

外源氮添加对不同种植年限设施菜田土壤固定态铵含量的影响

潘飞飞^{1,2}, 唐 蛟³, 张伟豪¹, 陈碧华^{1,2}, 王广印^{1,2}, 李新峥^{1,2}

(1. 河南科技学院园艺园林学院, 河南 新乡 453003; 2. 河南省园艺植物资源利用与种质创新工程研究中心, 河南 新乡 453003; 3. 河南科技学院资源与环境学院, 河南 新乡 453003)

摘 要: 研究外源氮(N)添加对不同种植年限设施菜田土壤固定态铵含量及最大固铵量的影响。选取 4 个不同种植年限(0 年、2 年、13 年和 21 年)的设施菜田土壤, 分别设置 4 个外源氮添加处理, 进行为期 36 天的室内培养, 测定不同种植年限和外源氮添加处理下的土壤固定态铵含量, 并计算其最大固铵量。4 个外源氮添加处理分别是: (1) CK, 不添加任何氮肥, 为对照; (2) CF, 常规施氮, 添加尿素态 N 374 mg kg⁻¹ 干土; (3) RCF, 减量施氮(减 N 46%, 添加尿素态 N 200 mg kg⁻¹ 干土); (4) RCF + OM, 减量施氮配施有机氮(添加尿素态 N 150 mg kg⁻¹ 干土并以鸡粪形式添加有机态氮 50 mg kg⁻¹ 干土)。结果显示: 随设施蔬菜种植年限的增加, 土壤本底固定态铵含量呈逐渐增加的趋势, 而最大固铵量却呈下降的趋势。同一种种植年限下, 各施肥处理在培养过程中的土壤固定态铵含量总体表现为 CK < RCF + OM < RCF < CF, 说明施肥可增加土壤固定态铵含量, 但其增幅大小受施肥量的多少和施肥种类影响, 其中 CF 处理土壤固铵量为最大(98.61 mg kg⁻¹), 显著高于 RCF 和 RCF + OM 处理, 而 RCF 处理的土壤固铵量(84.76 mg kg⁻¹)又高于 RCF + OM 处理(77.34 mg kg⁻¹)。设施菜田增施氮肥可提高土壤固定态铵的含量, 且化肥较有机肥的效果更优。

关 键 词: 外源氮添加; 种植年限; 设施菜田; 固定态铵; 最大固铵量

中图分类号: S153 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2021)06-1368-09

DOI: [10.19336/j.cnki.trtb.2021042202](https://doi.org/10.19336/j.cnki.trtb.2021042202)

潘飞飞, 唐 蛟, 张伟豪, 陈碧华, 王广印, 李新峥. 外源氮添加对不同种植年限设施菜田土壤固定态铵含量的影响 [J]. 土壤通报, 2021, 52(6): 1368 - 1376

PAN Fei-fei, TANG Jiao, ZHANG Wei-hao, CHEN Bi-hua, WANG Guang-yin, LI Xin-zheng. Effects of Exogenous Nitrogen Additions on Soil Fixed Ammonium Content in Protected Vegetable Fields with Different Planting Years[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(6): 1368 - 1376

我国设施蔬菜生产具有典型的高投入、高产出的特点, 由于氮肥的长期过量施用所造成的氮素利用率低是集约化蔬菜生产中普遍存在的问题。尽管施氮对作物增产意义重大, 但随之也引发了一系列的土壤及环境问题, 如土壤酸化、养分失衡、养分循环及供给能力下降、土壤硝态氮淋失加剧以及地下水硝酸盐污染等^[1-3], 这些都严重阻碍了设施蔬菜的可持续发展。在维持现有产量水平的条件下, 如何在减少氮肥施用量的同时通过有机无机肥配施来提高氮肥利用效率是当前生产中亟需解决的问题。固定态铵是指存在于土壤 2:1 型铝硅酸盐粘土矿物层间的、不能被中性盐所交换的铵, 即用 KBr 除去土壤有机氮, 用 KCl 溶液洗去交换性铵, 再用 HF-HCl 破坏土壤矿物晶格后所释放出来的铵^[4]。它可作

为外源氮的一个重要缓冲库, 在作物氮素需求较少的时期, 将土壤中因施肥、生物活动等措施所产生的过多的铵暂时储存在矿物晶层间, 减少氮素的损失^[5-6]; 而在作物生长旺盛时期, 又可作为有效氮源, 释放出来供植物吸收利用, 提高氮素利用效率^[7]。可见, 土壤固定态铵在协调土壤保氮、供氮以及氮肥利用率的提高方面发挥着关键作用。我国土壤固定态铵含量变化在 35 ~ 573 mg kg⁻¹ 之间, 平均为 198 mg kg⁻¹, 占全氮的比例在 15% 以上^[8], 具备相当大的储量, 而如何充分利用这一储存库来减少因过量施氮所导致的氮素大量盈余和无效损失, 对于设施蔬菜减肥、增效和环境友好型施肥管理措施的制定意义重大。已有研究表明, 土壤固定态铵含量和对外源氮的矿物固定会因施肥量、施肥种类及耕作栽

收稿日期: 2021-04-22; **修订日期:** 2021-05-24

基金项目: 河南省重点研发与推广专项(202102110065)、河南科技学院博士科研启动费(207010618002)和河南省重大科技专项(创新示范专项)(201111110600)资助

