

不同施肥处理对黑土硝化作用和矿化作用的影响

李平^{1,3}, 郎漫^{1,2*}, 李煜姗², 李倩文², 吴嘉晨², 杨帆², 白昕欣²

(1.南京信息工程大学, 江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; 2.南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044; 3.中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008)

摘要:通过室内培养试验,研究了不同施肥处理对黑土硝化作用和矿化作用的影响。结果表明,与不施肥对照处理相比,施用氮肥显著促进了硝化作用的进行,但抑制了培养初期的氮素矿化作用,培养期间施氮处理的平均净硝化速率为 $4.21 \text{ mg NO}_3\text{-N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, 是对照处理的 2.38 倍;平均净矿化速率为 $1.18 \text{ mg N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, 与对照处理没有显著差异。与对照处理相比,在施用氮肥的基础上配施猪粪进一步促进了土壤有机氮的矿化作用和硝化作用,培养期间的平均净硝化速率为 $8.14 \text{ mg NO}_3\text{-N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, 分别为对照处理和单施氮肥处理的 4.59、1.93 倍;平均净矿化速率为 $3.69 \text{ mg N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, 是单施氮肥处理的 3.12 倍。与单施氮肥处理相比,氮肥配施秸秆处理显著抑制了硝化作用,平均净硝化速率下降 62.7%,但与对照处理相比没有显著差异。氮肥配施秸秆处理的净氮矿化量在整个培养期间都是负值,平均净氮矿化速率为 $-1.62 \text{ mg N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, 说明添加秸秆促进了土壤无机氮的同化。

关键词:硝化作用;矿化作用;猪粪;秸秆;氮

中图分类号:S153 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)07-1326-07 doi:10.11654/jaes.2015.07.014

Effects of Different Fertilization on Nitrification and Mineralization in Black Soil

LI Ping^{1,3}, LANG Man^{1,2*}, LI Yu-shan², LI Qian-wen², WU Jia-chen², YANG Fan², BAI Xin-xin²

(1.Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2.College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3.Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: A laboratory incubation experiment was conducted to study the effects of different fertilization on nitrification and organic N mineralization in black soil. Application of chemical N fertilizer increased nitrification, as compared with the non-fertilizer control, but tended to inhibit organic N mineralization during the initial period. The average net nitrification rate was $4.21 \text{ mg NO}_3\text{-N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, 2.38 times that of the control. The average mineralization rate was $1.18 \text{ mg N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, with no significant difference from the control. Combined application of N fertilizer and pig manure further promoted both nitrification and organic N mineralization, with the average net nitrification rate of $8.14 \text{ mg NO}_3\text{-N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ and average mineralization rate of $3.69 \text{ mg N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, which was respectively 1.93 and 3.12 times those of the chemical N fertilizer treatment. In chemical N fertilizer plus straw treatment, the average net nitrification rate was 62.7% lower than that in the N fertilizer treatment, but was not significantly different from the control treatment. However, the amount of net mineralized N was less than 0, with the average net mineralization rate of $-1.62 \text{ mg N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ in combined N fertilizer and straw treatment, indicating that addition of straw into soil promoted the immobilization of inorganic N. These findings would be useful for better applying chemical fertilizer and crop residues to soils.

Keywords: nitrification; mineralization; pig manure; straw; nitrogen

收稿日期:2015-01-27

基金项目:国家自然科学基金项目(41301345,41101284);中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室开放基金项目(SEPR2014-06);江苏省高校自然科学研究计划项目(12KJB210004);国家留学基金项目(201409040013);江苏省政府留学奖学金项目;江苏省高等学校大学生实践创新训练计划项目(201310300095X)

作者简介:李平(1982—),男,江西吉水人,博士,讲师,从事土壤氮循环与温室气体排放研究。E-mail:pli@nuist.edu.cn

*通信作者:郎漫 E-mail:mlang@nuist.edu.cn

氮素是作物生长发育所必需的大量营养元素,虽然土壤氮素的输入有多种途径,但作物获取的氮素主要来源于土壤和肥料。有研究报道,即使在大量施用氮肥的条件下,作物所需要的氮素也有 50%以上来自土壤有机氮的矿化^[1]。而在东北黑土区,土壤为植物生长提供的氮素占总氮需求量的 70%以上^[2]。土壤中的氮主要以有机氮的形态存在,一般占土壤全氮量的 95%以上,而植物所吸收的氮几乎都是无机形态。因此,土壤中的有机氮必须不断地通过土壤微生物的矿化作用转化为植物可吸收的有效氮形态。氮的矿化,又称氨化,是有机氮化合物分解成铵态氮的过程,有机氮矿化速率决定了土壤中用于植物生长、微生物同化所需氮素的可利用性^[1]。硝化作用是指硝化细菌利用二氧化碳作为碳源,将铵态氮氧化成硝态氮,从中获取能量的微生物过程。硝化作用的发生消耗了土壤和外源肥料中的铵态氮,减少了氨挥发损失,但是形成的硝态氮在降雨或者灌溉时很容易发生淋溶进入地下水,或者发生反硝化作用导致氮素的大量损失和温室气体的排放。因此,研究土壤氮的矿化作用和硝化作用具有农学和环境双重意义。

