

设施和露天栽培下有机菜地土壤氮素矿化和硝化作用的比较研究

过燕琴, 高志亮, 张 令, 秦艳梅, 刘树伟, 邹建文

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘 要:矿化作用和硝化作用是土壤氮素转化的主要途径,通过室内培养试验,对设施和露天栽培方式下有机菜地土壤氮素的矿化与硝化作用进行了比较研究。结果表明,除培养第 1 d 外,设施有机菜地土壤氮素矿化量、矿化率在整个培养期间都显著高于露天有机菜地土壤;设施有机菜地土壤硝化量、硝化率在培养前两周内高于露天有机菜地土壤;设施有机菜地土壤矿化与硝化作用总体比露天有机菜地土壤强烈。矿化作用可能与全氮、C/N、微生物活性关系密切,而硝化作用强弱可能与微生物活性有关。无论施肥与否,设施有机菜地土壤 N_2O 排放速率在培养期间总体高于露天有机菜地土壤,前者 N_2O 累积排放量显著高于后者,这可能与土壤 C/N 有关。

关键词:有机菜地土壤;设施栽培;氮素;矿化作用;硝化作用; N_2O 排放

中图分类号:X131.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)12-2436-07

Nitrogen Mineralization and Nitrification in Organic Vegetable Soils Under Greenhouse and Open-air Cultivation Systems

GUO Yan-qin, GAO Zhi-liang, ZHANG Ling, QIN Yan-mei, LIU Shu-wei, ZOU Jian-wen

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Organic agriculture has been developing rapidly in China in recent years. Organic vegetables are generally grown under greenhouse and open-air cultivation systems. These two cultivation systems may differ in soil nitrogen transformation processes such as mineralization and nitrification. However, the scientific literature regarding the nitrogen mineralization and nitrification in organic vegetable soils under greenhouse versus open-air cultivation systems is rare. A laboratory soil incubation experiment was conducted to compare nitrogen mineralization and nitrification in organic vegetable soils under greenhouse and open-air cultivation systems. The amount of mineralized nitrogen and the ratio of mineralized nitrogen to total nitrogen in greenhouse organic vegetable soils were significantly greater than those in open-air cultivation soils over the 28-day incubation period, except for the first day. Also, the amount of nitrified nitrogen and the ratio of nitrified nitrogen to mineralized nitrogen were greater in greenhouse organic vegetable soils than in open-air cultivation soils during the first two weeks of the incubation. Overall, the mineralization and nitrification were more intensive in greenhouse cultivated organic soils than in open-air cultivated soils. Greater nitrogen mineralization in greenhouse cultivated organic soils might be related to total nitrogen, C/N and microbial activity, while increased nitrification was probably attributed to microbial activity. With or without fertilization, the N_2O fluxes from greenhouse organic soils were higher than those from open-air organic soils, which might be related to C/N of the soils.

Keywords: organic vegetable soil; greenhouse cultivation; nitrogen; mineralization; nitrification; N_2O emission

随着我国经济发展和人民生活水平的提高,有机农业在我国迅速发展。截至 2007 年,我国有机农业生

产面积达到 160 万 hm^2 ,位居亚洲有机农业生产面积第一位^[1]。蔬菜生产面积也随着我国农业结构的调整不断扩大,至 2007 年,全国蔬菜生产面积达 2 250 万 hm^2 ,其中设施蔬菜面积为 292 万 hm^2 ,占全国蔬菜生产面积的 13%^[2]。设施菜地土壤与露天菜地土壤相比,环境条件存在明显差异。设施菜地土壤常处于半封闭状态,具有高温高湿、高蒸发量、无雨水淋洗等特

收稿日期:2010-06-21

基金项目:国家自然科学基金(40971140);高等学校博士点基金(200803071010);教育部优博专项基金(200969)

作者简介:过燕琴(1986—),女,江苏无锡人,硕士研究生,主要研究方向为农田碳氮循环与全球变化。E-mail:gyq1986.3@163.com

通讯作者:邹建文 E-mail:jwzou21@njau.edu.cn

点,经过长期耕作,其性状与露天土壤相比发生了很大的变化。

刘艳军等^[3]、周建斌等^[4]和魏迎春等^[5]研究表明,设施栽培土壤有机碳、全氮、硝态氮含量显著高于露天栽培土壤,并且有酸化趋势;王珊^[6]、袁亮^[7]研究显示,设施土壤微生物量碳、氮和酶活性均高于露天土壤。少数学者对设施和露天菜地土壤氮素矿化作用和硝化作用进行了研究。王艳杰^[8]通过对北京郊区保护地和露天土壤的培养试验,表明累积氮矿化量与土壤有机质、全氮、铵态氮、硝态氮正相关,保护地土壤的矿化能力高于露天土壤;殷永娴等^[9]的研究结果显示温室和大棚土壤中的亚硝化细菌和硝化细菌含量高于露天土壤,设施土壤具有强烈的硝化作用;张光亚等^[10]研究表明设施栽培土壤 N_2O 释放通量比露地栽培土壤高 1.41 倍。