作者简介: 潘飞飞(1988-), 女, 河南周口, 博士, 讲师, 主要研究领域为土壤培肥与养分循环。E-mail: panfeifei89@163.com

培制度等的不同而异。Cavalli等^[9]研究指出, 当外源添加的 NH_4^+ 量由 70 mg kg^{-1} 增至 2800 mg kg^{-1} 时, 土壤对 NH_4^+ 的固定比例则由 $17\% \sim 60\%$ 下降至 $4\% \sim 12\%$, 表明土壤对外源氮的固定比例随施氮量的增加呈下降趋势。范绍博等^[10]研究结果显示, 与不施肥对照相比, 长期施用氮肥会导致土壤固定态铵含量降低, 单施猪圈肥对土壤固定态铵含量没有显著影响, 猪圈肥配施化肥则可显著增加土壤固定态铵含量。而更多研究显示, 施用化肥可增加土壤固定态铵含量, 在单施化肥的基础上增施有机肥, 对土壤固定态铵的增加效果更为显著^[11-12]。设施蔬菜由于其特殊的产业需求, 在施肥量和施肥模式上与传统农作物生产都有着极大的差异, 二者将影响设施土壤自身的固定态铵含量及其对外源肥料氮的矿物固定。但已有研究多是针对农田土壤, 对设施菜田的研究相对缺乏。此外, 随着设施蔬菜种植年限的增加, 土壤某些理化性态会发生改变, 如有机质、盐分、碱解氮、全钾和速效钾含量一般随之呈增加的趋势, pH 随之呈下降的趋势^[13-14]。已有结果认为, 土壤碱解氮与固定态铵含量间呈显著正相关关系, 即随碱解氮或 NH_4^+ 浓度的增加, 土壤固定态铵含量呈增加的趋势^[15], 而有机大分子和 K^+ 的存在则能阻碍铵的矿物固定^[16], 但这些指标的高低将如何综合来影响设施菜田土壤对外源氮肥的矿物固定仍鲜有报道。因此, 有必要在设施菜田条件下, 开展不同种植年限和不同施肥措施对土壤固定态铵含量影响的研究。本研究选用了 4 个不同种植年限 (0 年、2 年、13 年和 21 年) 的设施菜田土壤, 通过培养试验, 研究不同外源氮添加处理 (不施氮、常规施氮、减量施氮和减量施氮并配施鸡粪) 对土壤固定态铵含量的影响, 针对不同种植年限的菜田土壤, 找到最适施肥方式来增加土壤对外源氮肥的保蓄能力, 减少氮肥的损失, 以期为设施蔬菜种植体系中减肥、增效及环境友好施肥措施的优化提供一些理论基础和技术支撑。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验区位于新乡市牧野区朱庄屯 ($35^{\circ}18' \text{ N}$, $113^{\circ}54' \text{ E}$)。该区属暖温带大陆性季风型气候, 四季分明, 冬寒夏热, 年平均气温 14°C , 其中 7 月最热, 1 月最冷, 最高和最低平均气温分别为 27.3°C 和 0.2°C 。年平均降雨量 573.4 mm , 主要集中在 6~9 月间, 占

全年总降雨量的 72% 左右, 年平均湿度 68%, 无霜期 220 d。

该区塑料大棚多为单栋拱圆形竹木结构, 南北延长, 实行一年两茬的轮作制度, 其中秋冬茬主栽番茄, 早春茬主栽黄瓜。2018 年 7 月试验区塑料大棚取样前的一个轮作周期, 棚内番茄和黄瓜栽培品种分别为‘金棚 218’ (西安金鹏种苗有限公司提供) 和‘油亮抗病 16-1’ (北京中农绿亨种子科技有限公司提供)。番茄的栽植行距和株距分别为 66 cm 和 40 cm, 黄瓜分别为 60 cm 和 35 cm, 二者均采用单畦双行栽培。

在试验区选取 3 个不同种植年限的塑料大棚, 截止到 2018 年 7 月早春茬黄瓜拉秧, 种植年限分别为 2 年、13 年和 21 年。另外, 选用该试验区大田土壤 (小麦—玉米周年轮作) 作为种植年限为 0 年的对照。鉴于不同种植年限塑料大棚彼此间相距较近, 不存在土壤类型的差异, 因此, 不会影响试验结果。于 2018 年 7 月 25 日早春黄瓜拉秧后, 将各棚随机分为 3 个小区, 每个小区内依“S”形路线多点混合采集 0~20 cm 土层的土壤样品, 每个棚得 3 个混合土样。于 2018 年 6 月 8 日, 即小麦收获后, 多点混合采集 0~20 cm 土层的大田土壤样品。在棚内或田间挖土壤剖面 (20 cm 深), 取中间位置将环刀从剖面侧边压入土中, 直到环刀筒中充满土壤样品为止, 将环刀带回实验室, 用于测定该土层土壤的田间持水量 (质量含水量)。不同种植年限的新鲜土样, 一部分过 2 mm 筛, 以 2 mol L^{-1} KCl 溶液震荡浸提后, 流动分析仪测定铵态氮的含量。其余土样自然风干, 用于测定土壤的基础理化性质, 测定方法参照鲁如坤主编的《土壤农业化学分析方法》^[17]。测定结果如表 1 所示。

1.2 试验设计

称取不同种植年限的风干土样各 600 g (3 份, 作为 3 个重复), 调节土壤水分含量至田间持水量的 40%, 于 25°C 的恒温培养箱中 (黑暗) 预培养 2 周。将预培养后的土壤取约 15 g, 风干、磨细、过 100 目 (0.15 mm) 筛, 测定土壤固定态铵含量, 作为各种种植年限土壤固定态铵含量的初始值。剩余土壤平均分为 4 份, 设置 4 个不同的氮肥添加处理, 分别为 (1) CK, 不添加任何氮肥, 为对照; (2) CF, 常规施氮, 添加尿素态 $\text{N} 374 \text{ mg kg}^{-1}$ 干土; (3) RCF, 减量施氮, 在 374 mg kg^{-1} 的基础上减 N 46%, 即添

表 1 供试土壤基础理化性质
Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil

种植年限 Planting year	pH	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g kg ⁻¹)	铵态氮 Ammonium nitrogen (mg kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus (g kg ⁻¹)	全钾 Total potassium (g kg ⁻¹)	田间持水量 Water holding capacity (%)
0年	6.41	13.21	1.75	7.69	0.96	11.36	46.38
2年	6.36	15.84	2.08	6.95	1.06	12.13	36.24
13年	6.24	16.72	1.97	8.48	1.29	10.65	39.42
21年	6.11	13.45	2.12	10.09	1.65	19.73	47.40

