

戴 勋, 王月悦, 谢新乔, 等. 氨化-硝化复合菌剂对油枯有机肥氮氨化和硝化作用的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(4): 942-948.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.04.019

氨化-硝化复合菌剂对油枯有机肥氮氨化和硝化作用的影响

戴 勋¹, 王月悦², 谢新乔¹, 李湘伟¹, 王一明², 田育天¹, 杨继周¹, 朱云聪¹, 胡保文¹, 林先贵², 李 晶²

(1. 红塔烟草<集团>有限责任公司, 云南 玉溪 653100; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008)

摘要: 为了探讨在 2 种不同氨化-硝化复合菌剂作用下, 油枯有机肥中有机氮在土壤中的氨化、硝化作用, 以油枯商品有机肥为研究对象, 通过室内温育培养法, 研究添加氨化-硝化复合菌剂有机肥中有机氮在土壤中氨化和硝化过程。结果表明, 添加氨化-硝化复合菌剂 1 和氨化-硝化复合菌剂 2 均可提高土壤氮的硝化速率(*NNR*), 延长土壤硝化菌群的硝化活性; 与未添加氨化-硝化复合菌剂油枯有机肥处理相比, 培养 60 d 时添加氨化-硝化复合菌剂 1、氨化-硝化复合菌剂 2 分别提高有机肥氮矿化后矿质氮累积量 62.2 mg/kg 和 57.9 mg/kg; 未添加氨化-硝化复合菌剂油枯有机肥中矿化出的矿质氮量占有机肥全氮量的比例为 25.65%, 添加氨化-硝化复合菌剂 1、氨化-硝化复合菌剂 2 后, 油枯有机肥中矿化出的矿质氮量占有机肥全氮量的比例分别为 64.95% 和 61.53%, 分别是未添加氨化-硝化复合菌剂油枯有机肥处理的 2.5 倍和 2.4 倍, 表明 2 种氨化-硝化复合菌剂对油枯有机肥氮的氨化、硝化过程有较大促进作用。

关键词: 油枯有机肥; 氨化-硝化复合菌剂; 氨化作用; 硝化作用

中图分类号: S143.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)04-0942-07

Effects of multiple species inoculants with the capacities of ammoniation and nitrification on the ammoniation and nitrification of nitrogen in the organic fertilizer made of oil cakes

DAI Xun¹, WANG Yue-yue², XIE Xin-qiao¹, LI Xiang-wei¹, WANG Yi-ming², TIAN Yu-tian¹, YANG Ji-zhou¹, ZHU Yun-cong¹, HU Bao-wen¹, LIN Xian-gui², LI Jing²

(1. Hongta Tobacco (Group) Co., Ltd., Yuxi 653100, China; 2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The processes of the ammoniation and nitrification of organic nitrogen (N) from the organic fertilizer added with multiple species inoculants with the capacities of ammoniation and nitrification in the soil were investigated by the indoor incubation method, so as to analyse the ammoniation and nitrification of organic nitrogen in the organic fertilizer made of oil cakes. The organic fertilizer made of oil cakes was selected as the test object, and two kinds of different multiple species inoculants were used in this study. The results showed that soil nitrogen nitrification rate (*NNR*) increased by adding these two kinds of multiple

species inoculants with the capacities of ammoniation and nitrification, and the nitrification activity of the nitrobacterium in the soil was extended. The accumulation of mineral nitrogen was increased by 62.2 mg/kg and 57.9 mg/kg by adding the microbial agent 1 and agent 2 at 60 d of culture. The ratio of mineral N to total N in organic fertilizer

收稿日期: 2019-11-22

基金项目: 红塔烟草(集团)有限责任公司科技项目(S-6016010); 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2017BN05)

作者简介: 戴 勋(1962-), 男, 云南玉溪人, 高级农艺师, 主要从事烟草栽培与烟叶质量评价工作。(E-mail) dai115@126.com

通讯作者: 王一明, (E-mail) ymwang@issas.ac.cn

made of oil cakes was 25.65%, when the microbial agents 1 and 2 were added, the ratios were 64.95% and 61.53%, respectively. These results indicated that the application of two kinds of multiple species inoculants with the capacities of ammoniation and nitrification could promote the ammoniation and nitrification of nitrogen in the organic fertilizer made of oil cakes.