东北黑土地是我国重要的商品粮基地,对我国的粮食安全起着举足轻重的作用。由于长期过度垦殖和不良的经营管理方式,黑土质量退化问题日益严重^[3]。为了改善和提高土壤肥力,向土壤中施用化肥和有机肥已成为最常采用的措施^[4]。关于施用化肥和有机肥对土壤硝化作用和矿化作用影响的研究已有很多报道。通常认为施用化学氮肥能够刺激土壤硝化作用,短期施用化肥对矿化作用没有影响,而长期施用却能促进土壤氮的矿化作用^[5-6]。施用低 C/N 的有机粪肥通常会显著促进土壤有机氮的矿化作用和硝化作用^[7],而施用较高 C/N 的作物秸秆短期内会显著抑制土壤有机氮的矿化作用和硝化作用^[8-9]。此外,秸秆还田和粪肥施用对土壤矿化作用和硝化作用的影响也因秸秆和有机粪肥的种类、施用方式和施用时间的不同而有所不同^[10]。由此可见,关于不同施肥处理对土壤硝化作用和矿化作用的影响规律及机理还需进行深入的研究。

本研究以东北长期耕作的农田黑土为研究对

象,采取室内培养试验,研究单施氮肥、氮肥配施猪粪和氮肥配施秸秆处理对黑土中无机氮的动态变化、硝化作用和矿化作用的影响,以期在黑土区农业生产中肥料的合理施用,土壤氮素循环的合理调控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自黑龙江省哈尔滨市阿城区蜚克图镇光明村,该地区属北温带大陆季风气候区,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨,年平均温度 1.5℃,年平均降水量 530 mm,年有效积温 2450℃,年日照时数 2600~2800 h,无霜期 125 d,土壤属于中厚层黑土。采样地开垦时间约为 100 a,主要种植玉米。土样于室温下风干,过 2 mm 筛低温储存备用。土壤基本理化性质如表 1 所示。

供试猪粪采自当地农户,供试玉米秸秆为采样点成熟收割后新鲜秸秆的地上部分,风干后将猪粪和秸秆粉碎过 1 mm 筛,并于 80℃烘干备用。猪粪的有机碳含量为 30.6%,全氮含量为 2.32%,C/N 为 13.2;秸秆的有机碳含量为 56.9%,全氮含量为 1.12%,C/N 为 50.8。

1.2 试验方法

试验共设置 4 个处理:不添加氮肥的对照处理(CK)、单施氮肥处理(N)、氮肥配施猪粪处理(N+F)、氮肥配施秸秆处理(N+G)。称取 20 g(干基)土样,分别装入 108 个 250 mL 三角瓶中,将三角瓶分为 4 组,每组 27 瓶。分别向其中 2 组土壤中添加 3%(重量比)的猪粪和秸秆并充分混匀作为氮肥配施猪粪处理和氮肥配施秸秆处理,然后调节土壤含水量至田间最大持水量(WHC)的 40%,25℃下预培养 7 d 以便激活土壤微生物。预培养结束后,选取 1 组没有添加有机物料的三角瓶,用移液管加入(NH₄)₂SO₄溶液,使 N 浓度达到 120 mg·kg⁻¹,作为单施氮肥处理,向另外 1 组没有添加有机物料的三角瓶中加入等量的水作为对照处理,添加猪粪和秸秆的两组三角瓶中也加入等量的氮溶液,最后调节所有土样的水分含量至 60% WHC。用锡箔盖住瓶口,并在锡箔上扎 4~5 个孔以利于通气,然后将三角瓶置于恒温培养箱中在 25℃下

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Physico-chemical properties of tested soil

pH (H ₂ O)	最大持水量 WHC/%	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/mg·kg ⁻¹	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/mg·kg ⁻¹	有机碳 SOC/%	全氮 TN/%	碳氮比 C/N	水溶性有机碳 WOC/mg·kg ⁻¹	水溶性有机氮 WON/mg·kg ⁻¹	砂粒 Sand/%	粉粒 Silt/%	粘粒 Clay/%
4.93	61.02	9.05	11.60	1.60	0.164	9.76	233.3	9.42	12.5	72.0	15.5