加尿素态 N 200 mg kg⁻¹ 干土; (4) RCF + OM, 减量施氮配施有机氮, 添加尿素态 N 150 mg kg⁻¹ 干土并以鸡粪形式添加有机态氮 50 mg kg⁻¹ 干土。其中尿素溶于少量水施用, 鸡粪(选用市售商品鸡粪, 已进行过高温腐熟发酵, 为纯鸡粪, 鸡粪中全氮、全磷和全钾含量分别为 26.40 g kg⁻¹、23.24 g kg⁻¹ 和 8.36 g kg⁻¹) 则直接添加到土壤中并充分混匀。所有处理均未添加磷、钾肥。肥料添加完毕后, 调节各处理的土壤水分含量至田间持水量的 50%, 置于 250 ml 的培养瓶中, 于 25 °C 恒温培养箱中黑暗培养, 期间每隔 2~3 天补充一次水分, 维持的土壤水分含量不变。

1.3 样品采集与测定

于培养开始后的 0.5、1、6、18 和 36 天, 分别从各培养瓶中取土壤样品约 15 g, 风干、磨细、过 100 目筛, 测定土壤固定态铵含量。土壤固定态铵测定采用改良的 Silva-Bremner 法^[4]: 称取 2.00 g 土样于 200 ml 烧杯中, 加入 40 ml KOBr, 静置 2 h 后, 于加热板上煮沸 5 min, 冷却后, 弃上清液, 剩余残留物以 0.5 mol L⁻¹ 的 KCl 溶液洗入离心管中, 离心后弃上清液, 将离心管中的土刮入消化管内, 加 6 ml 浓硫酸进行消煮, 待消煮液冷却后转入蒸馏瓶中并加入 40ml 10 mol L⁻¹ 的 NaOH 进行蒸馏, 以硼酸作为吸收液, 标准酸进行滴定。

土壤本底固定态铵, 又称为土壤“原有的”固定态铵, 指土壤自田间取回并风干过筛后所测得的土壤固定态铵含量。

固铵量, 即土壤“新固定的”固定态铵, 等于外源氮添加后土壤的固定态铵含量减去该土壤的本底固定态铵含量。最大固铵量则等于外源氮添加后土壤固定态铵含量在培养过程中所能达到的最大值减去该土壤的本底固定态铵含量。

1.4 数据处理与计算

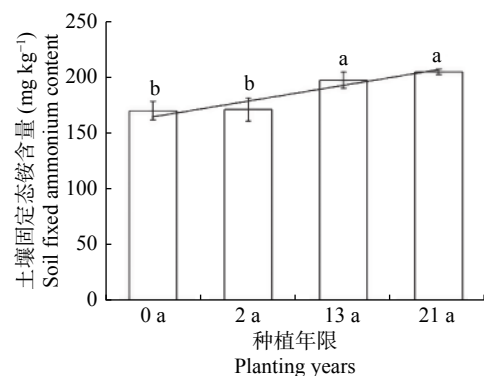
采用 Excel 2007 对试验数据进行初步计算, 采用 SPSS 19.0 软件对数据进行双因素主效应分析和多重比较 (Duncan 新复极差法)。文中的图采用

Origin Pro 8 进行绘制, 图和表中的数据均为三个或多个数值的平均值。

2 结果与分析

2.1 种植年限对土壤本底固定态铵含量的影响

由图 1 可知, 0 a、2 a、13 a 和 21 a 设施菜田土壤的本底固定态铵含量分别为 169.90 mg kg⁻¹、171.08 mg kg⁻¹、197.28 mg kg⁻¹ 和 204.64 mg kg⁻¹, 表现为 0 a < 2 a < 13 a < 21 a, 即随设施菜田种植年限的增加, 土壤固定态铵含量整体呈增加的趋势。其中种植年限为 13 a 和 21 a 菜田土壤固定态铵含量显著 ($P < 0.05$) 高于种植年限为 0 a 和 2 a 土壤, 而种植年限仅 2 a 的设施菜田土壤固定态铵含量与农田对照土壤之间并无显著差异。



注: 图中不同小写字母表示不同种植年限间的差异在 $P < 0.05$ 水平上显著。0 a 表示种植年限为对照, 即农田土壤; 2 a、13 a 和 21 a 分别表示设施蔬菜种植年限为 2 年、13 年和 21 年。下同。

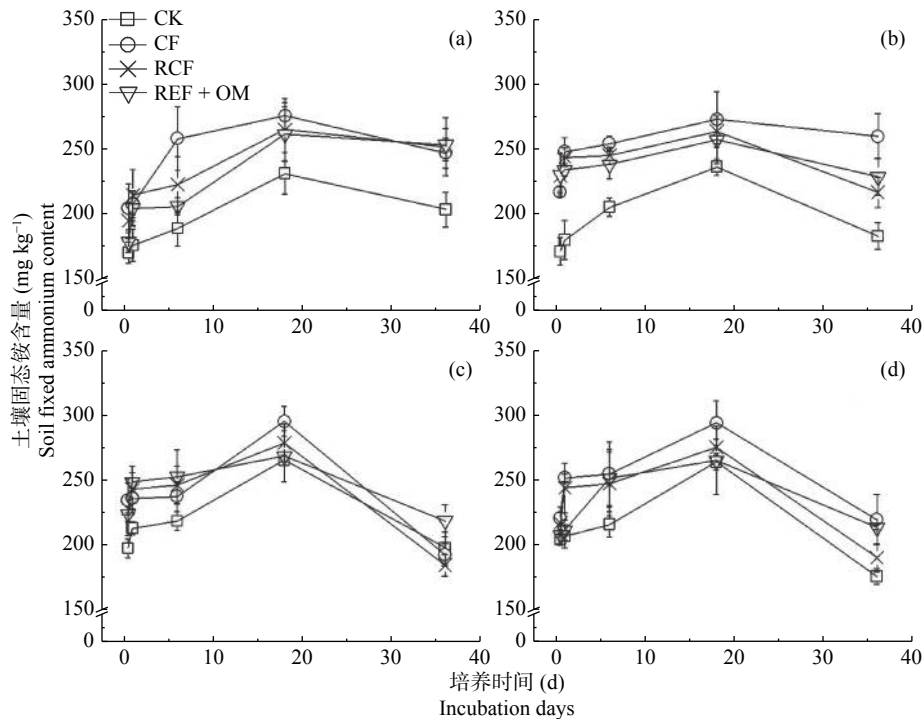
图 1 不同种植年限设施菜田土壤的本底固定态铵含量
Fig.1 Initial fixed ammonium content in protected vegetable fields of different planting years