Key words: organic fertilizer made of oil cakes; multiple species inoculants with the capacities of ammoniation and nitrification; ammoniation; nitrification

油枯是油菜籽压榨去油后所剩的残渣,富含氮、有机质及多种微量元素,是一种优良的有机肥原料。云贵烟区的烟农将油枯作为烟草的有机肥料施用,不仅能够提高烟草的产量、品质,而且合理利用了油菜籽残渣,实现了有机废弃物的资源化再利用。在施用到农田之前,油枯需要经过充分的堆沤/堆肥腐熟,使其中的养分分解成作物可利用的水溶态^[1]。研究施入土壤中的油枯有机肥的氮养分动态矿化过程,对于有机肥的合理、高效利用具有重大意义。目前,国内外研究者对有机肥氮矿化做了大量研究工作,并取得了一定成果^[2-7]。然而,目前关于添加复合菌剂的有机肥对有机肥氮矿化影响的研究较少。本研究以油枯商品有机肥为原料,以贵州习水地区的黄壤土为供试土壤,研究具有氨化、硝化功能的2种复合菌剂对油枯商品有机肥氮在土壤中矿化速率及硝化强度的改变趋势,以期对有机肥的高效、合理利用提供理论和技术指导。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自贵州省遵义市习水县桑木镇良村烟草种植基地,土壤类型为黄壤土。土壤基本理化性质如下:pH值为6.77,电导率为135.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$,有机质含量为3.66%,全氮含量为0.16%,铵态氮(NH_4^+-N)含量为3.70 mg/kg ,亚硝态氮(NO_2^--N)含量为0.10 mg/kg ,硝态氮(NO_3^--N)含量为6.38 mg/kg 。

供试有机肥为市售油枯商品有机肥,由习水县某肥料厂生产,其基本理化性质如下:3.16%全氮,21.25 g/kg 可溶性碳(DOC),4 860 mg/kg 铵态氮,10 mg/kg 亚硝态氮,20 mg/kg 硝态氮。供试菌剂为复合菌剂1和复合菌剂2,由中国科学院南京土壤研究所研究人员从污泥中分离并保藏。

1.2 试验设计

采用室内土壤温育培养法^[8-11]进行试验。共设如下4个处理:(1)无肥对照(CK);(2)油枯有机肥(YK);(3)油枯有机肥+菌剂1(YK+J1);(4)油枯

有机肥+菌剂2(YK+J2)。每个处理35个重复,有机肥添加量均为4 g/kg ,菌剂添加量为有机肥添加量的5%。取100 g 过10目筛的土壤装入200 ml 广口玻璃培养瓶中,按照上述不同处理添加有机肥和菌剂,加水调节其持水量为田间最大持水量的60%,充分混匀后,瓶口用塑料薄膜封口以保持水分,置于 $(25\pm 2)^\circ\text{C}$ 恒温室内培养。在培养期间每隔3 d采取称质量法加水,以保持土壤水分为其田间最大持水量的60%。分别于培养后的0 d、1 d、2 d、4 d、7 d、10 d、16 d、22 d、30 d、39 d、60 d进行破坏性取样,每个处理每次3个重复,对土壤水分、铵态氮及硝态氮含量进行测定分析。

1.3 分析项目与方法

NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 含量的测定方法^[12]:称取5 g 新鲜土样,加入50 ml 浓度为2 mol/L 的KCl浸提液,置于180 r/min 的摇床上振荡1 h;振荡后,将土壤悬浮液过滤,滤液中 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 和 NO_3^--N 含量采用连续流动分析仪测定^[12]。