上述研究结果都是基于常规农业生产方式,而有机农业与常规农业蔬菜生产在土壤资源利用、养分管理、肥料运筹及病虫害防治等方面显著不同。Liu 等^[11]研究显示有机土壤微生物量碳、氮和净矿化氮都显著高于常规土壤,有机生产比常规生产施入更多的有机碳来维持土壤中的有机质,促进了土壤微生物种群的增加和微生物呼吸作用的增强。Poudel 等^[12]研究表明有机土壤潜在矿化氮量高出常规土壤 112%。宋世威^[13]研究表明有机土壤中无机氮含量比常规土壤低 22.4%~36.8%,有机土壤的矿化势、矿化速率高于常规土壤,但硝化速率没有显著差异。

综上所述,以往对不同栽培方式菜地土壤养分特性和土壤过程的研究主要集中于常规栽培方式下设施和露天菜地的比较,或者有机和常规栽培方式下露天菜地的比较,然而,设施有机菜地土壤的矿化与硝化作用可能有别于露天有机菜地土壤,目前这方面的研究鲜见报道。本文以南京有机农场菜地土壤为研究对象,研究比较设施和露天栽培下有机菜地土壤氮素矿化作用、硝化作用的差异,为了解有机蔬菜生产中不同栽培方式(大棚和露天)对土壤氮素转化过程的影响提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤样品采自南京普朗克有机农场。普朗克有机农场位于溧水县永阳镇(118°34'~119°14' E, 31°23'~31°48' S),具有 8 a 有机种植历史。该基地为下蜀黄土母质发育而来的马肝土,耕层较厚。选择具有 2 a 设施有机栽培时间的菜地和邻近具有 4 a 露天有机栽培时间的菜地各一块,设施有机菜地上种植空心菜,露天有机菜地上种植菊花叶。于 2009 年 8 月蔬菜生长旺季,分别在两种菜地上多点采集 0~20 cm 耕层土壤,鲜土除去可见动植物残体,碾磨过 2 mm 筛,混匀,在 4 ℃ 条件下冷藏作为培养备用,培养前测定土壤微生物学特性。部分土壤样品自然风干,磨细过筛,测定基本理化性质。供试土壤的基本理化性质见表 1。

1.2 土壤培养^[14-16]

1.2.1 矿化试验

分别称取相当于 60 g 烘干土重的鲜土置于 24 个 250 mL 的三角瓶中,另有 3 个 250 mL 三角瓶固定用于采集气样,加蒸馏水至 40% WHC(最大持水量),用保鲜膜封口,扎上小孔,保持通气状态,在 25 ℃ 恒温恒湿培养箱中预培养 1 周,激活土壤微生物活性,每隔 3 d 调 1 次水分。预培养结束,随机选取 3 瓶,按液土比 2.5:1 加入 150 mL 2 mol·L⁻¹ KCl,振荡 1 h,过滤,测定土壤的 NH_4^+ 和 NO_3^- ,作为 0 d 的含量。将剩余的三角瓶调节水分含量至 65% WHC,分别在培养后的 1、3、5、8、14、21、28 d 随机选取 3 瓶,测定土壤的 NH_4^+ 和 NO_3^- ,培养期共 28 d。培养期内气样采集时间为培养后的 1、2、3、4、5、6、7、8、11、14、17、21、28 d,其中前 2 d 每日采集气样 2 次,分别在密闭后的 0 h 和 2 h 采集瓶内气样。

1.2.2 硝化试验

方法同矿化试验。预培养结束,随机选取 3 瓶土样,测定土壤的 NH_4^+ 和 NO_3^- ,作为 0 d 的含量,剩余的每瓶土样中加入 150 mgN·kg⁻¹ 硫酸铵溶液。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the studied soils

供试土壤	有机碳/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	C/N	pH	质地	铵态氮/mgN·kg ⁻¹	硝态氮/mgN·kg ⁻¹
GO	13.48	1.20	11.26	5.59	中壤土	6.36	20.08
OO	13.96	1.10	12.74	6.35	中壤土	5.87	11.82

注:GO 为设施有机菜地土壤;OO 为露天有机菜地土壤。下同。

Note: GO represents greenhouse organic vegetable soil; OO represents open-air organic vegetable soil. The same below.