2.2 外源氮添加对土壤固定态铵含量的影响

随氮肥添加后培养时间的延长, 不同施肥处理土壤的固定态铵含量都呈现出先增加后降低的趋势, 且于培养第 18 d 达最大值 (图 2), 此时, 可认为土壤对氮素的固定达到了最大值, 该值与土壤本底固定态铵含量之差即为土壤的最大固铵量。在同一种植年限下, 各处理的土壤固定态铵含量总体表现

为 $CK < RCF + OM < RCF < CF$ 。对于 0 a 对照土壤, 在整个培养过程中, 以上各外源氮添加处理的土壤固定态铵含量依次平均为 $193.50 \text{ mg kg}^{-1}$ 、 $220.47 \text{ mg kg}^{-1}$ 、 $229.29 \text{ mg kg}^{-1}$ 和 $238.07 \text{ mg kg}^{-1}$, 与不施肥处理 (CK) 相比, CF、RCF 和 RCF + OM 处理土壤固定态铵含量的增幅依次平均为 13.94%、18.50% 和 23.03%; 种植年限为 21 a 菜田土壤, 以上各外源氮添

加处理的土壤固定态铵含量依次平均为 $213.80 \text{ mg kg}^{-1}$ 、 $230.37 \text{ mg kg}^{-1}$ 、 $235.09 \text{ mg kg}^{-1}$ 和 $248.56 \text{ mg kg}^{-1}$, 与不施肥处理 (CK) 相比, CF、RCF 和 RCF + OM 处理土壤固定态铵含量的增幅依次平均为 7.75%、9.96% 和 16.26%。可见, 施肥可增加土壤固定态铵含量, 但其增幅大小受到外源氮添加和种植年限的共同影响。



注: 图 (a)、(b)、(c) 和 (d) 分别表示种植年限为 0 a、2 a、13 a 和 21 a 的设施菜田土壤。

图 2 培养过程中不同外源氮添加处理的土壤固定态铵含量

Fig. 2 Soil fixed ammonium content under different exogenous nitrogen additions during the incubation

表 2 主效应分析结果显示, 在整个培养过程中, 种植年限和外源氮添加处理对土壤固定态铵含量的主效应都达到极显著水平 ($P < 0.01$), 二者间的交互效应在 0.5 d、1 d 和 36 d 时均达显著 ($P < 0.05$) 或极显著水平 ($P < 0.01$), 但在 6 d 和 18 d 时交互效应并未达到显著水平。

进一步的多重比较结果显示, 在整个培养过程中 (36 d 除外), 随种植年限的增加, 土壤固定态铵含量总体呈增加趋势, 且种植年限为 13 a 和 21 a 的菜田土壤显著高于 0 a 对照。与对照相比, 施氮均显著增加了培养过程中的土壤固定态铵含量, 其中以 CF 处理的提升效果最大, RCF 和 RCF + OM 处理的提升效果次之。

2.3 种植年限和外源氮添加对土壤最大固铵量的影响
由培养过程中土壤固定态铵含量的最大值减去

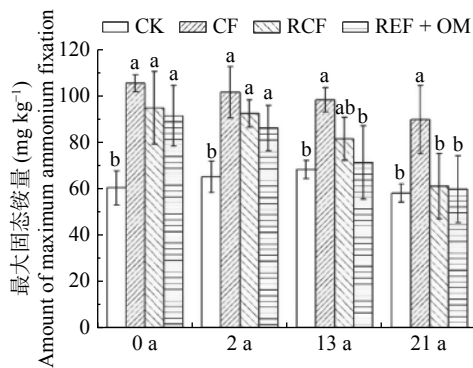
该土壤的本底固定态铵含量, 得到各外源氮添加处理的最大固铵量, 如图 3 所示。各种种植年限设施菜田土壤中, 不同外源氮添加处理的最大固铵量变化在 $58.03 \sim 105.29 \text{ mg kg}^{-1}$ 之间, 其中 $CF > RCF > RCF + OM > CK$, 且 CF 与 CK 间的差异均显著 ($P < 0.05$)。除 CK 处理外, 各外源氮添加处理条件下, 随设施菜田种植年限的增加, 土壤最大固铵量呈下降的趋势。

主效应分析结果显示 (表 3), 种植年限和施肥处理对土壤固铵量及其占总施氮量的比例的主效应均达到极显著水平 ($P < 0.01$), 但二者间的交互效应均未达到显著水平。进一步的多重比较显示, 随种植年限的增加, 土壤固铵量呈逐渐下降的趋势, 且种植年限为 21 a 的菜田土壤均显著 ($P < 0.05$) 低于 0 a 对照土壤和 2 a、13 a 的菜田土壤。各种种植年

表 2 种植年限和外源氮添加对土壤固定态铵含量的主效应分析
Table 2 Main effect analysis of planting years and exogenous nitrogen additions on soil fixed ammonium content

