

# 氮肥与有机肥配施对设施土壤净矿化氮动态变化的影响

方胜志, 高佳蕊, 王虹桥, 刘 杰, 虞 娜, 张玉玲\*

(沈阳农业大学土地与环境学院/农业农村部东北耕地保育重点实验室/土壤资源高效利用国家工程实验室, 辽宁 沈阳 110866)

**摘 要:** 研究设施栽培条件下氮肥与有机肥配施对土壤净矿化氮含量及其速率的动态变化的影响, 以评估净矿化氮在设施土壤供氮能力方面的作用, 为设施番茄生产的合理施肥提供重要的理论依据。以设施番茄栽培连续 7 年定位施肥田间试验为依托, 选择不同施氮量 (N0、N1、N2、N3) 和不同氮量配施有机肥 (MN0、MN1、MN2、MN3) 8 个处理土壤, 采用室内连续好氧培养方法, 研究了各施肥处理土壤净矿化氮含量及净氮矿化速率, 分析了土壤净矿化氮含量与可溶性有机氮、微生物量氮含量之间的联系。研究表明: 在 0~20 cm 土层, 氮肥与有机肥配施处理土壤全氮和无机氮含量均显著高于单施氮肥处理 ( $P < 0.05$ ), 施氮量对土壤全氮含量无显著影响, 但对土壤无机氮含量则有显著影响, 随施氮量的增加呈显著增加趋势。在培养过程中, 各处理土壤净矿化氮含量随着培养时间延长呈先逐渐增加而后下降趋势, 各处理土壤净矿化速率在培养 7 d 时最大, 7~70 d 期间快速下降, 70 d 后呈缓慢下降趋势, 氮肥与有机肥配施处理土壤净矿化氮量和净氮矿化速率均显著高于单施氮肥处理 ( $P < 0.05$ ), 氮肥与有机肥配施处理土壤净矿化氮含量和净氮矿化速率随施氮量增加呈下降趋势; 与单施氮肥相比, 氮肥与有机肥配施显著提高土壤可溶性有机氮与微生物量氮含量 ( $P < 0.05$ ), 但受施氮量影响不显著; 土壤净矿化氮含量与可溶性有机氮、微生物量氮之间有密切联系, 但与可溶性有机氮之间的密切程度更大。综合来看, MN1、MN2 处理可显著提高土壤供氮能力 (无机氮 + 净矿化氮)。在设施番茄栽培条件下, 连续 7 年氮肥与有机肥配施可显著提高设施土壤供氮能力, 也可较好地协调设施土壤氮素供应与固持的关系。

**关键词:** 净矿化氮; 可溶性有机氮; 微生物量氮; 氮肥与有机肥配施; 设施土壤

**中图分类号:** S153 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2021)05-1173-09

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2021031402

方胜志, 高佳蕊, 王虹桥, 刘 杰, 虞 娜, 张玉玲. 氮肥与有机肥配施对设施土壤净矿化氮动态变化的影响 [J]. 土壤通报, 2021, 52(5): 1173 - 1181

FANG Sheng-zhi, GAO Jia-ru, WANG Hong-qiao, LIU Jie, YU Na, ZHANG Yu-ling. Effects of Combined Application of Nitrogen Fertilizer and Manure on the Dynamics of Net Mineralized Nitrogen in Greenhouse Soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(5): 1173 - 1181

中国设施蔬菜栽培种植规模迅速发展, 日光温室已发展成为北方蔬菜栽培的主要形式。但设施栽培在持续一定年限后, 土壤质量问题日益突出, 极大地影响了蔬菜的产量和品质<sup>[1]</sup>。当前设施栽培生产中过量施肥, 尤其过量施用氮肥现象尤为严重, 导致土壤氮磷钾速效养分的不断积累, 引起设施土壤养分严重不平衡、氮素等积累现象非常明显<sup>[2]</sup>。设施栽培处于封闭或半封闭状态, 土壤经常处于高温、高湿、高蒸发、无雨水淋洗的环境, 土壤生态环境变化导致了土壤物理、化学和生物学性质恶化而不利于作物生长<sup>[3-4]</sup>。因此, 开展设施蔬菜栽培不同施氮量及氮肥与有机肥配施下设施土壤有机氮矿化的

研究, 为设施土壤蔬菜生产的科学合理施肥提供重要参考。土壤有机氮主要存在于土壤有机质中, 土壤有机质矿化是氮素形态转化、为作物生长提供有效态氮素的重要过程, 是作物吸收的主要氮源<sup>[5]</sup>。土壤有机氮约占土壤中全氮 90% 以上, 其中大部分有机氮通过矿化作用成为无机氮供植物利用, 只有小部分有机氮可直接为植物所吸收, 土壤有机氮形态、结构和有效性对土壤氮素矿化、固持以及供氮潜力具有重要意义。土壤中氮素的转化速率决定了土壤氮素的供应能力, 进而决定了作物对土壤中氮素营养的利用吸收能力, 直接影响作物产量和品质。设施土壤中有机氮占全氮的比例根据水肥条件不同变

收稿日期: 2021-03-14; 修订日期: 2021-05-27

基金项目: 国家科技支撑计划项目子课题 (2015BAD23B01-6) 资助

作者简介: 方胜志 (1996-), 男, 吉林辽源人, 硕士研究生, 主要从事土壤改良与土壤肥力方面研究。E-mail: 29800229@qq.com

\*通讯作者: E-mail: zhangyuling@syau.edu.cn

化很大<sup>[6-7]</sup>。土壤中氮素的转化是受施肥因素的影响较大,长期连续定位施肥会造成土壤环境的变化,进而影响氮素在土壤中转化速率<sup>[8]</sup>。增施氮肥可以提升土壤氮素净氮矿化速率,但施氮量过多则会抑制土壤有机氮矿化<sup>[9-11]</sup>。氮肥与有机肥配施能够更好的协调土壤中的氮素供应<sup>[12-13]</sup>,也是保持土壤氮素储量的良好方法<sup>[14-16]</sup>。关于旱田、水田土壤氮素循环与转化方面研究较多,而有关设施栽培特殊气候特点条件下,土壤氮素循环与转化方面的研究相对薄弱,设施土壤有机氮矿化与转化方面还缺乏深入系统的研究。本研究以设施番茄栽培条件下连续 7 年定位施肥田间试验土壤为研究对象,研究氮肥与有机肥配施对设施土壤净矿化氮动态变化的影响,探讨设施土壤净矿化氮与可溶性有机氮、微生物量氮的联系及氮素转化规律,研究结果为设施土壤合理施用

