

长期施肥对土壤微生物生物量碳、氮及矿质态氮含量动态变化的影响

梁斌¹, 周建斌^{1,2*}, 杨学云¹

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 利用位于陕西杨凌的 17 年长期定位试验研究了长期不施肥(CK)、单施化肥(F)、化肥配施有机肥(F+M)和化肥加秸秆还田(F+S)处理对小麦-玉米轮作体系中作物不同生长时期土壤微生物生物量碳、氮(SMBC、SMBN)和矿质态氮含量的影响。结果表明, 0—10 cm 土层土壤 SMBC、SMBN 和矿质态氮含量的变化范围分别为 264.8 ~ 752.2、37.5 ~ 114.8 和 3.8 ~ 38.5 mg/kg。不同处理相比, F+M 处理中各采样时期(小麦苗期、拔节期、灌浆期及玉米播种期、大喇叭口期、灌浆期和收获后)土壤 SMBC 和 SMBN 含量均为最高, 分别为不施肥对照的 1.38 ~ 2.65 和 1.89 ~ 2.50 倍; F+S 处理矿质态氮含量最高, SMBC 和 SMBN 也高于 F 和 CK 处理, 大部分采样时期的差异达显著水平($P < 0.05$); 与 CK 相比, 长期单施化肥也使各时期 SMBC 和 SMBN 含量提高。在小麦拔节期到灌浆期的旺盛生长阶段各施肥处理土壤 SMBN 含量均下降, 而矿质态氮含量变化不大, 处于较低水平; 在玉米大喇叭口期到灌浆期的旺盛生长阶段, F+M、F+S 和 F 处理土壤矿质态氮含量显著下降, 而 SMBN 含量均有所升高。表明在土壤矿质态氮含量较高时, 作物首先利用矿质态氮, 而在土壤矿质态氮含量处于较低水平时, 微生物固持的氮素可能会释放出来供作物吸收利用。

关键词: 小麦-玉米轮作; 长期施肥; 土壤微生物生物量碳、氮; 矿质态氮

中图分类号: S158.5

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2010)02-0321-06

Changes of soil microbial biomass carbon and nitrogen, and mineral nitrogen after a long-term different fertilization

LIANG Bin¹, ZHOU Jian-bin^{1,2*}, YANG Xue-yun¹

(1 College of Resource & Environment Science, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: A 17 year field experiment, located at Yangling, Shaanxi, was conducted to study effects of different fertilizer managements on changes of microbial biomass carbon and nitrogen (SMBC, SMBN) and mineral nitrogen in soils under the winter wheat and summer maize rotation system. There were 4 fertilizer managements, no fertilization (CK), mineral N, P, and K fertilizers (F), mineral N, P, and K fertilizers and manure (F+M), and mineral N, P, and K fertilizers and straw (F+S). The results show that contents of SMBC, SMBN and soil mineral nitrogen are 264.8 - 752.2, 37.5 - 114.8 and 3.8 - 38.5 mg/kg in the 0-10 cm soil layer, respectively. Contents of SMBC and SMBN in the F+M treatment are the highest among the different fertilizer treatments, and contents of SMBC and SMBN in the F+M treatment are 1.38 - 2.65 and 1.89 - 2.50 times of those in the no fertilizer treatment, respectively. Contents of soil mineral nitrogen of the F+S treatment are the highest among the different fertilizer treatments, and contents of SMBC, SMBN of the F+S treatment are higher than those of the F and CK treatments at all sampling times. Compared with the CK treatment, long-term application of mineral N, P, and K fertilizers increase SMBC and SMBN contents of 0-10 cm soil layer

收稿日期: 2009-02-20 接受日期: 2009-06-30

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2007BAD89B02); 国家自然科学基金项目(40571087); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金(10501-160)资助。

作者简介: 梁斌(1983-), 男, 山东昌乐人, 博士研究生, 主要从事土壤微生物量的研究。E-mail: liangbin@nwsuaf.edu.cn

* 通讯作者 Tel: 029-87082793, E-mail: jbzhou@nwsuaf.edu.cn

at every sampling time. SMBN contents in each fertilizer treatment from elongation stage to grain filling stage of winter wheat are decreased; however, soil mineral nitrogen contents are very low during this period. Soil mineral nitrogen contents in the F, F + M, and F + S treatments from pre-tasselling to grain filling stages of summer maize are decreased sharply, while, SMBN contents are increased. It is concluded that if there is enough mineral nitrogen in soil, crop would absorb it firstly, while if mineral nitrogen is limited, SMBN would be decomposed for crop uptake.