1.3 样品分析^[17-19]

土壤 pH 值:pH 计测定;有机质:重铬酸钾容量法-外加热法;全氮:半微量开氏法;铵态氮:靛酚蓝比色法;硝态氮:紫外分光光度法;土壤微生物生物量碳:氯仿熏蒸浸提-容量分析法;土壤微生物生物量氮:氯仿熏蒸浸提-消煮、碱化蒸馏法;蔗糖酶:3,5-二硝基水杨酸比色法;脲酶:苯酚-次氯酸钠比色法;过氧化氢酶:高锰酸钾滴定法; N_2O :Agilent 7890A 气相色谱仪。

1.4 数据处理

1.4.1 矿化作用

土壤氮素矿化量为培养后与培养前土壤矿质氮量($[\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-]$)之差,记为 ΔM ;矿化率为某培养日内土壤氮素矿化量占全氮量的百分含量,记为 M_r 。公式如下:

$$\Delta M = [\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-]_t - [\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-]_{t_0}$$

$$M_r = (\Delta M / TN) \times 100\%$$

式中: ΔM 、 $[\text{NH}_4^+]$ 、 $[\text{NO}_3^-]$ 和 TN 单位为 $\text{mgN} \cdot \text{kg}^{-1}$; M_r 单位为%; t 为培养第 t d, t_0 为培养第 0 d。

1.4.2 硝化作用

土壤氮素硝化量为培养后与培养前土壤硝态氮量之差,记为 ΔN ;硝化率为某培养日内土壤硝态氮占矿质氮量的百分含量,记为 N_r 。公式如下:

$$\Delta N = [\text{NO}_3^-]_t - [\text{NO}_3^-]_{t_0}$$

$$N_r = ([\text{NO}_3^-]_t / [\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-]_t) \times 100\%$$

式中: ΔN 、 $[\text{NH}_4^+]$ 、 $[\text{NO}_3^-]$ 单位为 $\text{mgN} \cdot \text{kg}^{-1}$; N_r 单位为%; t 为培养第 t d, t_0 为培养第 0 d。

1.4.3 N_2O 的排放

N_2O 排放速率公式如下:

$$F = \rho \times dc/dt \times V \times 273 / (273 + T) / W$$

式中: F 为 N_2O 气体的排放速率, $\mu\text{g N}_2\text{O-N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$; ρ 为标准状态下 $\text{N}_2\text{O-N}$ 的密度,为 $1.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; dc/dt 为单位时间内培养瓶内气体浓度的增量, $\text{nL} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$; V 为培养瓶中气体的有效空间体积, m^3 ; W 为培养瓶内的烘干土重, kg ; T 为培养温度, $^\circ\text{C}$ 。

N_2O 累积排放量公式如下:

$$S = \sum (F_{i+1} + F_i) / 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 24$$

式中: S 为 N_2O 累积排放量, $\mu\text{gN}_2\text{O-N} \cdot \text{kg}^{-1}$; F_i 为气体的排放速率, $\mu\text{gN}_2\text{O-N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$; t_i 为取样时的培养天数。

1.5 统计分析

通过 Microsoft Excel 2003 软件处理数据和制图;采用 JMP 7.0 软件对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质和微生物学特性

由表 1 可知,设施和露天有机菜地土壤有机碳分别为 $13.48 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $13.96 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,方差分析表明两者没有显著性差异 ($P > 0.05$);而设施有机土壤全氮含量比露天有机土壤略高,全氮含量分别为 $1.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,方差分析表明两者具有显著性差异 ($P < 0.05$)。设施和露天有机土壤的 C/N 分别为 11.26 和 12.74,前者的 C/N 比低于后者。经过 2 a 的设施栽培,设施有机土壤 pH 比露天有机土壤降低了 0.76 个单位。设施和露天土壤硝态氮含量分别为 $20.08 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $11.82 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1}$,前者是后者的 1.7 倍,差异达到极显著水平 ($P < 0.01$)。

土壤微生物生物量是土壤养分的储库。由表 2 可见,设施和露天有机菜地土壤微生物生物量碳分别为 $129.72 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $125.67 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,两者没有显著差异;而两者土壤微生物生物量氮分别为 $34.11 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $26.29 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,设施有机土壤微生物量氮极显著高于露天有机土壤 ($P < 0.01$)。土壤酶也是土壤的重要组成部分,试验中设施有机土壤的过氧化氢酶、蔗糖酶和脲酶活性均显著高于露天有机土壤 ($P < 0.05$),前者比后者分别高出 1.82、1.77、1.29 倍。

2.2 土壤矿化作用

土壤氮素主要以有机态形式存在,难以被作物直接吸收,只有通过土壤微生物的矿化作用转化为无机氮后才可被植物吸收利用。因此,土壤氮素的矿化作用是供给作物所需养分的重要过程。

如图 1 所示,设施和露天有机菜地土壤的氮素矿

表 2 土壤微生物学特性

Table 2 Microbial characteristics of the soils

供试土壤	微生物生物量碳/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	微生物生物量氮/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	蔗糖酶/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	脲酶/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	过氧化氢酶/ $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$
GO	129.72±5.23	34.11±0.56**	125.35±0.78*	0.78±0.01*	4.01±0.11*
OO	125.67±5.31	26.29±2.39**	68.93±1.48*	0.44±0.06*	3.12±0.08*

注:*表示差异达显著水平, $P < 0.05$; **表示差异达极显著水平, $P < 0.01$ 。下同。

Note: * indicates significant difference at $P < 0.05$; ** indicates very significant difference at $P < 0.01$. The same below.