在本研究中,矿质氮定义为 $\text{NH}_4^+-\text{N}+\text{NO}_3^--\text{N}$,氮矿化速率 $[NMR, \text{单位为}\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{d})]$ 、氮硝化速率 $[NNR, \text{单位为}\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{d})]$ 计算公式如下^[13]:

$$\Delta t = t_j - t_i$$

$$A_{\text{amm}} = c[\text{NH}_4^+-\text{N}]_j - c[\text{NH}_4^+-\text{N}]_i$$

$$A_{\text{nit}} = c[\text{NO}_3^--\text{N}]_j - c[\text{NO}_3^--\text{N}]_i$$

$$NNR = A_{\text{nit}} / \Delta t$$

$$NMR = (A_{\text{amm}} + A_{\text{nit}}) / \Delta t$$

$$NM = (A_{\text{amm}} + A_{\text{nit}})_{\text{org}} - (A_{\text{amm}} + A_{\text{nit}})_{\text{CK}}$$

$$OMR = NM / N_{\text{org}} \times 100\%$$

式中, t_j 为培养 j d; t_i 为培养 i d; Δt 为培养时间 $(j-i)$ d; $c[\text{NH}_4^+-\text{N}]_i$ 、 $c[\text{NH}_4^+-\text{N}]_j$ 分别为培养 i d、 j d时土壤样品中的 NH_4^+-N 含量(mg/kg); $c[\text{NO}_3^--\text{N}]_i$ 、 $c[\text{NO}_3^--\text{N}]_j$ 分别为培养 i d、 j d时土壤样品中的 NO_3^--N 含量(mg/kg); A_{amm} 、 A_{nit} 分别为在一定培养时间内 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 的累积量(mg/kg); NM 、 OMR 分别为有机肥中有机氮矿化后矿质氮累积量(mg/kg)^[14]、有机肥中有机氮的净矿化率(%); N_{org} 为添加的有机肥

总氮含量(mg/kg)。由于培养过程中测得的 NO_2^- -N含量极低(<0.7 mg/kg),故不将其纳入计算。

1.4 数据处理方法

本试验中的相关数据用 Excel 2013 计算其平均值和标准差,图表用 Origin 8.0 进行绘制,用 SPSS 20 进行统计分析,并使用 Duncan's 检验进行多重比较($\alpha=0.05$)。

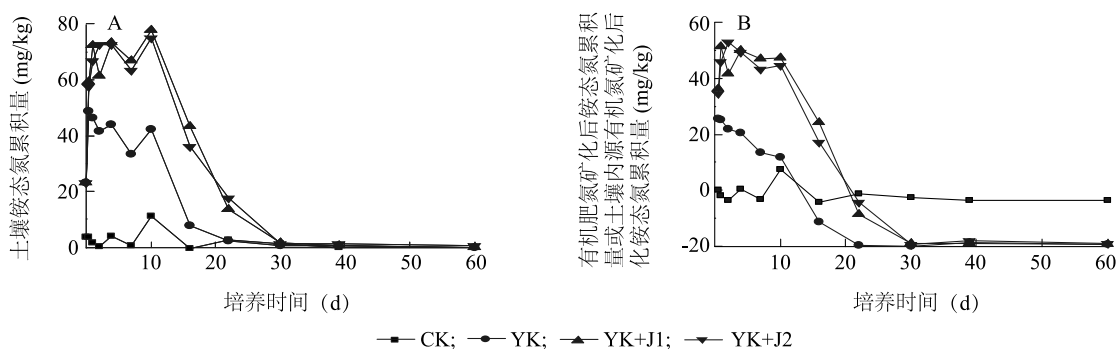
2 结果与分析

2.1 氨化-硝化复合菌剂对有机肥氮矿化后铵态氮累积量的影响

微生物分解含氮有机物生成氨的过程称为氨化作用^[15]。由图 1A 可以看出,油枯有机肥加入土壤后随即快速氨化,1 d 后各个含有机肥处理的铵态氮累积量提高了 1 倍以上,之后由于土壤颗粒吸附和微生物的硝化作用,纯有机肥处理(YK)的铵态氮累积量开始波动下降。在培养期前 10 d,添加氨化-硝化复合菌剂的 2 个处理(YK+J1 和 YK+J2)土壤铵态氮累积量呈波动上升趋势,并在培养 10 d 时分别达最高值 77.76 mg/kg 和 75.06 mg/kg,分别比 YK 处理高 35.51 mg/kg 和 32.81 mg/kg。同时,在培养期前 10 d,氨化作用和硝化作用同时存在,有机肥带入的有机氮不断被氨化成铵态氮,铵态氮在硝化作用下快速转化为硝态氮并在土壤中累积。添加有机肥的 3 个处理土壤中的铵态氮累积量均在培养 10 d 后大幅度下降,YK、YK+J1、YK+J2 处理分别在