黑暗培养 35 d。每隔 3 d 对样品补水,以补充因蒸发而引起的水分损失。

分别在添加氮溶液后的 0、1、3、5、7、14、21、28、35 d 随机取出 3 个土壤样品作为重复,按液土比 2.5:1 向三角瓶中加入 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 溶液,振荡、过滤,收集滤液于塑料瓶中,并于 4°C 下低温保存用于测定 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 浓度。

1.3 测定项目与方法

土壤 pH 用电位法(液土比为 2.5:1)测定;土壤、猪粪和秸秆有机碳和全氮用碳氮元素分析仪(NA Series 2, CE Instruments, Italy)测定;土壤质地采用激光粒度分析仪(Beckman Coulter, Los Angeles, USA)测定;水溶性有机碳(WOC)和水溶性有机氮(WON)的测定参照文献[11]中的方法,土壤用水浸提后过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜,然后用有机碳氮分析仪(Shimadzu Corp, Kyoto, Japan)测定。土壤 WHC 的测定参照文献中的方法[12],称取适量过 2 mm 筛的土样置于用棉球塞住的漏斗中,加去离子水浸泡 2 h 后加盖,除去棉塞,让水分自由下渗,放置过夜后测定土壤质量含水量作为土壤 WHC;KCl 溶液提取后的滤液用 MgO -定氮合金蒸馏法测定 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 浓度。

1.4 数据处理

净氮矿化量按照下式计算:

$$M = (\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-)_t - (\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-)_{t_0} \quad (1)$$

式中: M 为净氮矿化量, $\text{mg N} \cdot \text{kg}^{-1}$; $(\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-)_t$ 和 $(\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-)_{t_0}$ 分别为培养 t d 和 0 d 时 NH_4^+-N 含量与 NO_3^--N 含量之和, $\text{mg N} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

净氮矿化速率 $= M / (t - t_0)$

式中: t 为培养后的天数, d; t_0 为 0 d。

净硝化速率按照下式计算:

$$N = [(\text{NO}_3^-)_t - (\text{NO}_3^-)_{t_0}] / (t - t_0) \quad (2)$$

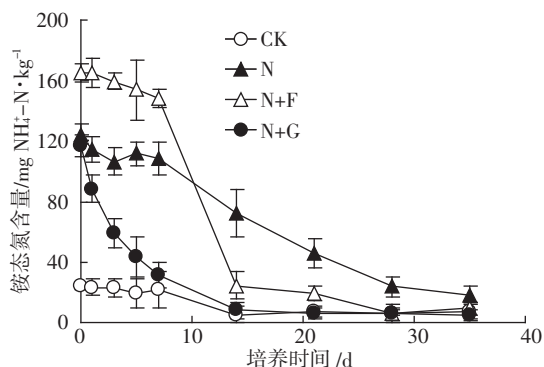
式中: N 为净硝化速率, $\text{mg NO}_3^--\text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; $(\text{NO}_3^-)_t$ 和 $(\text{NO}_3^-)_{t_0}$ 分别为培养 t d 和 0 d 时 NO_3^--N 含量, $\text{mg NO}_3^--\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

本文给出的数据均为 3 次重复的平均值。采用 SPSS 13.0 软件对数据进行单因素方差分析,用 LSD 方法分析处理间平均数在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平的差异显著性,用 Excel 软件作图。

2 结果与分析

2.1 土壤中铵态氮的动态变化

不同施肥处理土壤中铵态氮含量的动态变化如图 1 所示。由于施入的猪粪中含有一定量的铵态氮,



CK 为对照处理;N 为单施氮肥处理;N+F 为氮肥配施猪粪处理;N+G 为氮肥配施秸秆处理。下同

图 1 不同施肥处理土壤铵态氮含量的动态变化

Figure 1 Dynamics of ammonium in soil with different fertilization treatments

且经过了 7 d 的预培养,培养起始期氮肥配施猪粪处理的铵态氮含量最高。各处理土壤铵态氮含量在整个培养期间内逐渐下降,其中 CK 处理、单施氮肥处理和氮肥配施猪粪处理在 0~7 d 缓慢下降,在 7~14 d 则迅速下降,然后下降速率趋于平缓,而氮肥配施秸秆处理的铵态氮在 0~7 d 内下降速率最快。至培养结束,各处理土壤铵态氮含量没有显著差异。与单施氮肥处理相比,氮肥配施猪粪处理显著提高了前 7 d 的铵态氮含量($P < 0.01$),但从第 14 d 开始至培养结束,铵态氮含量显著低于单施氮肥处理($P < 0.01$),而氮肥配施秸秆处理的铵态氮含量在整个培养期间都显著低于单施氮肥处理和氮肥配施猪粪处理($P < 0.01$)。