提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地基本概况

试验地为沈阳农业大学设施生产试验基地,试验基地于 2012 年建成,常年使用塑料棚膜覆盖。试验地 2012 年开始建成使用,新建大棚土壤肥力低,2012 年和 2013 年在春季整地时施入等量腐熟牛粪(22.5 t hm<sup>-2</sup>,鲜重;以干基计,有机碳 189.6 g kg<sup>-1</sup>、全氮 18.4 g kg<sup>-1</sup>,C/N 为 10.3)和腐熟鸡粪(37.5 t hm<sup>-2</sup>,鲜重;以干基计,有机质 217.0 g kg<sup>-1</sup>、全氮 31.0 g kg<sup>-1</sup>,C/N 为 7.0,铵态氮 5.7 mg kg<sup>-1</sup>、硝态氮 3.3 mg kg<sup>-1</sup>)进行土壤培肥。试验地土壤类型为棕壤。2012 年春季整地前土壤基本理化性质见表 1。

表 1 2012 年试验之前土壤理化性质  
Table 1 Physicochemical properties of the tested soil in 2012 before the experiment design

土层 Soil layer (cm)	有机质 Organic matter (g kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total N (g kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 Alkaline N (mg kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total P (g kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Available P (mg kg <sup>-1</sup> )	全钾 Total K (g kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available K (mg kg <sup>-1</sup> )	pH	容重 Soil bulk density (g cm <sup>-3</sup> )
0~10	25.2	2.1	58.5	0.8	13.5	19.3	29.7	7.1	1.3
10~20	8.4	1.2	53.2	0.7	11.3	18.5	42.5	7.0	1.6
20~40	9.8	1.5	34.2	0.4	8.5	18.6	35.5	7.0	1.8
40~60	12.0	1.5	26.6	0.3	9.2	17.2	63.3	7.0	1.9

### 1.2 定位施肥试验设计

设施番茄栽培定位施肥田间试验于 2013 年开始连续实施,结合当地设施番茄生产中肥料用量的调查结果和本课题组的前期研究结果,确定田间试验的有机肥用量和化学氮、磷和钾素用量。本研究选择 8 个处理,分别为 N0、N1、N2、N3、MN0、MN1、MN2、MN3。其中 N0、N1、N2、N3 为施氮处理,施氮量分别为 0、187.5、375.0 和 562.5 kg hm<sup>-2</sup>;MN0、MN1、MN2 和 MN3 为氮肥与有机肥配施处理,有机肥(鸡粪)施用量相同,为 75000 kg hm<sup>-2</sup>,其养分含量与前面施用有机肥的养分含量大致相同,N0、N1、N2 和 N3 处理施氮量与前面相同。8 个处理均施用等量磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>为 225.0 kg hm<sup>-2</sup>)和钾肥(K<sub>2</sub>O 为 450.0 kg hm<sup>-2</sup>)。各处理每年有机肥和氮、磷、钾素用量相同。有机肥作为基肥均匀撒施地表,随后人为耕翻约 15~20 cm,全部磷肥、1/3 氮肥和 1/3 钾肥作为底肥施入,2/3 氮肥和 2/3 钾肥分别于第一穗果和第二(三)穗果膨大期分 2 次进行滴灌追施,每次追施量相同。各处理随机排列,每一处理 3 次重复。各处理间用 60 cm 深塑料薄膜隔开,每一

处理小区面积 3.8 m<sup>2</sup>。每年栽培作物为春茬番茄。

本研究采用连续 7 年定位施肥田间试验土壤样品。土壤样本于 2019 年 9 月初进行采集,各小区随机布设 5 点,同一土层 5 点取样混合为一个样品,取样深度为 0~10 cm、10~20 cm。采集的土壤样品经过风干、研磨、过 60 目和 10 目筛后备用。

### 1.3 室内好氧培养试验

称取 30 g 供试土壤(以干土计,过 10 目筛)放入 50 ml 广口培养瓶中,用滴管均匀加入蒸馏水将土壤含水量调至 80% 田间持水量,用专用透气膜封口后置于 30 °C 恒温箱中暗箱培养,每隔 3 d 补充水分。每一样本均为 3 次重复。在培养试验的 7、14、28、49、70、91、112、140、196 d 取样,均为破坏性取样。每次取样时,相当于 10 g 干土的鲜土样本采用 0.5 mol L<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液浸提(液:土为 4:1),其中 5 ml 浸提液用碱性过硫酸钾氧化,浸提液和氧化后溶液均采用 AA3 自动分析仪(Seal Analytical, USA)测定土壤无机氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)和可溶性总氮,可溶性总氮与无机氮的差值则为土壤可溶性有机氮;相当于 10 g 干土的鲜土样本采用氯仿熏