因素 Factor	水平 Level	土壤固定态铵含量 (mg kg ⁻¹) Soil fixed ammonium content				
		0.5 d	1 d	6 d	18 d	36 d
种植年限	0 a	186.77 ± 15.36 b	200.22 ± 16.90 b	218.48 ± 29.49 b	257.94 ± 19.01 b	238.43 ± 23.68 a
	2 a	211.62 ± 27.69 a	226.18 ± 31.46 a	235.40 ± 21.21 a	257.21 ± 15.44 b	218.52 ± 26.72 b
	13 a	220.81 ± 16.30 a	234.96 ± 15.71 a	238.58 ± 14.91 a	277.01 ± 13.52 a	198.11 ± 14.63 c
	21 a	212.90 ± 7.81 a	228.92 ± 22.58 a	242.73 ± 17.82 a	274.91 ± 13.81 a	200.34 ± 20.31 c
外源氮添加	CK	185.73 ± 17.85 b	193.86 ± 18.82 c	207.08 ± 13.64 b	249.18 ± 18.25 c	190.03 ± 12.46 c
	CF	219.14 ± 12.60 a	235.65 ± 20.28 a	250.99 ± 9.18 a	284.33 ± 12.09 a	226.20 ± 25.84 a
	RCF	217.06 ± 15.89 a	236.16 ± 14.71 a	240.08 ± 12.05 a	270.48 ± 7.73 b	210.67 ± 30.43 b
	RCF + OM	210.17 ± 22.93 a	224.61 ± 20.31 b	237.03 ± 22.00 a	263.06 ± 5.05 b	228.50 ± 17.36 a
种植年限		0.000**	0.000**	0.005**	0.004**	0.000**
外源氮添加		0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**
种植年限 × 外源氮添加		0.011*	0.007**	0.126 ^{NS}	0.903 ^{NS}	0.001**

注：表中数值均为平均值 ± 标准偏差。同一列中不同小写字母表示不同种植年限间或不同施肥处理间的差异显著 (P < 0.05)，^{NS} 表示因子的主效应或交互效应不显著，*和**分别表示因子的主效应或交互效应显著 (P < 0.05) 和极显著 (P < 0.01)。下同。



注：图中同一组中不同小写字母表示不同外源氮添加处理间的差异显著 (P < 0.05)。

图 3 不同种植年限和外源氮添加条件下的最大固铵量

Fig.3 Amount of maximum ammonium fixation under different planting years and exogenous nitrogen additions

限下 (由 0 a 到 21 a) 土壤固铵量依次为 87.87 mg kg⁻¹、86.12 mg kg⁻¹、79.73 mg kg⁻¹ 和 70.27 mg kg⁻¹，说明随设施菜田种植年限的增加，尽管土壤本底固

定态铵含量有所提升，但最大固铵量却随之下降。而同一种植年限、不同外源氮添加处理下，土壤最大固铵量表现为 CF > RCF > RCF + OM > CK，除 RCF 处理与 RCF + OM 处理间差异不显著外，其余各处理间的差异均达显著水平 (P < 0.05)。

3 讨论

3.1 设施蔬菜种植年限对土壤固定态铵含量的影响

本研究结果显示，不同种植年限设施菜田土壤的本底固定态铵含量表现为 0 a < 2 a < 13 a < 21 a，即随种植年限的增加，土壤本底固定态铵含量呈增加的趋势 (图 1)。这可能是由设施菜田中有机、无机氮肥的长期大量施用所引起的，与前人研究中有有机、无机肥配施可增加土壤固定态铵含量^[11-12]的结果相一致。但 Roing 等^[18] 研究认为，长期施肥并不能显著增加土壤固定态铵含量，因为固定态铵库是

表 3 种植年限和外源氮添加对土壤最大固铵量的主效应分析
Table 3 Main effect analysis of planting years and exogenous nitrogen additions on amount of maximum ammonium fixation

因素 Factor	水平 Level	最大固铵量 (mg kg ⁻¹) Amount of maximum ammonium fixation
		0 a
种植年限	2 a	86.12 ± 15.44 a
	13 a	79.73 ± 10.53 a
	21 a	70.27 ± 6.81 b
	CK	63.28 ± 4.03 c
外源氮添加	CF	98.61 ± 6.68 a
	RCF	84.76 ± 10.93 b
	RCF + OM	77.34 ± 13.80 b
种植年限		0.000**
外源氮添加		0.000**
种植年限 × 外源氮添加		0.166 ^{NS}

注：**表示因子的主效应或交互效应在 P < 0.01 水平达显著性差异，^{NS} 则表示无显著性差异。

土壤氮的一个缓冲库, 施肥在增加土壤固定态铵的同时也促进了作物对氮素的吸收, 所以有更多的固定态铵被释放以供作物吸收; 巨晓棠等^[19] 也认为, 施氮对土壤固定态铵的增加作用仅发生在施氮初期, 在更长时间尺度上, 施氮对提高土壤固定态铵库容的作用不大。韩晓日等^[20] 认为, 土壤固定态铵含量增加与否与施肥量的多少有关, 研究显示, 长期施用低量猪厩肥对土壤固定态铵含量没有显著影响, 但施用高量的猪厩肥可增加其含量。这些研究结果说明土壤铵的矿物固定与释放间可能存在一个动态平衡, 在外源氮添加较少的情况下, 黏土矿物对外源氮的固定而导致的固定增量与因作物吸氮增加而导致的固定态铵的释放量相持平, 所以土壤固定态铵含量变化不大; 而当外源氮添加过量时, 则固定增量大于释放量, 且土壤中剩余较多的速效氮可供作物吸收利用, 故土壤固定态铵含量随施肥年限的增加呈累积趋势。在本研究中, 种植年限为 13 a 和 21 a 菜田土壤的固定态铵含量均有显著提升, 但种植年限仅 2 a 的菜田土, 其本底固定态铵含量与 0 a 对照间的差异并不显著 (图 1), 说明未达到一定年限时, 铵的矿物固定和释放间的平衡未被打破, 因此施肥后土壤固定态铵含量无明显增加。