2.2 土壤中硝态氮的动态变化

培养过程中各处理的硝态氮含量变化如图 2 所示。在培养的前 7 d,CK 处理、单施氮肥处理和氮肥配施猪粪处理的硝态氮含量缓慢上升,变化范围为 $82.48 \sim 114.3 \text{ mg NO}_3^--\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$;CK 处理和单施氮肥处

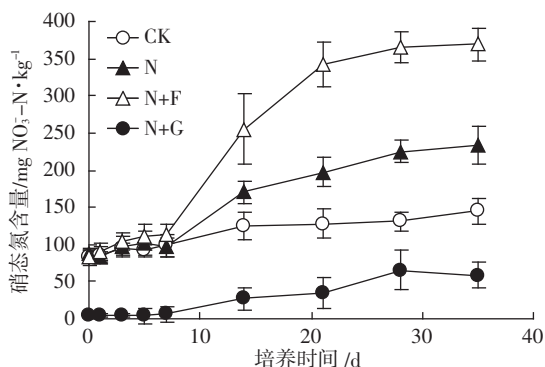


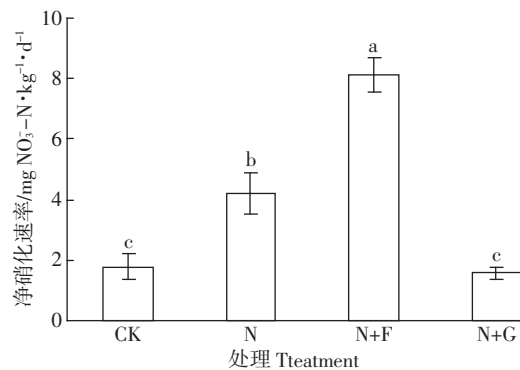
图 2 不同施肥处理土壤中硝态氮含量的动态变化

Figure 2 Dynamics of nitrate in soil with different fertilization treatments

理的确态氮含量没有显著差异,氮肥配施猪粪处理的确态氮含量略高于 CK 和单施氮肥处理。从培养后第 14 d 开始,三个处理的土壤硝态氮含量差异非常显著 ($P<0.01$),表现为氮肥配施猪粪处理>单施氮肥处理>CK 处理,到培养第 35 d 时,CK 处理的确态氮含量为 $145.1 \text{ mg NO}_3\text{-N}\cdot\text{kg}^{-1}$,单施氮肥处理和氮肥配施猪粪处理的确态氮含量分别为 234.6 、 $348.9 \text{ mg NO}_3\text{-N}\cdot\text{kg}^{-1}$,比 CK 处理分别提高 61.6% 和 154.2% 。氮肥配施秸秆处理的确态氮含量显著低于其他三个处理,在培养的 7 d 内,硝态氮含量在 $3.50\sim 6.12 \text{ mg NO}_3\text{-N}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间波动,没有显著差异,之后迅速上升,第 35 d 时达到 $58.42 \text{ mg NO}_3\text{-N}\cdot\text{kg}^{-1}$,但也仅为 CK 处理的 40.3% 、单施氮肥处理的 24.9% 。

2.3 不同施肥处理对土壤硝化作用的影响

不同施肥处理对土壤硝化作用的影响非常显著(图 3)。与 CK 处理相比,施用氮肥显著促进了硝化作用的进行,培养 35 d 后单施氮肥处理的平均净硝化



图中不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) between different treatments. The same below

图 3 不同施肥处理土壤的平均净硝化速率

Figure 3 Average nitrification rates of soil with different fertilization treatments

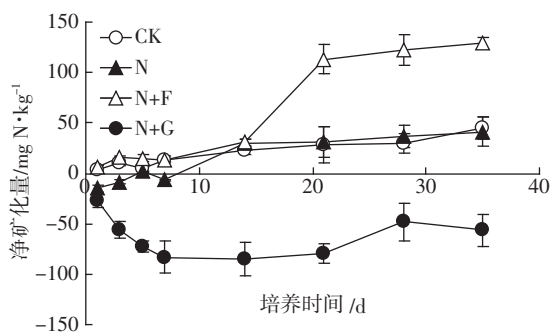


图 4 不同施肥处理土壤净矿化氮的动态变化和平均净氮矿化速率

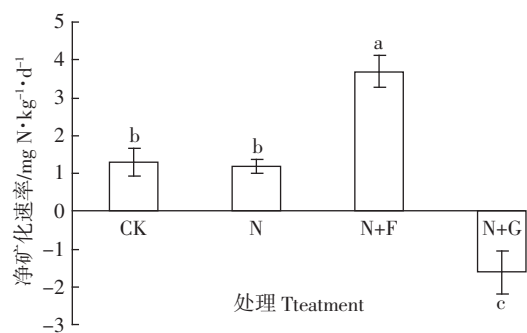
Figure 4 Net mineralized N dynamics and average net mineralization rates of soil with different fertilization treatments