培养 22 d、30 d 和 30 d 下降到与 CK(无肥对照)基本一致并接近本底水平。

在试验过程中,土壤内源有机氮的氨化过程也在进行。土壤内源有机氮的氨化过程也会影响施入的有机肥氮的氨化作用。为了分析有机肥氮矿化后铵态氮累积动态,本研究用添加有机肥处理培养期间的铵态氮量扣除培养前土壤本身含有的铵态氮量和有机肥带入土壤中的铵态氮量以及培养过程中土壤内源有机氮矿化后铵态氮量表示有机肥氮矿化后铵态氮累积量,同时用无肥对照培养期间铵态氮量扣除刚开始培养时土壤中的铵态氮量表示土壤内源有机氮矿化后铵态氮累积量。由图 1B 可知,在培养 10 d 时,CK 土壤内源有机氮矿化后铵态氮含量达到 11.17 mg/kg,表明供试土壤自身有机氮的矿化也是不容忽视的。相关研究结果也证实了这一点,即植物所吸收的氮素大部分来自土壤,土壤中的有机氮通过矿化后被植物吸收^[16-18]。从图 1B 中有机肥氮矿化后铵态氮累积量的变化趋势可以看出,在培养 10 d 后,YK 处理的有机肥氮矿化后铵态氮累积量变为负值,表明此时在扣除土壤内源氮矿化后铵态氮累积量后,有机肥氮氨化作用生成的铵态氮量已经低于硝化作用消耗的铵态氮量;而此时添加氨化-硝化复合菌剂的土壤中氨化作用强度仍然大于硝化作用强度,直到培养 22 d,有机肥氮矿化后铵态氮累积量才变为负值。



A: 土壤铵态氮累积量; B: 有机肥氮矿化后铵态氮累积量。CK: 无肥对照; YK: 施油枯有机肥; YK+J1: 施油枯有机肥+氨化-硝化复合菌剂 1; YK+J2: 施油枯有机肥+氨化-硝化复合菌剂 2。

图 1 氨化-硝化复合菌剂对土壤铵态氮累积量和有机肥氮矿化后铵态氮累积量的影响

Fig.1 Effects of multiple species inoculants with the capacities of ammoniation and nitrification on ammonium nitrogen accumulation in soil and ammonium nitrogen accumulation after nitrogen mineralization of organic fertilizer

2.2 氨化-硝化复合菌剂对有机肥氮硝化作用的影响

土壤中的铵态氮在微生物的作用下被部分或大

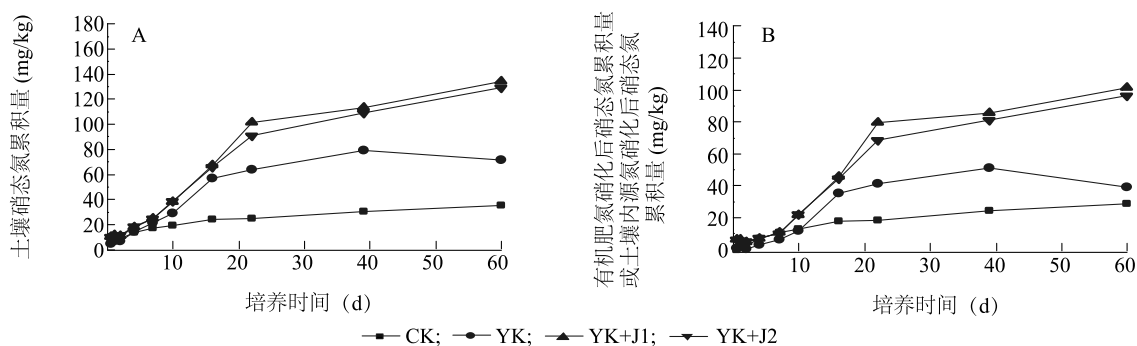
部分氧化为硝态氮的过程称为硝化作用^[15],在本研究中用土壤中硝态氮的累积量来表征硝化作用强

