。由于本试验中稻壳生物质炭自身的 pH 为 9.24，施用后增加土壤 pH。土壤 pH 上升有利于氮素的硝化作用，降低表层土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量^[20]。与以往研究推测一致^[28-29]，土壤 pH 升高是该地区施用生物质炭增加 NH_3 排放的主要原因。

本试验观测表明翻耕措施对菠菜地和黄瓜地土壤具有良好的 NH_3 减排效果。以化肥表施为对照，翻耕措施显著降低菠菜土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量，增加土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量，pH 变化不显著(表 3)。翻耕措施对 NH_3 排放的影响表现为：一方面，翻耕措施通过搅动土壤，促进氮肥与土壤充分混匀，有利于 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 进入底土；另一方面，翻耕措施增加了土壤的通气性，有利于硝化细菌活动而加速硝化过程，加快土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的转化^[20, 22]，降低表层土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量，导致 NH_3 排放大幅度降低。因此，本研究倾向于翻耕措施通过减少设施菜地表层土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度而降低 NH_3 排放的解释机理。

4 结论

1) 设施菠菜季和黄瓜季土壤 NH_3 排放主要发生在施肥后一周内。设施菜地通过减少基肥投入可有效

控制 NH_3 排放。

2) 施肥后翻耕是有效减少设施菠菜和黄瓜土壤 NH_3 排放的重要措施。在相同施化肥条件下，施肥后翻耕措施分别降低菠菜季和黄瓜季土壤 NH_3 排放总量的 38.34% 和 9.45%。在施用生物质炭条件下，翻耕措施分别降低菠菜季和黄瓜季土壤 NH_3 排放总量的 56.22% 和 37.61%。

3) 表施生物质炭显著增加菠菜季和黄瓜季单位产量的 NH_3 排放量，其增加幅度高达 52.58% 和 78.17%($P < 0.05$)。施用生物质炭通过提高土壤 pH 而增加设施菜地土壤 NH_3 排放。利用翻耕措施可消除施用生物质炭对 NH_3 排放的促进效应。

参考文献：

- [1] Huang X, Song Y, Li M M, et al. A high-resolution ammonia emission inventory in China[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2012, 26(1): 1–14.
- [2] Pan Y P, Tian S L, Liu D W, et al. Fossil fuel combustion-related emissions dominate atmospheric ammonia sources during severe haze episodes: Evidence from $(15)\text{N}$ -stable isotope in size-resolved aerosol ammonium[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(15): 8049–8056.
- [3] Pan Y P, Wang Y S, Tang G Q, et al. Spatial distribution and temporal variations of atmospheric sulfur deposition in Northern China: Insights into the potential acidification risks[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13(3): 1675–1688.
- [4] Wang G H, Zhang R Y, Gomez M E, et al. Persistent sulfate formation from London Fog to Chinese haze[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(48): 13630–13635.
- [5] Liu X, Zhang Y, Han W, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. Nature, 2013, 494(7438): 459–462.
- [6] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions[J]. Science, 2008, 320(5878): 889–892.
- [7] 李涛, 于蕾, 吴越, 等. 山东省设施菜地土壤次生盐渍化特征及影响因素[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 100–110.
- [8] 姜振萃, 闵炬, 陆志新, 等. 机械起垄侧条施肥对大白菜产量和氨挥发的影响[J]. 土壤, 2020, 52(1): 10–15.
- [9] 刘衍, 郭利娜, 贾羽旋, 等. 北京市设施蔬菜施肥状况及减施潜力分析[J]. 中国蔬菜, 2020(9): 71–81.
- [10] 郭金花. 典型设施蔬菜生产系统水肥、农药投入及环境影响的生命周期评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- [11] 石生伟, 刘衍, 郭利娜, 等. 天津市设施菜地施肥现状及减施潜力和对策[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(6): 1091–1105.
- [12] 王敬国, 林杉, 李保国. 氮循环与中国农业氮管理[J]. 中国农业科学, 2016, 49(3): 503–517.

- [13] 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.
- [14] Ren T, Christie P, Wang J G, et al. Root zone soil nitrogen management to maintain high tomato yields and minimum nitrogen losses to the environment[J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, 125(1): 25–33.
- [15] 贺发云, 尹斌, 金雪霞, 等. 南京两种菜地土壤氨挥发的研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(2): 253–259.
- [16] 奚振邦, 施秀珠, 黄伟祥, 等. 应用微气象学方法测定尿素的氨挥发损失[J]. 上海农业学报, 1987, 3(4): 47–56.
- [17] 葛晓光, 王晓雪, 付亚文, 等. 长期定位施氮条件下菜田氮素循环的研究[J]. 中国蔬菜, 1999(1): 13–17.
- [18] 张灿, 翟崇治, 周志恩, 等. 重庆市主城区农业源氨排放研究[J]. 中国环境监测, 2014, 30(3): 90–96.
- [19] 黄容, 高明, 廖燕妮, 等. 生物质灰渣与化肥混合对氨挥发的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 1160–1167.
- [20] Clough T, Condron L, Kammann C, et al. A review of biochar and soil nitrogen dynamics[J]. *Agronomy*, 2013, 3(2): 275–293.
- [21] Xia L L, Lam S K, Yan X Y, et al. How does recycling of livestock manure in agroecosystems affect crop productivity, reactive nitrogen losses, and soil carbon balance? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(13): 7450–7457.
- [22] Clough T J, Condron L M. Biochar and the nitrogen cycle: Introduction[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4): 1218–1223.
- [23] Sha Z P, Li Q Q, Lv T T, et al. Response of ammonia volatilization to biochar addition: A meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 655: 1387–1396.
- [24] 刘玮晶, 刘烨, 高晓荔, 等. 外源生物质炭对土壤中铵态氮素滞留效应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5): 962–968.
- [25] Fan C H, Chen H, Li B, et al. Biochar reduces yield-scaled emissions of reactive nitrogen gases from vegetable soils across China[J]. *Biogeosciences*, 2017, 14(11): 2851–2863.
- [26] Laird D A, Fleming P, Davis D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3/4): 443–449.
- [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.
- [28] Taghizadeh-Toosi A, Clough T J, Sherlock R R, et al. Biochar adsorbed ammonia is bioavailable[J]. *Plant and Soil*, 2012, 350(1/2): 57–69.
- [29] Rochette P, Angers D A, Chantigny M H, et al. NH₃ volatilization, soil concentration and soil pH following subsurface banding of urea at increasing rates[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2013, 93(2): 261–268.