蒸, 0.5 mol L<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液浸提 (液: 土为 4: 1), 其中 5 ml 浸提液用碱性过硫酸钾氧化, 采用 AA3 自动分析仪测定可溶性总氮, 同一样本熏蒸与未熏蒸测定的可溶性总氮的差值即为土壤微生物量氮, 校正系数为 0.45<sup>[17]</sup>。培养试验前土壤样本采用元素分析仪 (Elementar Vario EL III, Germany) 测定土壤全氮含量, 采用 0.5 mol L<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液浸提, AA3 流动分析仪测定土壤无机氮 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)。

$$\text{土壤净矿化氮}(\text{mg kg}^{-1}) = N_t - N_{in}$$

$$\text{土壤净氮矿化速率}(\text{mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}) = [N_t - N_{in}] / t$$

式中,  $N_t$  为取样时间  $t$  时土壤矿化氮 ( $\text{mg kg}^{-1}$ );  $N_{in}$  为培养前土样的无机氮;  $t$  为培养时间 (d)。

#### 1.4 统计分析

采用 Origin Pro 2017 软件绘图, 使用 SPSS13.0 软件进行单因素和双因素方差分析, 采用 Pearson 法相关性分析。数据为 3 次重复的平均值  $\pm$  标准误。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理土壤全氮和无机氮含量

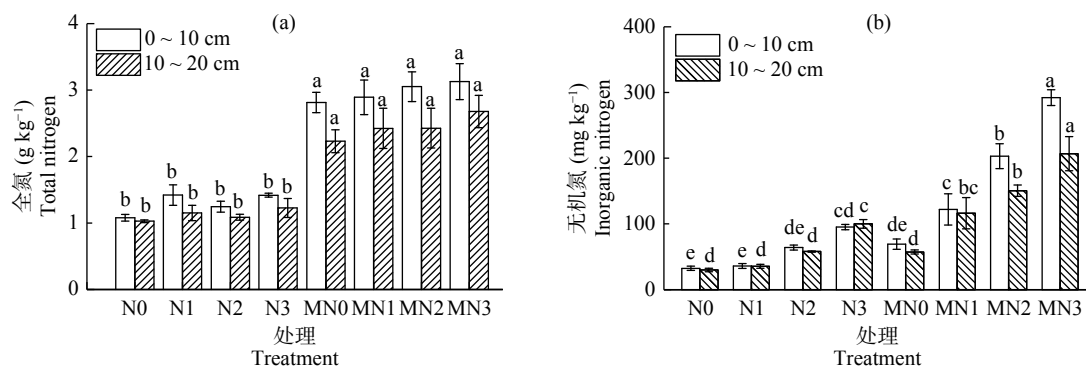
不同处理土壤在培养试验前, 在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层, 单施有机肥 (MN0)、氮肥与有机肥配施处理土壤全氮和无机氮含量均显著高于单施氮肥处理 ( $P < 0.05$ ), 施氮量对土壤全氮含量无显著影响, 但对土壤无机氮含量则有显著影响, 随施氮量的增加呈明显增加趋势; 总体上, 同一处理土壤全氮和无机氮含量在两个土层间变化不显著, 但表层含量略有增加 (图 1)。单施氮肥处理土壤全氮和初始无机氮含量分别为 1.05~1.42 g kg<sup>-1</sup> 和 29.84~99.98 mg kg<sup>-1</sup>; 而单施有机肥、氮肥与有机肥配施处

理土壤全氮和无机氮含量分别为 2.28~3.13 g kg<sup>-1</sup> 和 57.28~292.06 mg kg<sup>-1</sup>, 与单施氮处理相比, 氮肥与有机肥配施处理全氮含量提高了 103.75%~160.87%, 无机氮含量提高了 91.93%~240.24%, 均以 MN3 处理提高幅度最大。这一结果表明, 有机肥施用是土壤全氮含量提升的重要原因, 而不同施氮量及其与有机肥配施是影响土壤无机氮含量的重要因素。

### 2.2 不同处理土壤净矿化氮含量及其净氮矿化速率的动态变化

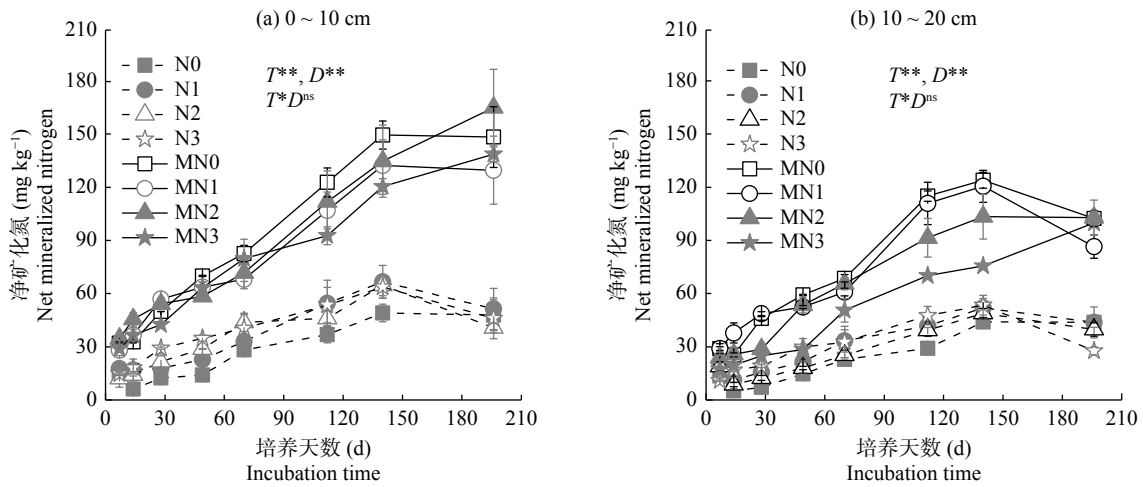
土壤矿化氮主要包括铵态氮和硝态氮, 本研究中各处理土壤矿化氮含量在培养初期 (0~7 d) 土壤铵态氮含量约占土壤净矿化氮的 22%~56%, 7 d 后迅速下降, 则均以硝态氮为主。在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层, 各处理土壤净矿化氮量随着培养时间延长呈逐渐增加而后下降趋势; 施肥处理、取样时间对土壤净矿化氮影响显著 ( $P < 0.05$ ), 单施有机肥、氮肥与有机肥配施处理土壤净矿化氮量均显著高于单施氮肥处理, 各施肥处理在培养 140 d 期间均呈明显增加, 之后略有下降; 施氮量对土壤净氮矿化量也无显著影响, 随施氮量的增加, 氮肥与有机肥配施土壤净矿化氮数量呈逐渐下降趋势 (图 2)。总体上, 单施有机肥、氮肥与有机肥配施可显著提高土壤净矿化氮数量, 0~10 cm 土层土壤净矿化氮要明显高于 10~20 cm 土层。