弱。如图 2A 所示,各处理的硝态氮累积量均从培养初期的最低点开始逐步上升,培养至 4 d 时,硝态氮累积量的增加幅度开始变大,并于培养 10 d 时开始大幅度增加,各个处理之间的差异也逐步拉大, YK+J1、YK+J2 处理的硝态氮累积量远高于 YK 处理。由图 1 可以看出,土壤铵态氮累积量在培养 4 d 时有下降趋势,说明培养 4 d 时,微生物的硝化作用开始增强,土壤中的铵态氮转化为硝态氮。培养至 10 d 时,土壤中的硝态氮累积量快速上升并累积,此时 YK、YK+J1、YK+J2 处理的硝化速率分别达到 $4.64 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 、 $4.78 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 和 $4.58 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$,说明在此阶段土壤中微生物的硝化作用很剧烈。

由图 2A 还可以看出,YK 处理与 YK+J1、YK+J2 处理硝态氮累积量的增加趋势分别在培养 16 d 和 22 d 时开始趋于平缓,经计算,其硝化速率稳定在 $0.4 \sim 1.0 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$;在培养 40~60 d 时,YK+J1、YK+J2 处理的硝化速率略有增加,而此时 YK 处理的硝化速率却略有下降。初步分析得出,添加氨化-

硝化复合菌剂可以持续促进硝化作用,从而为氨化-硝化复合菌剂的田间应用及提升有机肥的硝态氮供应提供了可能。

采用与图 1B 相同的计算方法,用添加有机肥处理培养期间的硝态氮量扣除培养前土壤中原有的硝态氮量、有机肥带入土壤中的硝态氮量以及培养过程中土壤内源氮硝化产生的硝态氮量表示有机肥氮硝化作用产生的硝态氮累积量,同时用无肥对照中扣除刚开始培养时土壤中的硝态氮表示土壤内源氮硝化作用产生的硝态氮累积量。如图 2B 所示,在培养期前 10 d,CK 处理土壤内源氮硝化作用产生的硝态氮量高于 YK 处理有机肥氮硝化作用产生的硝态氮,接近 YK+J1 和 YK+J2 处理有机肥氮硝化作用产生的硝态氮,说明在培养前期,土壤内源氮是各处理土壤硝态氮的主要来源。培养 10 d 后,3 种有机肥处理的由有机肥氮硝化作用产生的硝态氮量开始超过土壤内源氮硝化作用产生的硝态氮量,成为土壤硝态氮的主要来源,并且 YK+J1 处理硝态氮累积量高于 YK+J2 处理,二者均远高于 YK 处理。



CK、YK、YK+J1、YK+J2 见图 1 注。A:土壤硝态氮累积量;B:有机肥氮硝化后硝态氮累积量。

图 2 氨化-硝化复合菌剂对土壤硝态氮和有机肥氮硝化后硝态氮累积量的影响

Fig.2 Effects of multiple species inoculants with the capacities of ammoniation and nitrification on nitrate nitrogen accumulation