速率达到 $4.21 \text{ mg NO}_3\text{-N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, 是 CK 处理 ($1.77 \text{ mg NO}_3\text{-N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$) 的 2.38 倍, 差异极显著 ($P<0.01$)。与 CK 处理相比, 在施用氮肥的基础上配施猪粪进一步促进了硝化作用, 培养 35 d 后该处理的平均净硝化速率为 $8.14 \text{ mg NO}_3\text{-N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, 分别为 CK 处理和单施氮肥处理的 4.59、1.93 倍。与 CK 处理相比, 在施用氮肥的基础上配施秸秆对硝化速率没有显著影响, 但与单施氮肥处理相比, 氮肥配施秸秆处理的平均硝化速率 ($1.57 \text{ mg NO}_3\text{-N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$) 降低了 62.7% 。

2.4 不同施肥处理对土壤矿化作用的影响

净矿化氮是指一定时间内土壤矿化氮量与微生物固持氮量的差值, 它是土壤氮素供应的容量指标, 其内涵是指总矿化氮中超越微生物的需要, 潜在能够供植物利用的那部分矿质化氮, 可以很好地反映出土壤总的供氮能力^[1]。用培养试验研究土壤氮素的矿化量时, 一般以培养后矿质氮的增加量作为矿化程度的量度。

不同施肥处理对土壤氮素矿化作用的影响非常显著(图 4)。对于 CK 处理、单施氮肥处理和氮肥配施猪粪处理, 净氮矿化量随着培养时间的延长逐渐增加, 而氮肥配施秸秆处理的净氮矿化量随着时间延长逐渐降低, 1 周后趋于稳定, 3 周后又有所上升。与不施氮肥的对照相比, 单施氮肥在培养的最初 1 周内净矿化氮有所降低, 2 周后与 CK 处理没有显著差异, 培养期间 CK 处理和单施氮肥处理的平均净氮矿化速率分别为 1.29 、 $1.18 \text{ mg N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。与单施氮肥处理相比, 氮肥配施猪粪处理的净氮矿化量在整个培养期间都显著提高, 这种差异在培养 3 周后尤为显著 ($P<0.01$), 至培养第 35 d 时, 氮肥配施猪粪处理的净氮矿化量和平均净矿化速率分别为 $129.3 \text{ mg N}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $3.69 \text{ mg N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, 是单施氮肥处理的 3.12 倍。氮肥配施秸秆处理的净氮矿化量在四个处理中最低, 整个培



养期间都是负值,培养 35 d 后平均净氮矿化速率为 $-1.62 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,说明添加秸秆促进了土壤无机氮的同化。

3 讨论

土壤硝化作用是由微生物参与的生物学过程,凡是对生物活动有影响的因素对硝化作用都会产生影响。铵态氮是硝化作用的底物,向土壤中施用氮肥能够增加硝化细菌的数量和活性,有研究报道,施肥土壤中硝化细菌的数量比对照土壤提高了 20 倍之多^[13]。关于铵态氮肥对土壤中硝化作用的促进效应已有很多报道^[8,14-16]。本研究也发现施用氮肥处理的净硝化速率显著高于不施肥的对照处理(图 3),与前人的研究结果一致。

与单施氮肥相比,氮肥配施有机肥可以进一步促进土壤的硝化作用。本研究在施用氮肥的基础上配施猪粪使得培养 2 周后的土壤铵态氮含量显著降低,硝态氮含量显著增加(图 1、图 2),平均净硝化速率显著大于单施氮肥处理(图 3)。这与范晓辉等^[17]在红壤和潮土上的研究结果一致,而与何飞飞等^[18]在紫色酸性菜园土上的研究结果相反,可能与其使用的猪粪中添加了水稻秸秆以及添加猪粪后土壤 pH 值显著下降有关。施用有机粪肥对土壤硝化效果的促进作用一方面是因为硝化细菌的数量有所增加^[19-20],另一方面可能是因为硝化细菌的种类发生了改变。Chu 等^[21]指出,向土壤中施用有机肥后硝化细菌的种属发生了改变,不施肥土壤中硝化细菌主要是 *Nitrosospora* cluster 9,施用有机粪肥后硝化细菌的主要种属转变为 *Nitrosospora* cluster 3,其硝化能力显著高于 *Nitrosospora* cluster 9。这可能是氮肥配施猪粪处理的硝化速率显著高于对照和单施氮肥处理的一个主要原因。此外,有机肥通常呈碱性,施入土壤后可以提高土壤 pH^[22],促进硝化微生物的生长和繁殖,而且有机肥在分解矿化的过程中可以产生大量铵态氮,刺激硝化作用的发生。