在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层, 各处理土壤净氮矿化速率在培养 7 d 时最大, 7~70 d 期间快速下降, 70 d 后缓慢下降趋势, 单施有机肥、氮肥与有机肥配施处理土壤净氮矿化速率要显著高于单施氮肥处理 ( $P < 0.05$ ); 施肥处理与取样时间对土壤净氮矿化速率影响显著 ( $P < 0.05$ ); 施氮量对土壤净



注: 不同字母表示相同土层、不同处理间差异达 0.05 水平显著; 其中 N0、N1、N2、N3 为施氮处理, 施氮量分别为 0、187.5、375.0 和 562.5 kg hm<sup>-2</sup>; MN0、MN1、MN2 和 MN3 为氮肥与有机肥配施处理, 有机肥 (鸡粪) 施用量相同, 为 75000 kg hm<sup>-2</sup>。下同。

图 1 土壤全氮和无机氮含量  
Fig.1 The contents of soil total nitrogen and inorganic nitrogen



注:\*, \*\*, <sup>ns</sup> 分别表示 0.05, 0.01 水平显著和不显著; T 表示处理, D 表示培养天数。下同。

图 2 土壤净矿化氮含量的动态变化

Fig.2 Dynamic changes of soil net mineralized nitrogen content

氮矿化速率影响不显著, 但单施有机肥、氮肥与有机肥配施土壤净氮矿化速率随施氮量增加呈下降趋势 (图 3)。

总体上, 单施有机肥、氮肥与有机肥配施可显著提高土壤净矿化氮数量及净氮矿化速率, 以 0~10 cm 土层提高幅度更为明显 (图 2 和图 3)。

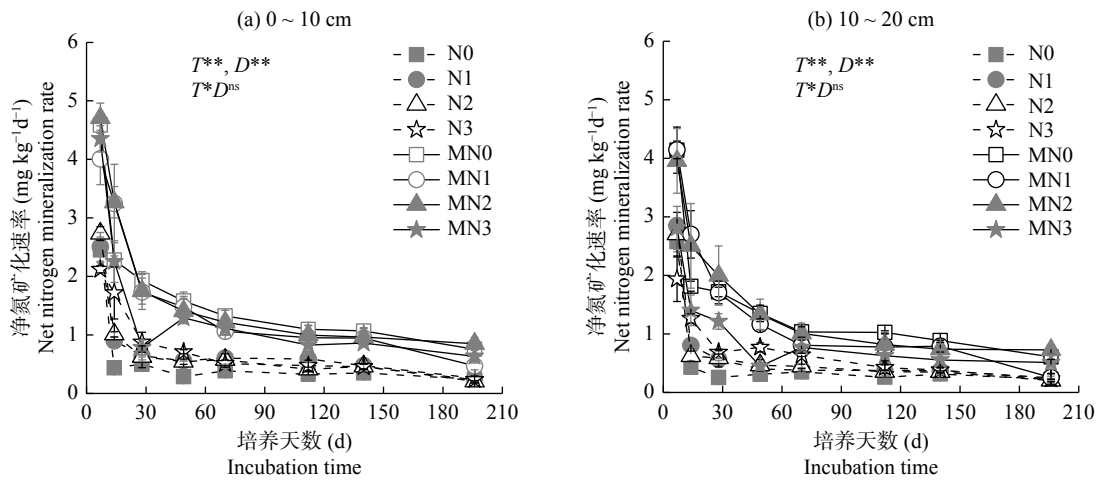


图 3 土壤净氮矿化速率的动态变化

Fig.3 Dynamic changes of soil net nitrogen mineralization rate

### 2.3 不同处理土壤可溶性有机氮和微生物量氮含量的动态变化

**2.3.1 土壤可溶性有机氮含量** 在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层, 各施肥处理土壤可溶性有机氮含量均呈现波动趋势, 单施氮肥处理波动较小, 单施有机肥、氮肥与有机肥配施处理波动较大; 施肥处理与取样时间均显著影响土壤可溶性有机氮含量 ( $P < 0.05$ ); 氮肥与有机肥配施 3 个处理土壤可溶性有机氮含量显著高于单施有机肥 (MN0) 和施氮处理, 单施氮肥处理中, 施氮量对土壤可溶性氮含量影响不显著 (图 4)。在 0~10 cm 土层, 单施氮肥处理和氮肥

与有机肥处理土壤可溶性有机氮含量分别为 0.84~42.17 mg kg<sup>-1</sup> 和 17.13~158.06 mg kg<sup>-1</sup>, N3 处理土壤可溶性有机氮含量最低, 显著低于 MN0 处理 ( $P < 0.05$ ), MN1 处理土壤可溶性有机氮含量最大, 但与 MN2、MN3 处理间无显著差异; 单施有机肥 (MN0) 处理波动性下降, 而 MN1、MN2 和 MN3 处理波动性上升 (图 4a)。在 10~20 cm 土层, 单施氮肥处理和氮肥与有机肥处理土壤可溶性有机氮含量分别为 0.45~39.25 mg kg<sup>-1</sup> 和 23.2~93.76 mg kg<sup>-1</sup>, 各处理土壤可溶性有机氮含量的差异与 0~10 cm 土层大致相同, MN0 和 MN3 处理波动性下降, 而