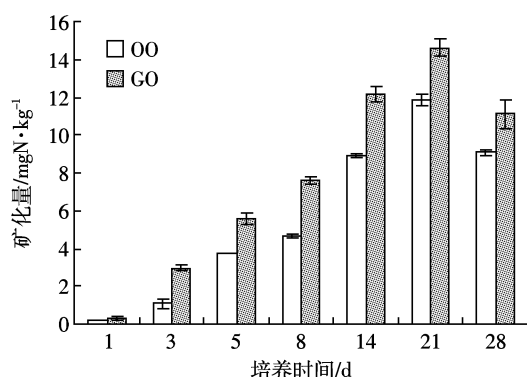


图 1 土壤氮素矿化量

Figure 1 The amount of mineralized nitrogen in the soils

化过程趋势一致,从培养初期到 21 d 时氮素矿化量不断增加,之后矿化量呈减少趋势。培养 4 周期间设施有机土壤的矿化量始终高于露天有机土壤,在第 21 d 时达到最大值,分别为 $14.63 \text{ mgN} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $11.86 \text{ mgN} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由图 2 可知,设施有机土壤的矿化率也始终高于露天有机土壤,第 21 d 时矿化率达到最大值,分别为 1.22% 和 1.08%,前者是后者的 1.13 倍。统计分析表明,除去培养第 1 d,设施有机土壤氮素矿化量和矿化率在整个培养期间都显著高于露天有机土壤 ($P < 0.05$)。采用零级反应方程 $y=kt$ 对在培养 21 d 期间土壤氮素矿化量的变化进行拟合,设施和露天有机土壤的表达式分别为

$$y=0.703t+1.099, R^2=0.953$$

$$y=0.594t-0.0943, R^2=0.981$$

试验结果表明,设施有机菜地土壤氮素的矿化作用比露天有机菜地土壤强烈。

2.3 土壤硝化作用

硝化作用是微生物将土壤中的铵态氮转化为硝态氮并从中获得所需能量的过程,它联系着矿化-生

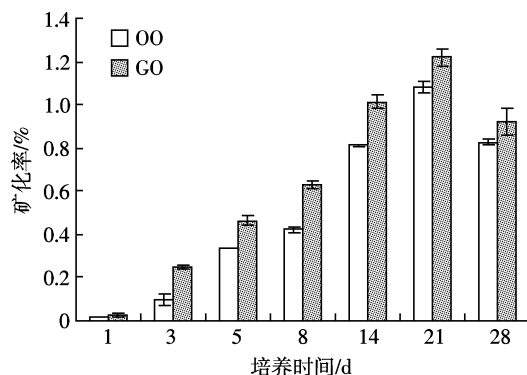


图 2 土壤氮素矿化率

Figure 2 The ratio of mineralized nitrogen to total nitrogen in the soils

物固持等作用以及氮素损失,是土壤氮素转化过程中的一个重要环节。

图 3 表明,两种土壤随着培养时间的延长,氮素硝化量不断增加,培养前两周内设施有机土壤硝化量高于露天有机土壤,在培养 5~14 d 内两者差异达到显著水平 ($P < 0.05$),其后两周内两者的硝化量接近。由图 4 可知,培养前两周内,设施有机土壤的硝化率极显著高于露天有机土壤 ($P < 0.01$),两种土壤硝化作用都进行得比较快,培养 14 d 时硝化率达 80% 以上,培养结束时两者硝化率分别达到 98.37% 和 98.99%。