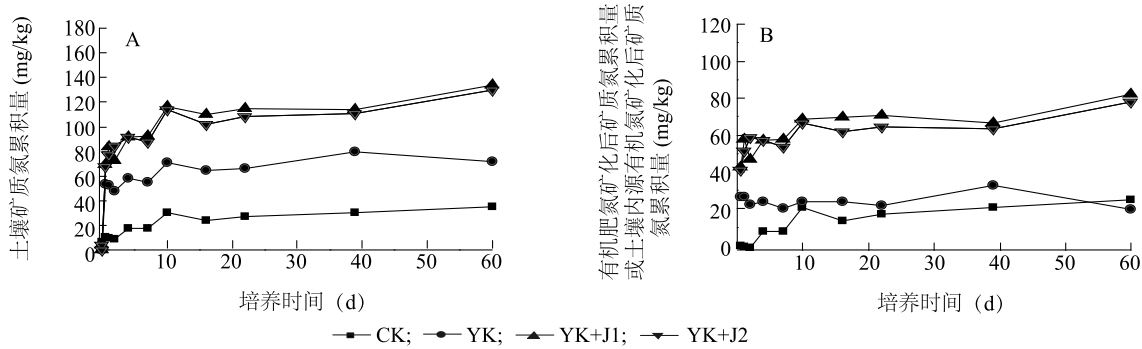
2.3 氨化-硝化复合菌剂对有机肥氮矿化作用的影响

土壤中有机态氮向无机态氮的转化称为矿化作用^[15],在本研究中用土壤中矿质氮的累积量(即铵态氮与硝态氮累积量之和)来表征矿化量。由图 3A 可以看出,土壤中矿质氮累积量总体呈上升趋势。添加油枯有机肥的 3 个处理的矿质氮累积速率在培养前期比较高,至培养 10 d 时,矿质氮累积量的上升幅度开始趋于平缓。上述研究结果表明,施用油枯有机肥可以提高土壤中的矿质氮含量,这与周博等^[19]的研究结果一致。结合图 2、图 3 可以看出,在

培养期前 10 d,氮的矿化速率最高,表明油枯有机肥中易分解的有机氮能在施入土壤后迅速矿化。樊立辉等^[20]在研究发酵油枯对烟草品质与产量的影响时也发现,油枯有机肥施入土壤后分解快,易被作物吸收。

由图 3B 可以看出,YK+J1 和 YK+J2 处理的有机肥氮矿化后矿质氮累积量一直远高于 YK 处理,培养 60 d 时 YK+J1 和 YK+J2 处理分别比 YK 处理提高了 $62.2 \text{ mg}/\text{kg}$ 和 $57.9 \text{ mg}/\text{kg}$ 。同时发现,CK 土壤内源有机氮也存在矿化作用,且在培养期间矿化后矿质氮累积量最高可达 $24.97 \text{ mg}/\text{kg}$,占土壤

总氮含量的0.15%,表明土壤内源有机氮的矿化是 不容忽视的。



CK、YK、YK+J1、YK+J2 见图1注。A:土壤矿质氮累积量;B:有机肥氮矿化后矿质氮累积量。

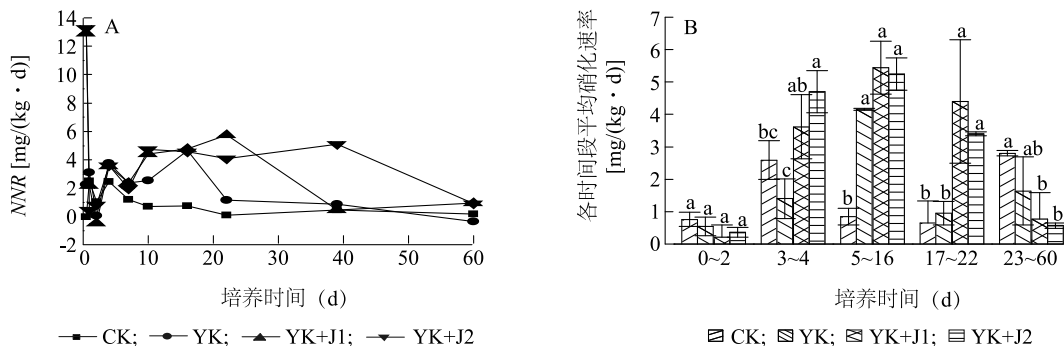
图3 氨化-硝化复合菌剂对土壤矿质氮和有机肥氮矿化后矿质氮累积量的影响

Fig.3 Effects of multiple species inoculants with the capacities of ammoniation and nitrification on mineral nitrogen accumulation

2.4 氨化-硝化复合菌剂对土壤氮矿化、硝化规律的影响

由图4A可以看出,各个处理的NNR均在培养前期4 d达到1个峰值;培养4~7 d时,再次出现1个峰值;在培养8~39 d期间,施加油枯有机肥的3个处理出现1个大峰值;YK+J1处理的高硝化势维持时间长达32 d,YK+J2处理则长达53 d;YK处理的峰值较小,持续的时间较短;在培养末期(60 d),各个处理的NNR开始趋于一致。图4B分5个时间段(0~2 d、3~4 d、5~16 d、17~22 d、23~60 d)对各处理间的平均硝化速率进行了对比,可以看出,在培