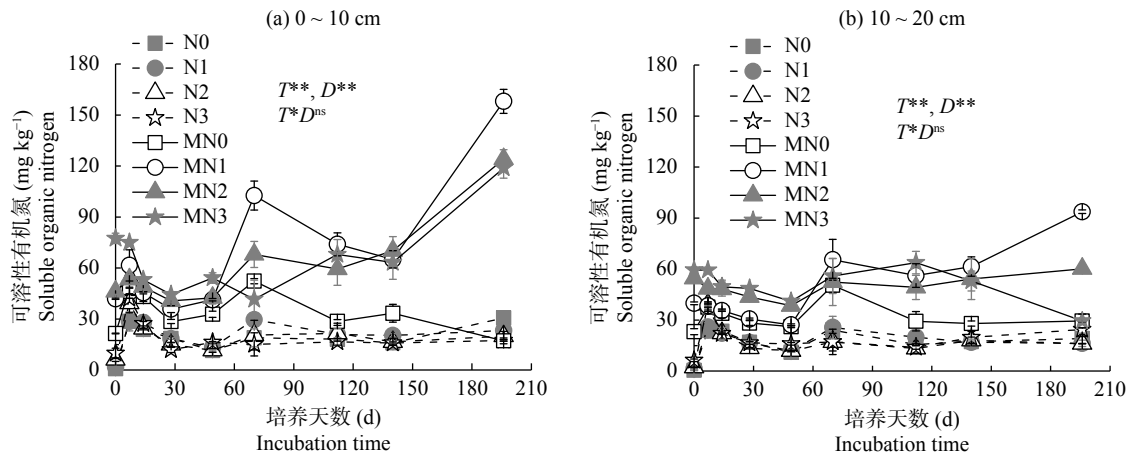


图 4 土壤可溶性有机氮含量的动态变化  
Fig.4 Dynamic changes of soil soluble organic nitrogen content

MN1 和 MN2 处理波动性上升 (图 4b)。总体来说, 单施有机肥、氮肥与有机肥配施土壤可溶性有机氮含量显著高于单施有机肥处理和单施氮肥处理, 有机肥施用显著提高了土壤可溶性有机氮含量, 但氮肥与有机肥配施提高土壤可溶性有机氮含量更为明显, 说明施用氮肥可促进有机肥的矿化分解, 进而提高土壤可溶性有机氮数量。

**2.3.2 土壤微生物氮含量** 在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层, 各施肥处理土壤微生物量氮含量也呈波动性变化, 施肥处理与取样时间显著影响土壤微生物量氮含量; 单施氮肥和氮肥与有机肥配施处理中, 施氮量对土壤微生物量氮含量影响不显著, 但总体上, 单施有机肥、氮肥与有机肥配施均可提高土壤微生物量氮含量, 且以 MN2 处理为最高, 各处理在培养 14 d 时土壤微生物量含量为最高 (图 5)。在 0~10 cm

土层, 单施氮肥处理和氮肥与有机肥处理土壤微生物量氮含量分别为 8.73 ~ 57.72 mg kg<sup>-1</sup> 和 17.43 ~ 99.11 mg kg<sup>-1</sup>, 在 10~20 cm 土层, 单施氮肥处理和氮肥与有机肥处理土壤微生物量氮含量分别为 7.19 ~ 38.88 mg kg<sup>-1</sup> 和 17.81 ~ 87.53 mg kg<sup>-1</sup>; 在培养 49 d 前, 0~10 cm 土层各处理土壤微生物量氮含量高于 10~20 cm 土层, 在培养 49 d 后, 0~10 cm 土层各处理土壤微生物量氮含量低于 10~20 cm 土层。

**2.4 土壤净矿化氮与可溶性有机氮、微生物量氮的相关性**

土壤有机态氮矿化过程是微生物及其酶参与的生物学过程, 在矿化过程中土壤氮素相互转化、相互影响。相关分析发现 (表 2), 在培养 49 d 前, 土壤净矿化氮与可溶性有机氮、微生物量氮之间具有显著相关性 ( $P < 0.01$ ); 而在培养 49 d 后, 土壤

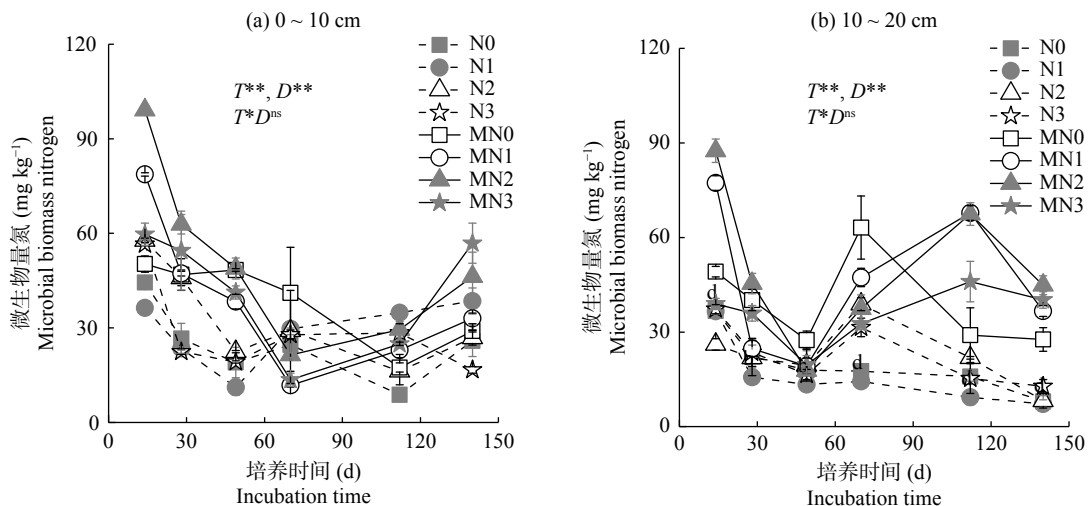


图 5 土壤微生物量氮含量的动态变化  
Fig.5 Dynamic changes of soil microbial biomass nitrogen content