Key words: wheat-maize rotation system; long-term fertilization; soil microbial biomass C, N; mineral nitrogen

土壤微生物生物量是土壤中的活性营养库,调控着土壤养分的转化循环及有效性^[1]。土壤微生物生物量碳、氮(SMBC、SMBN)含量与环境、施肥及作物生长有密切关系。大量研究表明^[2-5],不同有机肥和化肥配合施用对土壤微生物生物量氮影响不同。微生物对施入氮素的固持与释放主要受施入的碳(如有机肥、秸秆等)和氮的种类和数量等因素支配^[6]。施入肥料的碳、氮比越高,土壤微生物对肥料氮的固持量越大,释放率降低^[7]。因此,在农业实践中,可以通过施用有机肥及秸秆还田技术,调节土壤碳、氮比,增加土壤微生物生物量氮库的容量,从而提高其在土壤氮素循环转化过程中的调控作用并减少氮肥损失。但是在提高微生物对氮素固持的同时,会不会因微生物和作物对氮素的竞争而影响作物的生长,以及微生物生物量氮在作物养分供应中所起的作用等都是值得关注的问题。

本试验以在黄土高原南部进行的长期定位试验为对象,研究了小麦-玉米轮作体系中不同施肥处理条件下土壤微生物生物量碳、氮及矿质态氮的动态变化,旨在揭示长期不同施肥处理对土壤微生物生物量碳、氮的影响及土壤微生物生物量氮与矿质态氮间的关系,为合理施肥,减少氮素损失,实现农业生态系统养分的良性循环提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地区概况

供试土壤采自国家黄土土壤肥力与肥料效益长期监测基地。基地位于陕西省杨陵区头道塬,海拔524 m,年均气温 13℃,年均降水量 632 mm,主要集中在 7、8、9 月份,年蒸发量 1400 mm,冬春易旱。土壤类型为褐土类,■土亚类,红油土属。该基地建于 1990 年,试验开始时耕层土壤基本理化性状为:有机质 10.92 g/kg,全氮 0.83 g/kg,碱解氮 61.32 mg/kg,速效磷 9.57 mg/kg,速效钾 191.2 mg/kg,pH 8.62。

1.2 试验设计

长期定位试验共设 24 个处理,本研究选取小麦

-玉米轮作体系中的对照(不施肥,CK)、单施化肥(F)、化肥配施有机肥(F+M)和化肥加秸秆还田(F+S)4个处理为研究对象。其中化肥中氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为硫酸钾,有机肥施用牛廐肥,每处理施肥量分别为 N 165 kg/hm²、P 57.6 kg/hm²、K 68.5 kg/hm²,F+M 处理中牛廐肥的使用量按含氮量折合成纯氮,占所施氮素总量的 70%,F+S 处理中当季所有收获的玉米秸秆还田,秸秆中所含氮、磷、钾未参与计算。化肥、廐肥及秸秆均于小麦播种前一次性施入。玉米生长期于小喇叭口期在 F、F+M 和 F+S 处理中追施化肥 N 187.5 kg/hm²、P 24.6 kg/hm²、K 77.8 kg/hm²。小区面积 14 m×14 m。每个小区按面积划分为 3 个等份,作为 3 次重复。

1.3 样品采集及测定

分别于 2007 年 1 月 3 日(小麦苗期)、2007 年 3 月 29 日(小麦拔节期)、2007 年 5 月 12 日(小麦灌浆期)、2007 年 6 月 10 日(小麦收获后/玉米播种期)、2007 年 7 月 27 日(玉米大喇叭口期)、2007 年 8 月 25 日(玉米灌浆期)和 2007 年 10 月 5 日(玉米收获后)在试验田相应处理内沿对角线方向采集耕层土壤,按 0—10 cm 和 10—20 cm 土层分开,每小区采 3 钻土壤混合,去作物残根和小石头,过 2 mm 筛,将土样分为两部分,一部分风干用于测定土壤理化性质,另一部分保存在 4℃ 冰箱中,用于土壤可溶性有机碳、氮,微生物生物量碳、氮和矿质态氮的测定。

土壤微生物生物量碳、氮的测定采用氯仿熏蒸浸提法^[8-9]:用 0.5 mol/L K₂SO₄ 浸提经氯仿熏蒸和未熏蒸土样(水土比 4:1),过滤后滤液中的有机碳用 TOC-5050 分析仪测定,全氮用过硫酸钾氧化比色法测定^[10-11]。土壤微生物生物量碳、氮含量以熏蒸和未熏蒸的有机碳、全氮含量之差分别除以 k_{EC} 和 k_{EN} 得到,其中 k_{EC} = 0.45^[9, 12]、k_{EN} = 0.54^[8]。