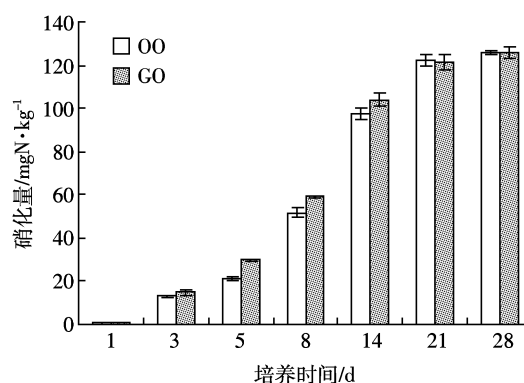


图 3 土壤氮素硝化量

Figure 3 The amount of nitrified nitrogen in the soils

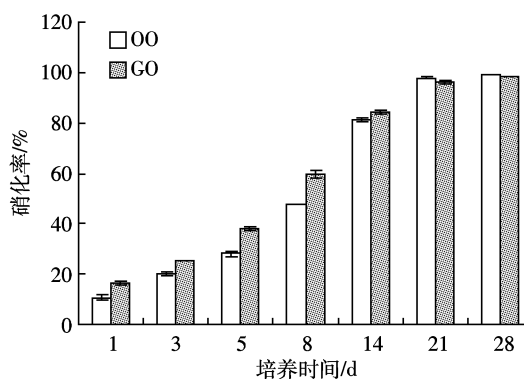


图 4 土壤氮素硝化率

Figure 4 The ratio of nitrified nitrogen to mineralized nitrogen in the soils

通过动力学方程 $y=K/(1+a \cdot \text{Exp}(-b \cdot t))$ 对土壤氮素硝化量进行拟合 (K 表示饱和硝化量, t 为培养时间, a, b 为常数),设施和露天有机土壤表达式分别为 $y=123.04/(1+20.26\text{Exp}(-0.36t)), R^2=0.995, P<0.001$ $y=124.47/(1+22.87\text{Exp}(-0.33t)), R^2=0.996, P<0.001$ 根据拟合方程,达到半饱和硝化量的时间分别为 8.36 d 和 9.48 d,此时硝化作用达到最大速率,分别为 $11.07 \text{ mgN} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $10.27 \text{ mgN} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。试验结果说明设施有机菜地土壤的硝化过程总体要比露天有

机菜地土壤快,能够更加快速释放矿质氮给植物提供养分。

2.4 土壤 N_2O 排放

硝化作用是产生 N_2O 的主要过程之一。从图 5 可以看出,两种土壤的 N_2O 排放速率随着时间变化明显不同。在不加氮肥的处理下,设施有机菜地土壤 N_2O 排放速率始终高于露天有机菜地土壤。在培养 2.5 d 时设施有机土壤出现 N_2O 排放速率峰值,为 $0.047 \mu g N_2O-N \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$,而露天有机土壤在整个培养期间 N_2O 排放速率都很平缓。在施用氮肥的处理下,设施有机土壤 N_2O 排放速率在培养期间总体上高于露天有机土壤。设施和露天有机土壤出现 N_2O 排放速率峰值的时间不同,分别在培养的第 6 d 和第 11 d,排放速率分别为 $0.31 \mu g N_2O-N \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$ 和 $0.24 \mu g N_2O-N \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$ 。由表 3 可知,无论施肥与否,设施

有机菜地土壤 N_2O 累积排放量都显著高于露天有机菜地土壤。两种土壤的 N_2O 累积排放量与土壤的硝化率呈极显著相关关系($y=1.042x-18.975, R^2=0.952$)。

3 讨论

国内对设施和露天栽培方式下常规菜地土壤理化性质研究比较多,结论大多认为设施土壤有机碳和全氮含量高于露天土壤^[3-4,20]。而本试验所涉及的有机菜地进行设施栽培的年限较短,并且设施菜地蔬菜生产活动远比露天菜地生产活动频繁,随着高产出带走的养分也多,所以设施和露天有机菜地土壤有机碳差异不显著。设施有机土壤硝态氮含量显著高于露天有机土壤,因为氮肥经硝化作用转化为 NO_3^- ,同时释放 H^+ ,设施大棚内缺乏降水淋洗,棚温和土温比露天菜地高,土壤水分蒸发强烈,导致设施土壤硝态氮的累积和 pH 下降^[21]。设施有机土壤除微生物生物量碳外,微生物生物量氮以及蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶活性都显著高于露天有机土壤,这可能是由于设施大棚高温高湿的环境增强了微生物活性。另外,由于设施栽培与露天栽培的轮作周期差异,蔬菜品种轮茬不一致,因此本试验采集的土壤是来自不同作物栽培下的土壤。不同作物的根系分泌物组成不同,有些根系分泌物能够使根际微生物的活性增加,直接活化或固定土壤中的各种养分^[22],所以本试验中设施与露天有机菜地土壤理化特性的差异亦可能部分来自于种植蔬菜品种的差异所致。

一般认为,土壤氮素矿化与硝化作用是两个紧密联系的过程,氮素矿化作用为硝化作用提供氮源,硝化作用又可以促进矿化作用的进程。设施有机菜地土壤的矿化作用与硝化作用总体比露天有机菜地土壤强烈,将两种土壤氮素硝化率与矿化率进行回归分析,发现它们之间存在极显著正相关关系($y=81.546x+10.038, R^2=0.9248$),硝化率随矿化率的增加而显著提高,这与金雪霞等^[16]、李辉信等^[23]研究结果一致。