表 2 土壤净矿化氮与可溶性有机氮、微生物量氮的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between soil net mineralized nitrogen and soluble organic nitrogen, microbial biomass nitrogen (MBN)

	0 ~ 49 d		70 ~ 140 d	
	可溶性有机氮 SON	微生物量氮 MBN	可溶性有机氮 SON	微生物量氮 MBN
矿质氮	0.566**	0.402**	0.523**	0.260

注: \*\*表示0.01水平显著。

净矿化氮与可溶性有机氮之间仍具有显著相关性 ( $P < 0.01$ ), 但与微生物量氮之间则无显著相关性 ( $P > 0.05$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 氮肥与有机肥配施对土壤净矿化氮与净氮矿化速率的影响

植物所需的氮素,除了来源于外源氮肥的投入,还来源于土壤有机氮矿化释放无机氮的供给,因此,维持土壤供氮能力及水平对于满足植株所需的氮素至关重要<sup>[13]</sup>,本文研究中,不同处理土壤矿化氮含量表现为 0 ~ 10 cm 土层高于 10 ~ 20 cm 土层(图 2),这与前人对设施土壤有机氮矿化的研究结果相一致<sup>[18-20]</sup>。这主要是由于施用的氮肥和有机氮主要施用于 0 ~ 20 cm,同时设施内无自然降水淋洗,滴灌单次灌水量少、且设施内的高温环境使土壤水分蒸发,从而使氮素向深层淋洗相对较少,易造成表层土壤氮素的累积。另外,本研究连续 7 年定位施肥,与未施氮肥处理(N0)相比,3 个用量氮肥处理土壤全氮及其净矿化氮和净氮矿化速率均有所增加,但增加不显著;与单施氮肥处理相比,单施有机肥(MN0)、氮肥与有机肥配施均显著提高了土壤全氮及其净矿化氮和净氮矿化速率,但施氮量对其影响并不显著(图 2 和图 3),这说明连续 7 年定位施肥,施用有机肥中所含有的较高氮素(18.4 g kg<sup>-1</sup>)是提升土壤全氮含量的重要因素,同时不同用量氮肥与有机肥配施已使土壤 C/N (MN0 > MN2 > MN1 > MN3)发生了明显变化,影响了设施土壤有机碳(氮)的品质<sup>[21]</sup>,进而影响了土壤有机氮的矿化数量及其速率;设施内氮肥与有机肥配施可增加土壤氮素的固定作用,加快了氮素的周转速率<sup>[22-23]</sup>。

本研究中,在培养前期(49 d),土壤净矿化速率较大,在培养 7 d 时最大且铵态氮比较高。这一方面是由于风干土样在进行水分调节后(80%田间持水量),土壤由干到湿处理会产生一些不稳定、极易矿化的氮素,同时适宜的水分和温度激活

了土壤中微生物和酶活性,促进了不稳定、极易矿化的氮素的矿化分解,这一过程以氨化作用为主,并产生了大量的铵态氮<sup>[24-25]</sup>;另一方面是由于风干过程中死亡的微生物会释放一些小分子有机化合物如氨基酸、甘油等,这些化合物很快会被存活的微生物矿化分解,进而对土壤有机氮矿化产生激发效应<sup>[26]</sup>。土壤中铵态氮含量高时,土壤中氨化微生物的酶促反应会被抑制,同时土壤中其他微生物会将氨化产生的铵态氮作为氮源进行微生物的繁殖,从而使铵态氮固定在微生物体内<sup>[27-28]</sup>;在氧气充足条件下,土壤中硝化细菌将氨化作用释放出的铵或氨氧化为硝酸盐,使土壤硝态氮含量增加<sup>[29]</sup>,本研究也证实了这一结论,即在培养 7 d 后,土壤中铵态含量减少,土壤硝态氮含量增加。

#### 3.2 氮肥与有机肥配施对设施土壤氮素转化的影响

土壤可溶性有机氮主要来源于有机质分解、土壤微生物代谢、根系分泌及肥料投入等<sup>[30]</sup>。土壤微生物量是土壤养分转化的促进者,也是土壤碳、氮、磷等元素循环利用和有机质矿化的主要驱动者<sup>[31]</sup>。Ros 等<sup>[32]</sup>研究表明,有机肥施用可以使土壤中的可溶性有机氮的含量增加 70%,本研究结果显示,氮肥与有机肥配施处理相比于单施化肥处理土壤可溶性有机氮增加了 40% ~ 150%。有机肥施用可以促进原生土壤有机质的矿化分解形成可溶性有机氮,同时有机肥中含有各类有机化合物,部分有机化合物在矿化分解过程可转化形成小分子的可溶有机氮;另外,有机肥施用增加了土壤氮、碳源,补充了大量的外源有机氮<sup>[19]</sup>;也可改善土壤理化性质,使土壤微生物数量增多、活性增强,进而促进了微生物量对土壤无机态氮的固持与有机氮的矿化<sup>[16,33]</sup>。本研究结果显示,氮肥与有机肥配施可以提高土壤可溶性有机氮和微生物量氮含量(图 4 和图 5),总体呈波动变化,这可能是因为在培养期间无外来氮源的补充,土壤矿化氮与可溶性有机氮和微生物量氮之间相互转化、相互影响的结果。