另外, 同一外源氮添加处理下, 设施菜田的种植年限越久, 添加外源氮肥后土壤的最大固铵量则越小 (图 3, 表 3), 这可能与土壤本底固定态铵含量有关, Elmaci 等^[21] 研究认为, 土壤本底固定态铵含量越高, 其黏土矿物固定外源氮的能力越弱。在本研究中, 随设施菜田种植年限的增加, 由于长期、过量的氮肥投入, 导致土壤本底固定态铵含量呈逐渐增加的趋势, 黏土矿物晶层间固定位点饱和度增加, 可供外源氮储存的位点则随之减少^[22], 从而导致土壤的固铵量随设施菜田种植年限的增加而下降。

3.2 不同外源氮添加对土壤固定态铵含量和最大固铵量的影响

随氮肥添加后培养时间的延长, 不同施肥处理土壤的固定态铵含量都呈现出先增加后降低的趋势, 且于培养第 18 d 达最大值 (图 2), 此时, 可认为土壤对氮的固定达到了最大。但本研究中达到最大固铵量的时间与前人有所不同。张杨珠等^[23] 对湖南几种稻田土壤铵的矿物固定动力学研究显示, 土壤对加入铵的矿物固定速率很快, 通常反应 24 h 后即可达到平衡; 而樊小林等^[24] 研究则表明, 即使在外源

铵添加后的 96 h, 土壤固铵量也还没达到最大值。这些研究结果中的差异可能与土壤黏土矿物的类型、矿物固定的条件、外源氮添加的浓度和种类等多方面因素有关; 另外, 设施菜田土壤由于长期大量施用有机肥和秸秆原位还田, 致使土壤中 K^+ 和大分子有机质含量均偏高, 将阻碍铵的矿物固定, 使得固铵进程有所延迟。此时土壤新增加的这部分固定态铵的来源可能有三方面, 一是外源氮进入土壤后分解所产生的 NH_4^+ , 二是土壤中原有的 NH_4^+ , 三是土壤自身有机组分矿化分解所产生的 NH_4^+ 。在本研究中, 即使是未添加任何外源氮肥的对照, 土壤固定态铵含量亦有所增加, 也间接说明了土壤矿化释放了一些 NH_4^+ 进入到矿物晶层间, 或土壤原有的 NH_4^+ 被黏土矿物所固定。而培养第 18 天以后, 各外源氮添加处理的土壤固定态铵含量都呈现出下降的趋势, 这一方面可能是由于培养过程中硝化作用的持续进行使得土壤中因施氮而大量存在的 NH_4^+ 浓度降低, 矿物晶层间的 NH_4^+ 得以释放, 土壤固定态铵含量降低; 另一方面, 土壤微生物可与黏土矿物竞争土壤中的矿质氮^[5], 致使矿质氮的含量下降, 土壤固定态铵部分释放出来。

在整个培养过程中, 同一种种植年限下, 各外源氮添加处理的土壤固定态铵含量总体表现为 $CK < RCF + OM < RCF < CF$, 添加外源氮肥后土壤的最大固铵量亦表现出相同趋势, 说明施肥可增加土壤固定态铵含量, 但其增幅大小受施肥量的多少和施肥种类影响, 其中以 CF 处理的提升效果最大, RCF 和 RCF + OM 处理的提升效果次之。巨晓棠等^[19] 研究了不同施肥量对小麦生长期土壤固定态铵含量的影响, 结果指出, 土壤固定态铵含量随施氮量的增加而增加。这与本研究的结果相一致。

外源氮肥的种类对土壤固定态铵含量和固铵量也有较大影响。顾敏京等^[25] 研究了秸秆还田对双季晚稻土壤固定态铵的影响, 结果指出, 秸秆全量还田且不施用任何化学氮肥可降低土壤固定态铵含量, 这主要是因秸秆分解过程中所释放的氮不能完全满足参与分解的微生物的生长代谢, 微生物还需从土壤中固持一部分氮来满足自身需求^[26], 致使土壤中有效氮的含量降低, 促进了矿物晶格内固定态铵的释放。有机物料的 C/N 对该过程 (铵的矿物固定—释放) 的影响较大, 因其在很大程度上决定了有机物料添加到土壤中后的矿化—固持进程, 若 C/N 较小 (< 20),

则添加后能快速分解矿化, 释放所含氮素^[27], 增加土壤溶液中可固定 NH_4^+ 的含量, 促进矿物固定, 但若 C/N 较大 (>20), 则诱发微生物固持土壤中可利用的有效氮^[28-29], 降低土壤溶液中 NH_4^+ 的浓度, 促进固定态铵的释放。本研究中, 在维持总施氮量不变的情况下, 以鸡粪代替 25% 化肥氮 (RCF + OM) 处理所得的最大固铵量低于全部施用化肥的处理 (RCF), 这一方面可能是因为鸡粪中的氮多以有机氮的形式存在, 施入到土壤中后需一段时间才能转化为矿质氮, 而尿素经水解可快速转化为铵态氮, 被黏土矿物所固定。李传章^[30] 研究表明, 与不施肥相比, 鸡粪 (施用量分别为 30000 kg hm^{-2} 和 75000 kg hm^{-2}) 施入到土壤 2 个月后, 有机碳累积分解率达 40% 以上, 可显著增加土壤中 NH_4^+ 的含量, 但有机物料分解的同时也释放了大量的钾元素和未完全分解的大分子有机质, 土壤中速效钾和有机质含量有显著增加。因此, 尽管鸡粪的分解矿化释放了更多的铵态氮可被黏土矿物所固定, 但该增加效果会被 K^+ 对后续 NH_4^+ 矿物固定的抑制作用抵消一部分, 致使鸡粪部分替代化肥处理的土壤固定态铵增加量不及全部施用化肥的处理。另一方面, 鸡粪中大分子有机组分的存在也可能会阻挡 NH_4^+ 进入矿物晶层的通道, 阻碍土壤矿物的固铵进程, Zhang 等^[31] 研究指出, 将伊利石包裹以腐殖酸后, 其对 NH_4^+ 的矿物固定能力下降, 说明土壤中有机组分的存在不利于黏土矿物对铵的固定。与之相似, 作者^[5] 对小麦秸秆的研究也指出, 与单施化肥氮相比, 小麦秸秆与化肥配施降低了外源氮进入固定态铵库的量, 主要是因为与鸡粪相比, 秸秆的 C/N 更大, 矿化分解释放氮的速率相对较慢, 而由秸秆添加所引发的微生物固持作用对土壤氮的消耗, 反而会促进土壤固定态铵的释放。具体影响机制如何, 需要开展鸡粪添加后在土壤中的矿化分解过程及其对土壤黏土矿物表面吸附特性的影响研究, 相关结果将有助于进一步解释 NH_4^+ 的矿物固定机理。另外, 由于本培养试验的时间短, 且并未添加磷、钾肥, 因此, 与大田实际情况相差较远, 后续仍需开展盆栽或大田试验, 来验证本试验结果的准确性。