金雪霞等^[16]、李辉信等^[23]研究发现土壤矿化率和硝化率与 pH 都显著正相关。Katyal 等^[24]认为在 pH 为 4.6~5.1 的土壤中硝化作用不明显,在 pH 为 5.8~6.0 的土壤中硝化作用进行缓慢,在 pH 为 6.4~8.3 的土壤中硝化作用才强烈进行。本试验土壤虽然为酸性土壤,但是两种土壤矿化率与硝化率都比较高,设施有机菜地土壤的矿化作用与硝化作用比露天有机菜地土壤强烈,这与上述学者的研究结论不符。因此,本试

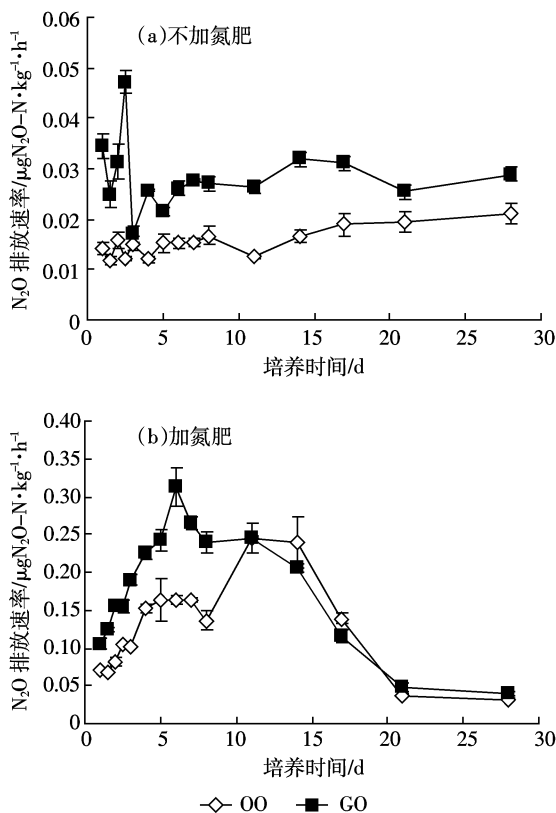


图 5 土壤 N_2O 排放速率随培养时间的变化

Figure 5 Temporal variation of N_2O fluxes from the soils

表 3 土壤 N_2O 累积排放量

Table 3 N_2O cumulative emissions from the soils

供试土壤	N_2O 累积排放量/ $\mu g N_2O-N \cdot kg^{-1}$	
	不加氮肥	加氮肥
GO	$18.23 \pm 0.44^{**}$	$98.59 \pm 0.24^*$
OO	$11.05 \pm 0.31^{**}$	$83.94 \pm 2.60^*$

验中土壤 pH 可能不是影响土壤矿化与硝化作用的主要因素。

土壤氮素的矿化作用可能与全氮、C/N 以及微生物活性关系密切,而硝化作用强弱可能与微生物活性有关。土壤氮素的矿化与氮素的供应密切相关。贺发云等^[25]、王斯佳等^[26]研究结果表明,矿化量与土壤全氮含量显著正相关,因为土壤全氮中绝大部分为有机氮,而有机氮是土壤氮素矿化的来源。设施有机菜地土壤的全氮含量要显著高于露天有机菜地土壤,这可能是前者比后者矿化作用强烈的主要原因之一。土壤氮素的矿化量与土壤有机质本身 C/N 有关^[27]。土壤有机质 C/N 大于 30:1 时,矿化作用释放的有效氮远小于微生物吸收同化的需氮量;当 C/N 为 30 到 15 之间时,矿化量与同化量基本相等;土壤有机质 C/N 值小于 15:1 时,土壤氮素的矿化量超过了同化量,土壤有效氮供应量开始增加。设施和露天有机土壤 C/N 均低于 15:1,且前者 C/N 低于后者,Sun 等^[28]研究指出土壤矿化率与初始 C/N 呈负相关,所以设施有机菜地土壤的矿化率要显著高于露天有机菜地土壤,而矿化过程的提高也促进了硝化过程的进行。土壤微生物活性也会影响设施和露天有机土壤的矿化与硝化过程。试验中设施有机土壤微生物生物量氮、脲酶、过氧化氢酶的活性也显著高于露天有机土壤,而殷永娴等^[9]、唐咏等^[29]研究表明设施土壤氨化细菌、亚硝化细菌、硝化细菌含量高于露天土壤,故微生物活性的提高有利于促进设施有机菜地土壤氮素的矿化和硝化作用。

无论施肥与否,设施有机菜地土壤 N_2O 排放速率在培养期间总体高于露天有机菜地土壤,且前者 N_2O 累积排放量显著高于后者,这进一步佐证了设施菜地土壤硝化作用强于露天土壤,因为好氧土壤中 N_2O 产生主要来自于硝化过程。另外,设施有机菜地土壤 N_2O 排放速率高于露天土壤可能与土壤 C/N 有关。黄耀等^[30]研究认为, NH_4^+ 和 NO_3^- 是 N_2O 产生的前体物质,微生物为满足自身营养吸收矿质氮必然会导致 N_2O 产生与排放减少,在土壤 C/N<20 的情况下,C/N 越低, N_2O 排放应该越高;C/N 越接近 20, N_2O 排放则相应降低。设施有机菜地土壤 C/N 低于露天土壤, N_2O 排放量反而高。