养初期(0~2 d),各处理的平均硝化速率间无显著差异;在培养的3~4 d,各处理的平均硝化速率开始提高,YK+J1和YK+J2处理的增幅较大,平均硝化速率显著高于YK处理($P<0.05$);YK、YK+J1、YK+J2处理的硝化速率均在培养的5~16 d达到峰值,而CK则在培养末期(23~60 d)达到峰值;在培养中后期(17~22 d),YK+J1、YK+J2处理继续维持较高的硝化速率,而YK处理则迅速下降至与CK处理间无显著差异。以上结果说明,添加氨化-硝化复合菌剂能够提高油枯有机肥施用后土壤中氮的硝化速率,并使土壤中硝化微生物维持较高的活性。



CK、YK、YK+J1、YK+J2 见图1注。A:土壤氮硝化速率;B:各时间段平均硝化速率。同一时间段的不同处理间标有不同小写字母的表示有显著差异($P<0.05$)。

图4 氨化-硝化复合菌剂对土壤氮硝化速率(NNR)和各时间段平均硝化速率的影响

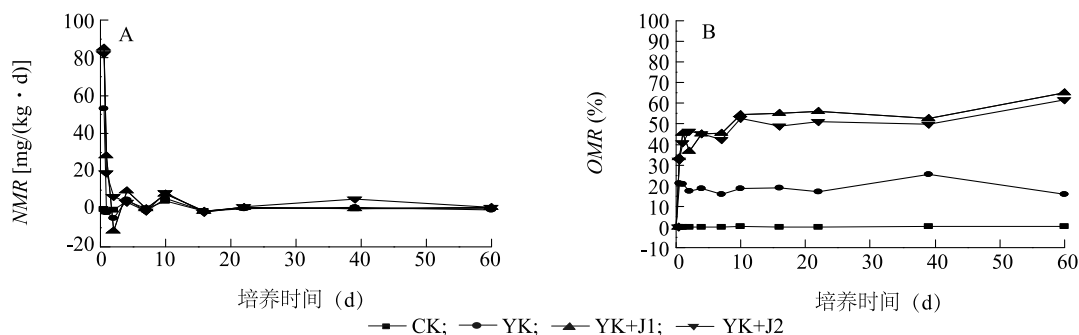
Fig.4 Effects of multiple species inoculants with the capacities of ammoniation and nitrification on nitrogen nitrification rate (NNR) and average nitrification rate in each period

对有机肥处理土壤氮矿化速率(NMR)和有机肥中有机氮的矿化率进行计算,如图5A所示,各处理的NMR在培养1~2 d时达到峰值;YK+J1和YK+

J2处理最先到达峰值,其土壤氮矿化速率分别是YK处理最大峰值的1.6倍和1.5倍;不同处理的NMR在前期波动较大,在后期趋于平缓。比较不同

处理有机肥中有机氮的矿化率(图 5B)可知,YK 处理油枯有机肥中矿化出的矿质氮量占有机肥全氮量的 25.65%;添加氨化-硝化复合菌剂 1 和氨化-硝化复合菌剂 2 后,YK+J1、YK+J2 处理油枯有机肥中矿

化出的矿质氮量分别占有机肥全氮量的 64.95%和 61.53%,分别是纯油枯有机肥处理(YK 处理)的 2.5 倍和 2.4 倍。



CK、YK、YK+J1、YK+J2 见图 1 注。A:土壤氮矿化速率;B:有机肥氮的矿化率。

图 5 氨化-硝化复合菌剂对土壤氮矿化速率(NMR)和有机肥氮矿化率(OMR)的影响

Fig.5 Effects of multiple species inoculants with the capacities of ammoniation and nitrification on soil nitrogen mineralization rate(NMR) and organic fertilizer nitrogen mineralization rate(OMR)

3 结论

在培养过程中,油枯有机肥带入土壤中的铵态氮首先在土壤硝化菌群的作用下被转化为硝态氮,使土壤 NNR 达到小的峰值。然后,土壤和油枯有机肥中较易分解的有机氮氨化生成的铵态氮在土壤中累积,促进硝化作用的再次加剧,NNR 再次出现 1 个峰值。最后,油枯有机肥带入土壤中的不易分解的有机氮氨化生成铵态氮并在土壤中累积,再次促进硝化作用,使得 NNR 再次出现 1 个峰值,其中 YK 处理的峰值较小,持续的时间较短。YK+J1 和 YK+J2 处理的高硝化势维持时间长达 32 d,而 YK+J2 处理的高硝化势维持时间长达 53 d,表明添加氨化-硝化复合菌剂可以提高有机肥氮矿化过程的硝化势,提升硝化菌群的硝化活性,并延长菌群的活跃期。