另外, 彭英湘等^[32] 的研究还指出, 长期不施钾肥的土壤其固定态铵含量升高的幅度, 要显著高于施钾肥或者施含钾有机肥的处理, 这说明不论是施用何种肥料, 由此所导致的土壤中 K^+ 浓度的升高并

不利于土壤固定态铵含量的增加, 因为 K^+ 与 NH_4^+ 的水合半径相似, 能与 NH_4^+ 竞争相同的固定位点, 进而阻碍铵的矿物固定^[33]。但也有研究指出, K^+ 对 NH_4^+ 矿物固定的影响受二者添加先后顺序的调控, 当 K^+ 先于 NH_4^+ 添加到土壤中, 由于占据矿物晶格内的位点并与 NH_4^+ 竞争, 能阻碍铵的矿物固定; 而当 K^+ 在 NH_4^+ 之后添加时, 则没有阻碍作用^[34]。在本研究中, 供试土壤为不同种植年限的设施菜田土壤, 由于长期大量施肥和秸秆还田, 土壤钾含量一般随种植年限增加呈逐渐增加趋势^[35], 而大量 K^+ 的存在会阻碍黏土矿物对新添加外源氮的固定, 这也导致了在本试验中同一外源氮添加处理下, 随设施蔬菜种植年限的增加, 土壤最大固铵量呈逐渐下降的趋势 (图 3)。

4 结论

(1) 随设施蔬菜种植年限的增加, 土壤本底固定态铵含量呈逐渐增加的趋势。与 0 a 对照相比, 种植年限为 13 a 和 21 a 菜田土壤的固定态铵含量均有显著提升, 但种植年限仅 2 a 的菜田, 土壤固定态铵含量的增加并不显著。而随种植年限的增加, 加入外源氮肥后土壤的最大固铵量呈下降趋势。

(2) 同一种种植年限, 各外源氮添加处理在培养过程中的土壤固定态铵含量总体表现为 $\text{CK} < \text{RCF} + \text{OM} < \text{RCF} < \text{CF}$, 说明施肥可增加土壤固定态铵含量, 但其增幅大小受施肥量的多少和施肥种类影响, 其中以 CF 处理的土壤固铵量最大 (98.61 mg kg^{-1}), 且显著高于 RCF 和 RCF + OM 处理 (固铵量分别为 84.76 mg kg^{-1} 和 77.34 mg kg^{-1}), 表明与有机肥相比较, 化肥增加土壤固定态铵含量的效果更优。

参考文献:

- [1] 陈 森, 李 玮, 陈 歆, 等. 菜地土壤氮素迁移转化研究进展[J]. 中国瓜菜, 2017, 30(8): 1-6.
- [2] 黄绍文, 王玉军, 金继运, 等. 我国主要菜区土壤盐分、酸碱性 and 肥力状况[J]. 植物营养肥料学报, 2011, 17(4): 906-918.
- [3] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 2009, 106: 3041-3046.
- [4] Silva J A, Bremner J M. Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soils: 5. Fixed ammonium[J]. *Soil Science Society of America*, 1966, 30: 587-593.
- [5] Pan F F, Yu W T, Ma Q, et al. Influence of ^{15}N -labeled ammonium