4 结论

与露天有机菜地土壤相比,设施有机菜地土壤有机碳、微生物生物量碳没有显著性差异,而土壤全氮、硝态氮、微生物生物量氮、酶活性均显著高于露天土

壤。设施有机菜地土壤的 C/N 比露天土壤低,pH 明显降低。除培养第 1 d,设施有机菜地土壤氮素矿化量、矿化率在整个培养期间都显著高于露天有机菜地土壤。设施有机菜地土壤硝化量、硝化率在培养前两周内高于露天有机菜地土壤。设施有机菜地土壤的矿化与硝化作用总体比露天有机菜地土壤强烈。矿化作用可能与全氮、C/N、微生物活性关系密切,而硝化作用强弱可能与微生物活性有关。氮素矿化作用与硝化作用之间存在密切联系。无论施肥与否,设施有机菜地土壤 N_2O 排放速率在培养期间总体高于露天有机菜地土壤,且前者 N_2O 累积排放量显著高于后者,这可能与土壤的 C/N 有关。本文对设施和露天有机菜地土壤氮素矿化和硝化作用进行了初步研究和探讨,为有机菜地不同栽培方式下土壤氮素的转化过程提供了一些参考资料。

参考文献:

- [1] Willer H, Kilcher L. The world of organic agriculture – statistics and emerging trends 2009[M]. Bonn: IFOAM; Frick: FiBL; Geneva: ITC, 2009:21.
- [2] 张真和. 我国设施蔬菜发展中的问题与对策[J]. 中国蔬菜, 2009(1): 1–3.
ZHANG Zhen-he. The problems and solutions in the development of China vegetables[J]. *China Vegetables*, 2009(1): 1–3.
- [3] 刘艳军, 姜勇, 梁文举, 等. 蔬菜温室土壤某些化学性质的演变特征[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2218–2220.
LIU Yan-jun, JIANG Yong, LIANG Wen-ju, et al. Soil chemical property changes in vegetable greenhouse fields[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(11): 2218–2220.
- [4] 周建斌, 翟丙年, 陈竹君, 等. 设施栽培菜地土壤养分的空间累积及其潜在的环境效应[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(2): 332–335.
ZHOU Jian-bin, ZHAI Bing-nian, CHEN Zhu-jun, et al. Nutrient accumulations in soil profiles under canopy vegetable cultivation and their potential environmental impacts[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(2): 332–335.
- [5] 魏迎春, 李新平, 刘刚, 等. 杨凌地区大棚土壤硝态氮累积效应研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 174–176, 190.
WEI Ying-chun, LI Xing-ping, LIU Gang, et al. Effect of nitric nitrogen on different greenhouse soil in Yangling area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(2): 174–176, 190.
- [6] 王珊. 不同种植年限设施土壤微生物学特性变化研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2007.
WANG Shan. Study on the changes of microbial characters in different cropping year's greenhouse soil[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2007.
- [7] 袁亮. 设施栽培土壤微生物量和酶活性的变化规律及其与土壤肥力的关系[D]. 泰安: 山东农业大学, 2007.
YUAN Liang. The changes of soil microbial biomass and enzyme activi-