氮肥配施秸秆处理对土壤无机氮动态变化和硝化作用的影响与氮肥配施猪粪处理有所不同,在培养的最初 1 周内氮肥配施秸秆处理的铵态氮含量急剧下降(图 1),但是硝态氮含量却没有明显变化(图 2),说明秸秆的加入抑制了硝化作用的进行。这与范晓辉等^[17]和 Wang 等^[23]的研究结果相反,可能与他们添加的水稻秸秆 C/N 相对较低有关。土壤中铵态氮含量的下降有两个主要原因,一是硝化作用的发生使铵

态氮转化为硝态氮,二是微生物对铵态氮的消耗^[20]。秸秆的 C/N 较高,施入土壤后提供了丰富的碳底物,刺激了微生物活性,增加了土壤微生物对无机氮的生物固持作用,使其转化成微生物体氮^[24]。而当土壤中铵态氮和硝态氮同时存在时,微生物主要同化铵态氮,因为同化铵态氮所需要的能量比同化硝态氮低^[25],所以氮肥配施秸秆处理土壤中的铵态氮含量显著降低。大量铵态氮被微生物同化导致硝化作用底物减少,因此没有引起硝态氮含量的显著增加。

土壤有机氮的矿化作用是以土壤生物活动,特别是土壤异养微生物活动为主导的生物化学过程。当向土壤中施用无机氮肥和有机物料时,会改变土壤的 C/N,使土壤氮矿化/同化过程的强度和时间发生重大变化,进而影响土壤无机氮的动态变化^[24]。本研究中单施氮肥处理土壤在最初 1 周内的净氮矿化量为负值,显著低于对照,说明添加无机氮抑制了土壤原有有机氮的矿化。Sierra^[26]研究报道,土壤矿质氮含量与培养期间矿化氮产量呈负相关,表明土壤中存在一个控制氮矿化的反馈机制:较高的矿质氮初始值限制了土壤氮矿化,且这一机制与土壤微环境中的“矿化-固化”过程有关。

向土壤中添加猪粪改善了土壤的养分状况。猪粪含有大量易分解有机碳、氮、磷等物质,而且猪粪在分解矿化的过程中还会释放出一部分水溶性有机碳,为微生物提供最直接的碳源,氮肥的配施为土壤微生物提供了充足的氮素营养,从而促进了土壤微生物的快速繁殖^[27],进而促进了土壤原有有机氮的矿化作用。而且,猪粪本身在分解过程中也会发生矿化作用产生大量矿质氮,也可能是施用有机肥可以提高土壤矿化作用的一个重要原因。

有机氮矿化作用与 C/N 密切相关。施入有机物料的土壤中,有机氮矿化过程与矿质氮的微生物同化过程的相对强弱取决于有机物料的 C/N。一般认为,当 C/N 大于 30 时,易分解的碳源物质丰富,矿质氮的生物固持作用大于有机氮的矿化作用,表现为矿质氮的净同化;当 C/N 小于 20 时,有机氮的矿化速率大于矿质氮的生物同化速率,从而表现为净矿化^[28]。本研究中所添加的猪粪和秸秆的 C/N 有很大差异,猪粪的 C/N 较低(13.2),有机氮的矿化作用大于矿质氮的生物固持作用,在整个培养期间表现为持续增加的净氮矿化量;而秸秆的 C/N 较高(50.8),大量秸秆的加入增加了土壤中生物有效性碳的数量,这种在能源供应方面的巨大扰动,极大地刺激了土壤异养微生物的活

动,而氮素的缺乏使得土壤矿化出来的无机氮很快被同化^[29]。从图4可以看出,在整个培养期间氮肥配施秸秆处理的净氮矿化量都为负值,说明主要发生了无机氮的生物同化,但在14 d后净氮同化值有所降低,说明被微生物同化的氮素有一部分发生了再矿化。有研究表明土壤中原有微生物氮相对稳定,而新形成的微生物氮极易降解^[30],其周转速率是土壤有机氮的5~10倍^[31],因此被微生物同化的氮很快会发生矿化作用释放出来。范晓辉等^[17]在红壤和潮土上以及马力等^[32]在红壤水稻土上的研究结果均表明,秸秆还田促进了土壤有机氮的矿化作用,与本研究结果相反,可能与他们施用的是C/N较低的水稻秸秆有关。