本研究中,在培养 49 d 前,土壤净矿化氮与可

溶性有机氮、微生物量氮之间密切相关,但在培养 49 d 后,土壤净矿化氮与可溶性有机氮之间仍有密切关系,而与微生物量氮无显著相关(表 2),这与段鹏鹏等<sup>[34]</sup>研究结果相同。可溶性有机氮是土壤有机态矿化过程和硝化过程的中间产物,是土壤净矿化氮的主要来源,微生物量氮则是土壤有机态氮或无机态氮固定的产物,影响土壤有机氮矿化过程的周转速率<sup>[35]</sup>,三者之间相互转化、相互影响。长期合理施用有机肥可以提高土壤氮素的矿化能力<sup>[34, 36-39]</sup>,氮肥与有机肥配施能够显著增加土壤中可溶性有机氮与微生物氮含量,增加土壤中不稳定氮库,增强氮素转化的矿化过程,为植物提供生长所需无机氮来源<sup>[15]</sup>。综合来看,本研究在设施番茄栽培条件下,连续 7 年氮肥与有机肥配施不仅可以提高土壤氮素总库容,而且也可较好地协调土壤供氮能力及固持能力,其中,187.5 kg hm<sup>-2</sup>、375.0 kg hm<sup>-2</sup> 氮肥和 75000 kg hm<sup>-2</sup> 有机肥配施(MN1、MN2)协调土壤氮素供应与固持的效果更好。

## 4 结论

连续 7 年定位施肥对设施土壤净矿化氮数量与净矿化速率及土壤可溶性有机氮、微生物量氮含量影响很大。与单施氮肥相比,氮肥与有机肥配施显著提高了土壤全氮和无机氮、净矿化氮与净氮矿化速率、可溶性有机氮、微生物量氮。土壤净矿化氮与可溶性有机氮、微生物氮密切相关,但与可溶性有机氮的之间更为密切。氮肥与有机肥配施可显著提高设施土壤供氮能力,也可较好地协调设施土壤氮素供应与固持的关系。

### 参考文献:

- [1] 汪俊玉,刘东阳,宋霄君,等.滴灌水肥一体化条件下番茄氮肥适宜用量探讨[J].*中国土壤与肥料*,2018,(6):98-103.
- [2] 尚双华.设施土壤氮素积累条件下番茄枯萎病发生的微生态机制研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2016.
- [3] 郭月.设施农业土壤质量退化问题及改良对策[J].*现代农业科技*,2017,(17):188-191.
- [4] 董环,娄春荣,袁幸福,等.秸秆还田方式对设施土壤盐分的影响[J].*北方园艺*,2015,(10):158-161.
- [5] 姬景红,张玉龙,张玉玲,等.灌溉方法对保护地土壤有机氮矿化特性的影响[J].*土壤学报*,2009,46(5):869-877.
- [6] Wu H Q, Du S Y, Zhang Z L, et al. Effects of irrigation and nitrogen fertilization on greenhouse soil organic nitrogen fractions and soil-soluble nitrogen pools[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 216: 415-424.
- [7] 伍玉鹏,邓婵娟,姜炎彬,等.长期施肥对水稻土有机氮组分及氮素矿化特性的影响[J].*农业环境科学学报*,2015,34(10):1958-1964.
- [8] Nett L, Aversch S, Ruppel S, et al. Does long-term farmyard manure fertilization affect short-term nitrogen mineralization from farmyard manure?[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, 46(2): 159-167.
- [9] 刘志梅,吴胜军,梁震,等.三峡库区消落带土壤氮矿化及影响因素研究进展[J].*中国农业科技导报*,2017,19(11):81-91.
- [10] 张树兰,杨学云,吕殿青,等.温度、水分及不同氮源对土壤硝化作用的影响[J].*生态学报*,2002,(12):2147-2153.
- [11] 栗方亮,李忠佩,刘明,等.氮素浓度和水分对水稻土硝化作用和微生物特性的影响[J].*中国生态农业学报*,2012,20(9):1113-1118.
- [12] Duan P P, Zhang Y L, Cong Y H, et al. The dynamics of soil-soluble nitrogen and soil-retained nitrogen in greenhouse soil[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica. Section B, Soil and Plant Science*, 2017, 67(1): 51-61.
- [13] Zhang X, Wang H, Hui X. Effects of different fertilization and fallowing practices on soil carbon and nitrogen mineralization in a dryland soil with low organic matter[J]. *Journal of Soil science and Plant Nutrition*, 2019, 19(1): 108-116.
- [14] Kaur J, Singh J P. Long-term effects of continuous cropping and different nutrient management practices on the distribution of organic nitrogen in soil under rice-wheat system[J]. *Plant Soil and Environment*, 2014, 60(2): 63-68.
- [15] 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.
- [16] He Y T, Zhang W J, Xu M G. Long-term combined chemical and manure fertilizations increase soil organic carbon and total nitrogen in aggregate fractions at three typical cropland soils in China[J]. *The Science of the Total Environment*, 2015, 532(1): 635-644.
- [17] Chen X F, Liu M, Kuzyakov Y, et al. Incorporation of rice straw carbon into dissolved organic matter and microbial biomass along a 100-year paddy soil chronosequence[J]. *Applied Soil Ecology: A Section of Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 130: 84-90.
- [18] 雷豪杰,李贵春,丁武汉,等.设施菜地土壤氮素运移及淋溶损失模拟评价[J].*中国生态农业学报*,2021,29(1):38-52.
- [19] 李超,严正娟,张经纬,等.粪肥施用对设施番茄产量和土壤氮磷累积的影响[J].*农业环境科学学报*,2014,33(8):1560-1568.
- [20] 沈灵凤,白玲玉,曾希柏,等.施肥对设施菜地土壤硝态氮累积及pH的影响[J].*农业环境科学学报*,2012,31(7):1350-1356.
- [21] 孙莹,侯玮,迟美静,等.氮肥与有机肥配施对设施土壤腐殖质组分的影响[J].*土壤学报*,2019,56(4):940-952.
- [22] 李世钰.长期施用有机肥对设施菜地土壤肥力及氮矿化的影