- ties and their relations with soil fertility in sheltered planting[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2007.
- [8] 王艳杰. 京郊保护地土壤氮素矿化过程 [D]. 北京: 首都师范大学, 2006.
- WANG Yan-jie. The course of the soil nitrogen mineralization in Beijing suburb fields[D]. Beijing: Capital Normal University, 2006.
- [9] 殷永娟, 刘鸿雁. 设施栽培下土壤中硝化、反硝化作用的研究[J]. 生态学报, 1996, 16(3): 246-250.
- YIN Yong-xian, LIU Hong-yan. Investigation on nitrification and denitrification of soil under installing cultivation conditions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(3): 246-250.
- [10] 张光亚, 方柏山, 闵航, 等. 设施栽培土壤氧化亚氮排放及其影响因素的研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(1): 144-147.
- ZHANG Guang-ya, FANG Bai-shan, MIN Hang, et al. N_2O fluxes from greenhouse soil and its influence factors[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(1): 144-147.
- [11] Liu B, Tu C, Hu S J, et al. Effect of organic, sustainable, and conventional management strategies in grower fields on soil physical, chemical, and biological factors and the incidence of Southern blight[J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 37: 202-214.
- [12] Poudel D D, Horwarth W R, Lanini W T, et al. Comparison of soil N availability and leaching potential, crop yields and weeds in organic, low-input and conventional farming systems in northern California[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 90: 125-137.
- [13] 宋世威. 有机生产体系中甜瓜氮素营养生理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- SONG Shi-wei. Study on nutritional physiology of nitrogen in muskmelon under organic farming system [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [14] Zhao W, Cai Z C, Xu Z H. Does ammonium-based N addition influence nitrification and acidification in humid subtropical soils of China?[J]. *Plant Soil*, 2007, 297: 213-221.
- [15] Huang Y, Zou J W, Zheng X H, et al. Nitrous oxide emissions as influence by amendment of plant residues with different C:N ratios [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36: 973-981.
- [16] 金雪霞, 范晓晖, 蔡贵信, 等. 菜地土壤氮素矿化和硝化作用的特征[J]. 土壤, 2004, 36(4): 382-386.
- JIN Xue-xia, FAN Xiao-hui, CAI Gui-xin, et al. Characteristics of nitrogen mineralization and nitrification in vegetable garden soils [J]. *Soils*, 2004, 36(4): 382-386.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 20-60.
- BAO Shi-dan. Soil agro-chemistry analysis methods[M]. 3rd edition, Beijing: China Agriculture Press, 2000: 20-60.
- [18] 吴金水. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 54-60.
- WU Jin-shui. Soil microbial biomass analysis methods and application [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006: 54-60.
- [19] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 275-323.
- GUAN Song-yin. Soil enzyme and research technology[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986: 275-323.
- [20] 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 Hai-ying, LI Ting-xuan, ZHANG Xi-zhou. Nutrient budget and soil nutrient status in greenhouse system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(3): 514-522.
- [21] 王辉, 董元华, 安琼, 等. 高度集约化利用下蔬菜地土壤酸化及次生盐渍化研究: 以南京市南郊为例[J]. 土壤, 2005, 37(5): 530-533.
- WANG Hui, DONG Yuan-hua, AN Qiong, et al. Change in pH and salinity of vegetable soil under intensive cultivation: A case study of southern suburbs of Nanjing[J]. *Soils*, 2005, 37(5): 530-533.
- [22] 吴彩霞, 傅华. 根系分泌物的作用及影响因素[J]. 草业科学, 2009, 26(9): 24-29.
- WU Cai-xia, FU Hua. Effects and roles of root exudates[J]. *Pratacul-tural Science*, 2009, 26(9): 24-29.
- [23] 李辉信, 胡峰, 刘满强, 等. 红壤氮素的矿化和硝化作用特征[J]. 土壤, 2000, 32(4): 194-197.
- LI Hui-xin, HU Feng, LIU Man-qiang, et al. Characteristics of nitrogen mineralization and nitrification in red soils[J]. *Soils*, 2000, 32(4): 194-197.
- [24] Katyal J C, Carter M F, Vlek P L G. Nitrification activity in submerged soil and its relation to denitrification loss[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1988, 7: 16-22.
- [25] 贺发云, 尹斌, 蔡贵信, 等. 菜地和旱作粮地土壤氮素矿化和硝化作用的比较[J]. 土壤通报, 2005, 36(1): 41-44.
- HE Fa-yun, YIN Bin, CAI Gui-xin, et al. Comparison of nitrogen mineralization and nitrification in upland soils grown with vegetable and food crops[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(1): 41-44.
- [26] 王斯佳, 韩晓增, 侯雪莹. 长期施肥对黑土氮素矿化与硝化作用特征的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 170-173, 190.
- WANG Si-jia, HAN Xiao-zeng, HOU Xue-ying. Impact of long-term fertilization on nitrogen mineralization and nitrification in black soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(2): 170-173, 190.
- [27] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 197.
- HUANG Chang-yong. Agrology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 197.
- [28] Sun H, Tang Y, Zhao Q G. Nitrogen mineralization of prunings of six N_2 -fixing hedgerow species in a dry valley of the Jinsha River[J]. *Pedosphere*, 2002, 12(1): 25-31.
- [29] 唐咏, 梁成华, 刘志恒, 等. 日光温室蔬菜栽培对土壤微生物和酶活性的影响[J]. 沈阳农业大学学报(自然科学版), 1999, 30(1): 16-19.
- TANG Yong, LIANG Cheng-hua, LIU Zhi-heng, et al. Effect of vegetable cultivation in solar greenhouse on microorganisms and enzyme activities in the soils[J]. *Natural Science Journal of Shenyang Agricultural University*, 1999, 30(1): 16-19.
- [30] 黄耀, 焦燕, 宗良纲, 等. 土壤理化特性对麦田 N_2O 排放影响的研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(5): 598-602.
- HUANG Yao, JIAO Yan, ZONG Liang-gang, et al. N_2O emission from wheat cultivated as influenced by soil physicochemical properties[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(5): 598-602.