值得注意的是,本试验是在室内培养条件下进行的,试验所用土壤为风干土。土壤经过风干、过筛和复水后,会促进土壤有机氮的矿化作用。原因是物理扰动过程释放了一些物理保护性有机物,增加了微生物的底物和能源^[33]。另外,风干过程中死亡微生物再复水后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分解矿化,由此引发了碳氮矿化的激发效应^[34]。但也有研究表明,干土复水后对土壤碳氮矿化的激发效应只发生在复水后的16 h,经24 h之后已没有显著影响^[35]。本试验中干土复水后进行了7 d的预培养,然后才开始监测矿质氮的含量变化,所以由复水产生的差异可以忽略不记。然而,室内培养条件与田间实际状况有很大差异,尤其是没有植物和土壤微生物竞争土壤养分。因此,关于不同施肥处理对黑土氮素转化规律的研究还需开展田间试验以进行深入的探索。

4 结论

不同施肥处理对黑土有机氮的矿化作用和硝化作用具有显著影响。施用氮肥显著促进了土壤的硝化作用,但是抑制了培养初期的矿化作用;在施用氮肥的基础上配施猪粪,对有机氮的矿化作用和硝化作用都有显著的促进作用,使得土壤中的铵态氮和硝态氮含量显著增加;在施用氮肥的基础上配施秸秆显著促进了土壤中铵态氮的同化,显著抑制了硝化作用和矿化作用的进行。

参考文献:

- [1] 朱兆良,文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1992.
- ZHU Zhao-liang, WEN Qi-xiao. Nitrogen in soils of China[M]. Nan-jing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992.

- [2] 王建国,韩晓增,刘鸿翔. 黑土农田化肥氮素去向的研究[J]. 生态学杂志,1997,16(5):612-631.
- WANG Jian-guo, HAN Xiao-zeng, LIU Hong-xiang. Study on the fate of nitrogenous fertilizer in the black soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1997, 16(5):612-631.
- [3] 焦晓光,隋跃宇,魏丹. 长期施肥对薄层黑土酶活性及土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料,2011,1:6-9.
- JIAO Xiao-guang, SUI Yue-yu, WEI Dan. Effect of long-term fertilization on enzyme activities and soil fertility in the black thin-layer soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011, 1:6-9.
- [4] 杨青林,桑利民,孙吉茹,等. 我国肥料利用现状及提高化肥利用率的方法[J]. 山西农业科学,2011,39(7):690-692.
- YANG Qing-lin, SANG Li-min, SUN Ji-ru, et al. Current situation of fertilizer use in China and the method to improve chemical fertilizer utilization efficiency[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2011, 39(7):690-692.
- [5] Forge T A, Simard S W. Structure of nematode communities in forest soils of southern British Columbia: Relationships to nitrogen mineralization and effects of clearcut harvesting and fertilization[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 34(3):170-178.
- [6] Yan D Z, Wang D J, Sun R J, et al. N mineralization as affected by long-term N and its relationship with crop N uptake fertilization[J]. *Pedosphere*, 2006, 16:125-130.
- [7] 姜燕宏,诸葛玉平,魏猛,等. 外源有机物料对土壤氮矿化的影响[J]. 土壤通报,2009,40(2):315-320.
- LOU Yan-hong, ZHUGE Yu-ping, WEI Meng, et al. Effects of extraneous organic materials on the mineralization of nitrogen in soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(2):315-320.
- [8] 闫德智,王德建. 长期施用化肥和秸秆对水稻土碳氮矿化的影响[J]. 土壤,2011,43(4):529-533.
- YAN De-zhi, WANG De-jian. Carbon and nitrogen mineralization affected by long-term application of chemical fertilizer and rice straw in paddy soil[J]. *Soils*, 2011, 43(4):529-533.
- [9] Watts D B, Torbert H A, Prior S A, et al. Long-term tillage and poultry litter impacts soil carbon and nitrogen mineralization and fertility[J]. *Soil Fertility and Plant Nutrition*, 2010, 74(4):1239-1247.
- [10] 张鑫,隋世江,刘慧颖,等. 秸秆还田下氮肥用量对玉米产量及土壤无机氮的影响[J]. 农业资源与环境学报,2014,31(3):279-284.
- ZHANG Xin, SUI Shi-jiang, LIU Hui-ying, et al. Effect of different application rate of nitrogen fertilizer under straw return on maize yield and inorganic nitrogen accumulation[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31(3):279-284.
- [11] Burford J R, Bremner J M. Relationships between the denitrification capacities of soils and total, water soluble and readily decomposable soil organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1975, 7(6):389-394.
- [12] Fierer N, Schimel J P. Effects of drying-rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(6):777-787.
- [13] Geisseler D, Scow K M. Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms: A review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 75:54-63.