- 响[D]. 昆明: 云南大学, 2018.
- [ 23 ] 李 平, 郭 魏, 韩 洋, 等. 外源施氮对再生水灌溉设施土壤氮素矿化特征的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(10): 40 – 46.
- [ 24 ] 刘清. 采煤塌陷地土壤氮素矿化过程研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- [ 25 ] 李 源, 祝 惠, 阎百兴, 等. 干湿交替对黑土氮素转化及酶活性的影响研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(10): 140 – 144.
- [ 26 ] Harrison-Kirk T, Beare M H, Meenken E D, et al. Soil organic matter and texture affect responses to dry/wet cycles: Effects on carbon dioxide and nitrous oxide emissions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57: 43 – 55.
- [ 27 ] 刘春艳. 室内培养条件下南北方稻田土壤氮素矿化特征的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- [ 28 ] 金相灿, 崔 哲, 王圣瑞. 连续淹水培养条件下沉积物和土壤的氮素矿化过程[J]. *土壤通报*, 2006, 37(5): 909 – 915.
- [ 29 ] 杨蕊. 畜禽有机肥氮磷在红壤中的矿化、利用和环境风险研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
- [ 30 ] 张亚亚, 李 军, 郭 颖, 等. 土壤可溶性有机氮的研究进展[J]. 生态学杂志, 2016, 35(6): 1661 – 1669.
- [ 31 ] 吕 盛, 王子芳, 高 明, 等. 秸秆不同还田方式对紫色土微生物量碳, 氮, 磷及可溶性有机质的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 266 – 272.
- [ 32 ] Ros G H, Hoffland E, Kessel V, et al. Extractable and dissolved soil organic nitrogen-A quantitative assessment[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(6): 1029 – 1039.
- [ 33 ] 臧逸飞, 郝明德, 张丽琼, 等. 26年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1445 – 1451.
- [ 34 ] 段鹏鹏, 丛耀辉, 徐文静, 等. 氮肥与有机肥配施对设施土壤可溶性氮动态变化的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23): 4717 – 4727.
- [ 35 ] 李凤霞, 王长军. 土壤氮素转化及相关微生物过程研究[J]. *宁夏农林科技*, 2018, 59(4): 37 – 40.
- [ 36 ] 赵 伟, 梁 斌, 周建斌. 长期不同施肥处理对土壤氮素矿化特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 185 – 189.
- [ 37 ] 王乐云, 田飞飞, 能 惠, 等. 不同施肥处理对农田土壤有机氮组分及其矿化的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(4): 117 – 127.
- [ 38 ] 李 平, 郎 漫, 李煜珊, 等. 不同施肥处理对黑土硝化作用和矿化作用的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(7): 1326 – 1332.
- [ 39 ] 王 媛, 周建斌, 杨学云. 长期不同培肥处理对土壤有机氮组分及氮素矿化特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(6): 1173 – 1180.



## Effects of Combined Application of Nitrogen Fertilizer and Manure on the Dynamics of Net Mineralized Nitrogen in Greenhouse Soil

FANG Sheng-zhi, GAO Jia-rui, WANG Hong-qiao, LIU Jie, YU Na, ZHANG Yu-ling\*  
(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University/Key Laboratory of Cultivated Land Conservation in Northeast China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Shenyang 110866, China)

**Abstract:** To evaluate the role of net mineralized nitrogen (N) in the N supply capacity and provide theoretical basis for rational fertilization, the effect of combined application of N fertilizer and manure on the dynamic changes of net mineralized N content and net N mineralized rate were studied in greenhouse soil. A tomato field fertilization experiment with eight treatments of different N fertilizer (N0, N1, N2 and N3) combined with different manure (MN0, MN1, MN2 and MN3) was conducted for seven consecutive years in greenhouse. The net mineralized N and net N mineralization rate were measured under indoor aerobic cultivation method, followed by the analysis of the relationship between soil net mineralized N and soluble organic N (SON), microbial biomass N (MBN). The results showed that the contents of soil total N (TN) and inorganic N ( $N_{in}$ ) with combined application of N fertilizer and manure were significantly higher than that with single application of N fertilizer ( $P < 0.05$ ) in the 0-20 cm soil layer. The N application rate had no significant effect on TN, but it had significant effect on  $N_{in}$ , showing a significant increase trend with the increase of N application rate. The net mineralized N of each treatment increased gradually first and then decreased with the prolongation of incubation time. The soil net N mineralization rate of each treatment reached the maximum in the 7<sup>th</sup> day of incubation, and decreased rapidly during 7-70 days. After 70 days, it showed a slow decreasing trend. Soil net mineralized N and net N mineralization rate under the treatments of combined application of N fertilizer and manure were significantly higher than that of single application of N fertilizer ( $P < 0.05$ ), indicating a downward trend with the increase of N application rate. The treatments of combined application of N fertilizer and manure significantly increased the contents of SON and MBN compared with single application of N fertilizer ( $P < 0.05$ ), but there was no significant effect induced by N application. The net mineralized N was closely related to SON and MBN. In summary, the treatments of MN1 and MN2 could significantly increase soil N supply capacity (inorganic N + net mineralized N). Under the greenhouse conditions of tomato cultivation, the combined application N fertilizer and manure for seven consecutive years could significantly improve N supply capacity of greenhouse soil to better coordinate the soil N supply and immobilization.

**Key words:** Net mineralized nitrogen; Soluble organic nitrogen; Microbial biomass nitrogen; Combined application of nitrogen fertilizer and manure; Greenhouse soil

[ 责任编辑: 韩春兰 ]