油枯有机肥氮矿化过程表现为在培养的最初几天快速释放矿质氮,之后释放速率减慢。添加氨化-硝化复合菌剂对油枯有机肥氮矿化作用有较大促进效果,主要表现如下:(1)提高有机肥氮矿化后矿质氮累积量,培养 60 d 时 YK+J1 和 YK+J2 处理分别比 YK 处理高 62.2 mg/kg 和 57.9 mg/kg;(2)提高有机肥氮矿化率,YK+J1 和 YK+J2 处理分别比 YK 处理高 2.5 倍和 2.4 倍。

由本试验结果可以看出,添加氨化-硝化复合菌

剂可以明显加速油枯有机肥氮氨化和硝化过程,提高作物对有机肥氮的吸收,能更好地满足烟草前富后贫的氮素需求,解决油枯商品有机肥在有机烟种植和生态烟种植过程中氮素释放缓慢的问题。

参考文献:

- [1] 谢春琼,郭建芳,李成学,等. 添加微生物菌剂对油枯堆肥理化性状的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(9): 201-205.
- [2] 王良梅,刘树新,杨 丽. 污泥有机氮在林地土壤中的矿化动态[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2012, 36(5): 87-91.
- [3] 李俊良,韩琅丰,江荣风,等. 碳、氮比对有机肥料氮素释放和植物吸氮的影响[J]. 中国农业大学学报, 1996, 1(5): 57-61.
- [4] 李紫燕,李世清,李生秀. 黄土高原典型土壤有机氮矿化过程[J]. 生态学报, 2008, 28(10): 4940-4949.
- [5] 邵兴芳,徐明岗,张文菊,等. 长期有机培肥模式下黑土碳与氮变化及氮素矿化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 326-335.
- [6] 胡 诚,曹志平,胡 菊,等. 长期施用生物有机肥土壤的氮矿化[J]. 生态学报, 2009, 29(4): 2080-2086.
- [7] 马兴华,荣凡翻,苑举民,等. 云南曲靖烟区典型植烟土壤氮素矿化规律研究[J]. 中国烟草学报, 2011, 17(6): 66-69.
- [8] PARKER C F, SOMMERS L. Mineralization of nitrogen in sewage sludges[J]. Journal of Environmental Quality, 1983, 12(1): 150-156.
- [9] CHAE Y M, TABATABAI M A. Mineralization of nitrogen in soil amended with organic wastes I[J]. Journal of Environmental Quality, 1986, 15(2): 193-198.

- [10] CALDERON F J, MCCARTY G M, REEVES J B. Analysis of manure and soil nitrogen mineralization during incubation[J]. *Biology and Fertility Soils*, 2005, 41(5): 328-336.
- [11] CUSICK P R, POWELL J M, KELLING R F, et al. Dairy manure N mineralization estimates from incubations and litter bags[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2006, 43(2): 145-152.
- [12] 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, 1999: 156-157.
- [13] 朱剑兴, 王秋风, 何念鹏, 等. 内蒙古不同类型草地土壤氮矿化及其温度敏感性[J]. *生态学报*, 2013, 33(19): 6320-6327.
- [14] 李玲玲, 李书田. 有机肥氮素矿化及影响因素研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(3): 749-757.
- [15] 林先贵. 土壤微生物研究原理与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 223-236.
- [16] 陆景陵. 植物营养学(上册)[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1994: 17-25.
- [17] 朱祖祥. 土壤学(上册)[M]. 北京: 农业出版社, 1983: 192-194.
- [18] 朱兆良. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992: 37-59.
- [19] 周 博, 高佳佳, 周建斌. 不同种类有机肥碳、氮矿化特性研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2): 366-373.
- [20] 樊立辉, 关 华, 袁 玲. 施用发酵油枯对烟草品质与产量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(7): 3419-3420.

(责任编辑: 徐 艳)