- [14] Abbasi M K, Adams W A. Gaseous N emission during simultaneous nitrification-denitrification associated with mineral N fertilization to a grassland soil under field conditions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(8-9):1251-1259.
- [15] Hall S J, Matson P A. Nutrient status of tropical rain forests influences soil N dynamics after N additions[J]. *Ecological Monographs*, 2003, 73(1):107-129.
- [16] Müller C, Laughlin R J, Christie P, et al. Effects of repeated fertilizer and cattle slurry applications over 38 years on N dynamics in a temperate grassland soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(6):1362-1371.
- [17] 范晓辉, 孙永红, 林德喜, 等. 长期试验地红壤与潮土的矿化和硝化作用特征比较[J]. 土壤通报, 2005, 36(5):672-674.
FAN Xiao-Hui, SUN Yong-hong, LIN De-xi, et al. The characteristics of mineralization and nitrification in red soil and calcareous soil from long term fertilization experiments[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(5):672-674.
- [18] 何飞飞, 梁运珊, 易珍玉, 等. 有机无机肥配施对酸性菜地土壤硝化作用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3):534-540.
HE Fei-fei, LIANG Yun-shan, YI Zhen-yu, et al. Effects of combined application of manure and chemical fertilizer on the nitrification in acid vegetable soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(3):534-540.
- [19] Ceccherini M T, Castaldini M, Piovaneli C, et al. Effects of swine manure fertilization on autotrophic ammonia oxidizing bacteria in soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 1998, 7(2):149-157.
- [20] Yamada T, Araki S, Ikeda-Ohtsubo W, et al. Community structure and population dynamics of ammonia oxidizers in composting processes of ammonia-rich livestock waste[J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2013, 36(5):359-367.
- [21] Chu H Y, Fujii T, Morimoto S, et al. Community structure of ammonia oxidizing bacteria under long-term application of mineral fertilizer and organic manure in a sandy loam soil[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, 73(2):485-491.
- [22] 孟红旗, 吕家珑, 徐明岗, 等. 有机肥的碱度及其减缓土壤酸化的机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5):1153-1160.
MENG Hong-qi, LÜ Jia-long, XU Ming-gang, et al. Alkalinity of organic manure and its mechanism for mitigating soil acidification[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(5):1153-1160.
- [23] Wang L, Butterly C R, Yang X L, et al. Use of crop residues with alkaline slag to ameliorate soil acidity in an Ultisol[J]. *Soil Use and Management*, 2012, 28(2):148-156.
- [24] 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, 228-229:44-53.
- [25] Mary B, Recous S, Robin D. A model for calculating nitrogen fluxes in soil using ^{15}N tracing[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(14):1963-1979.
- [26] Sierra J. Relationship between mineral N content and N mineralization rate in disturbed and undisturbed soil samples incubated under field and laboratory condition[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1992, 30(4):477-492.
- [27] 刘学玲, 黄懿梅, 姜继韶, 等. 微生物生理群在猪粪秸秆高温堆肥碳氮转化中的作用[J]. 环境工程学报, 2012, 6(5):1713-1720.
LIU Xue-ling, HUANG Yi-mei, JIANG Ji-shao, et al. Function of microbial physiological group in carbon and nitrogen transformation during a swine manure-straw compost[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(5):1713-1720.
- [28] 石洪艾, 尤孟阳, 李禄军, 等. 长期施用有机物料下黑土氮素有效性及其与作物产量的关系[J]. 生态学报, 2012, 31(9):2283-2288.
SHI Hong-ai, YOU Meng-yang, LI Lu-jun, et al. Nitrogen availability in black soils and its relation with crop yields under long-term applications of organic amendments[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(9):2283-2288.
- [29] Hadas A, Kautsky L, Goek M, et al. Rates of decomposition of plant residues and available nitrogen in soil, related to residue composition through simulation of carbon and nitrogen turnover[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(2):255-266.
- [30] 闫德智, 王德建. 添加秸秆对土壤矿质氮量、微生物氮量和氮总矿化速率的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(3):631-636.
YAN De-zhi, WANG De-jian. Nitrogen mineralization of ^{15}N labeled straw added into the paddy soils in Taihu region[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(3):631-636.
- [31] Wang Q K, Wang Y P, Wang S L, et al. Fresh carbon and nitrogen inputs alter organic carbon mineralization and microbial community in forest deep soil layers[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 72:145-151.
- [32] 马力, 杨林章, 肖和艾, 等. 长期施肥和秸秆还田对红壤水稻土氮素分布和矿化特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4):898-905.
MA Li, YANG Lin-zhang, XIAO He-ai, et al. Effects of long-term fertilization and straw returning on distribution and mineralization of nitrogen in paddy soils in subtropical China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2011, 17(4):898-905.
- [33] Lundquist E J, Jackson L E, Scow K M. Wet-dry cycles affect dissolved organic carbon in two California agricultural soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31:1031-1038.
- [34] 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.
- [35] Mikha M M, Rice C W, Milliken G A. Carbon and nitrogen mineralization as affected by drying and wetting cycles[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37:339-347.