- sulfate and straw on nitrogen retention and supply in different fertility soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, 53: 303 – 313.
- [6] Ma Q, Wu Z J, Pan F F, et al. Effect of glucose addition on the fate of urea-¹⁵N in fixed ammonium and soil microbial biomass N pools[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2016, 75: 168 – 173.
- [7] Pan F F, Yu W T, Ma Q, et al. Do organic amendments improve the synchronism between soil N supply and wheat demand?[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 125: 184 – 191.
- [8] Wen Q X, Cheng L L, Zhang X H. Fixed ammonium contents and NH₄⁺ fixation capacities of some cultivated soils in China[J]. *Pedosphere*, 1995, 5: 315 – 323.
- [9] Cavalli D, Consolati G, Marino P, et al. Measurement and simulation of soluble, exchangeable, and non-exchangeable ammonium in three soils[J]. *Geoderma*, 2015, 259: 116 – 125.
- [10] 范绍博, 马 强, 姜春明, 等. 不同施肥制度对土壤固定态铵含量的影响[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(5): 1212 – 1218.
- [11] 张泽慧, 吴 帅, 翟 成, 等. 耕作措施与不同秸秆还田方式对黑土物理指标及固定态铵的影响[J]. *玉米科学*, 2019, 27(3): 102 – 107.
- [12] 段鹏鹏, 张玉玲, 丛耀辉, 等. 氮肥与有机肥配施协调土壤固定态铵与可溶性氮的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(6): 1578 – 1585.
- [13] 高新昊, 张英鹏, 刘兆辉, 等. 种植年限对寿光设施大棚土壤生态环境的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(5): 1452 – 1459.
- [14] 刘建霞, 马 理, 李博文, 等. 不同种植年限黄瓜温室土壤理化性质的变化规律[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(5): 164 – 168.
- [15] 李成芳, 曹凑贵, 潘圣刚, 等. 稻鸭共作生态系统稻田土壤固定态铵含量及有效性[J]. *生态学报*, 2008, 28(6): 2729 – 2737.
- [16] Beuters P, Scherer H W, Spott O, et al. Impact of potassium on plant uptake of non-exchangeable NH₄⁺-N[J]. *Plant and Soil*, 2015, 387: 37 – 47.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [18] Roing K, Andren O, Mattsson L. 'Non-exchangeable' ammonium in soils from Swedish long-term agricultural experiments: Mobilization and effects of fertilizer application[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science*, 2006, 56: 197 – 205.
- [19] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦生长期土壤固定态铵与微生物氮的动态研究[J]. *中国生态农业学报*, 2004, 12(1): 95 – 96.
- [20] 韩晓日, 郭鹏程, 陈恩凤, 等. 长期施肥对土壤固定态铵含量及其有效性影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(1): 29 – 36.
- [21] Elmaci Ö L, Secer M, Erdemir O, et al. Ammonium fixation properties of some arable soils from the Aegean region of Turkey[J]. *European Journal of Agronomy*, 2002, 17: 199 – 208.
- [22] 张杨珠, 黄顺红, 万大娟, 等. 湖南主要耕地土壤的固定态铵含量与最大固铵容量[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(9): 1836 – 1845.
- [23] 张杨珠, 万大娟, 黄顺红, 等. 湖南几种耕地土壤固定添加铵的动力学研究[J]. *土壤学报*, 2007, 44(2): 258 – 265.
- [24] 樊小林, 张一平, 李 玲. 壤土固定铵动力学的研究[J]. *西北农业大学学报*, 1994, 22(3): 87 – 91.
- [25] 顾敏京, 左文刚, 严漪云, 等. 氮肥管理对秸秆全量还田双季晚稻土壤固定态铵的影响[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2017, 38(2): 69 – 74 + 81.
- [26] Said-Pullicino D, Cucu M A, Sodano M, et al. Nitrogen immobilization in paddy soils as affected by redox conditions and rice straw incorporation[J]. *Geoderma*, 2014, 228: 44 – 53.
- [27] Chen B Q, Liu E K, Tian Q Z, et al. Soil nitrogen dynamics and crop residues. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2016, 34: 429 – 442.
- [28] Gentile R, Vanlauwe B, van Kessel C, et al. Managing N availability and losses by combining fertilizer-N with different quality residues in Kenya[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 131: 308 – 314.
- [29] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 尿素配施有机物料时土壤不同氮素形态的动态及利用[J]. *中国农业大学学报*, 2002, 7(3): 52 – 56.
- [30] 李传章. 不同有机肥分解转化特性及土壤培肥效果的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
- [31] Zhang W Z, Chen X Q, Zhou J M, et al. Influence of humic acid on interaction of ammonium and potassium ions on clay minerals[J]. *Pedosphere*, 2013, 23: 493 – 502.
- [32] 彭英湘, 陈安磊, 黄 威, 等. 长期施肥对红壤稻田土壤固定态铵的影响[J]. *农业现代化研究*, 2013, 34(3): 376 – 380.
- [33] Nieder R, Benbi D K, Scherer H W. Fixation and defixation of ammonium in soils: a review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(1): 1 – 14.
- [34] Scherer H W, Feils E, Beuters P. Ammonium fixation and release by clay minerals as influenced by potassium[J]. *Plant Soil and Environment*, 2014, 7: 325 – 331.
- [35] 王学霞, 陈延华, 王甲辰, 等. 设施菜地种植年限对土壤理化性质和生物学特征的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1619 – 1629.

Effects of Exogenous Nitrogen Additions on Soil Fixed Ammonium Content in Protected Vegetable Fields with Different Planting Years

PAN Fei-fei^{1,2}, TANG Jiao³, ZHANG Wei-hao¹, CHEN Bi-hua^{1,2},
WANG Guang-yin^{1,2}, LI Xin-zheng^{1,2}

(1. School of Horticulture and Landscape Architecture, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China;
2. Henan Province Engineering Research Center of Horticultural Plant Resource Utilization and Germplasm Enhancement,
Xinxiang 453003, China; 3. School of Resources and Environment, Henan Institute of Science and
Technology, Xinxiang 453003, China)

Abstract: The effects of exogenous nitrogen additions on soil fixed ammonium content and amount of maximum ammonium fixation were needed to clarify in protected vegetable fields with different planting years. Four protected vegetable fields with different planting years (0, 2, 13 and 21 years) were selected for a 36-day incubation experiment. Four fertilization treatments (CK: control without any N fertilizer applied; CF: Conventional N application, i.e. N 374 mg kg⁻¹ dry soil, provided by urea. RCF: reduced N application (a 46% reduction), i.e., N 200 mg kg⁻¹ dry soil, provided by urea; RCF + OM: 25% of the urea N was replaced by chicken manure on the basis of reduced N application) were set for each planting year to measure soil fixed ammonium content and to calculate the amount of maximum ammonium fixation. Fixed ammonium content in soil increased gradually with the increasing planting years of protected vegetables, but the amount of maximum ammonium fixation decreased. Under the same planting year, soil fixed ammonium content under different fertilization treatments ranged as CK < RCF + OM < RCF < CF, indicating that fertilization had an increasing effect on soil fixed ammonium, but the effect was influenced by the amount and type of N fertilization. Soil fixed ammonium content under CF treatment was the largest (98.61 mg kg⁻¹), significantly higher than that in RCF and RCF + OM treatments. The amount of ammonium fixation in RCF treatment (84.76 mg kg⁻¹) was larger than that in RCF + OM treatment (77.34 mg kg⁻¹). Soil fixed ammonium content increased with increasing N fertilization rate in protected vegetable fields, and the effect of chemical fertilizer is better than that of organic fertilizer.

Key words: Exogenous nitrogen additions; Planting year; Protected vegetables; Fixed ammonium; Amount of maximum ammonium fixation

[责任编辑: 张玉玲]