矿质态氮:用 0.5 mol/L K₂SO₄ 浸提土样(水土比 4:1),浸提液经过滤后,滤液中的 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 用流动分析仪测定,矿质态氮含量为 NO₃⁻-N

与 NH_4^+ -N 含量之和。

试验数据的方差分析及多重比较利用 SAS8.1 软件进行。

2 结果与分析

2.1 土壤微生物生物量碳动态变化

0—10 cm 土层 SMBC 含量范围为 264.8 ~ 752.2 mg/kg, 10—20 cm 土层为 126.9 ~ 444.6 mg/kg, 土层间差异显著 ($P < 0.05$) (图 1)。不同施肥处理相比,各采样时期 F + M 处理 0—10 cm 土层 SMBC 的含量均为最高,其次为 F + S 处理,CK 处理的最低; 10—20 cm 土层 SMBC 的含量也以 F + M 处理土壤最高,CK 处理的最低,其中 F + S 处理和 F 处理 SMBC 的含量差异较小。

图 1 可见,从小麦苗期到拔节期,0—10 cm 土层不同施肥处理 SMBC 的含量均增加,其中 F 和 CK 处理增幅达显著水平 ($P < 0.05$); 小麦收获后,上述 4 个处理土壤 SMBC 的含量与拔节期相比显著降低 ($P < 0.05$),降幅分别为 26.0%、28.1%、31.4% 和 20.1%。玉米生长期间 4 个施肥处理 0—10 和 10—20 cm 土层 SMBC 含量随玉米的生长逐渐升高,至玉米灌浆期 SMBC 含量达最高; 玉米收获后不同处理 SMBC 含量降低,其中 CK、F 处理 0—10 和 10—20 cm 土层和 F + S 处理 0—10 cm 土层 SMBN 含量的下降达显著水平 ($P < 0.05$)。

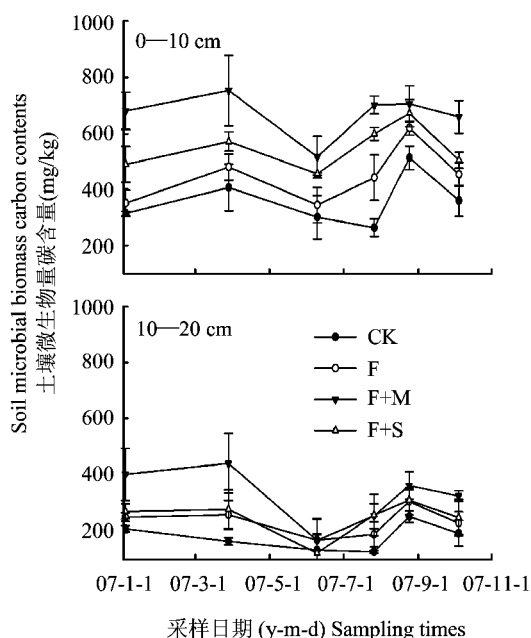


图 1 各施肥处理土壤微生物生物量碳含量动态变化
Fig.1 Changes of SMBC in different fertilizer treatments during wheat and corn growth

2.2 土壤微生物生物量氮动态变化

不同施肥处理土壤 0—10 cm 和 10—20 cm 土层 SMBN 含量顺序均为 $F + M > F + S > F > CK$, 各处理 0—10 cm 土层 SMBN 含量显著高于 10—20 cm 土层 ($P < 0.05$) (图 2)。与苗期相比,小麦拔节期 0—10 cm 土层所有施肥处理 SMBN 含量均显著增加 ($P < 0.05$),增幅为 18.0%—52.8%,这可能与小麦生长前期微生物对土壤中氮素的固持作用有关。从拔节期到灌浆期各施肥处理 SMBN 含量有所降低,其中以 F + S 处理的降幅最大,其次为 CK 处理,两处理土壤 SMBN 含量的下降均达显著水平 ($P < 0.05$),这可能是因为作物与微生物竞争氮素所致; 小麦收获后各施肥处理土壤 SMBN 含量又有所增加,其中 F 和 F + S 处理 0—10 cm 土层增幅分别为 21.3% 和 22.7%,达显著水平 ($P < 0.05$)。

从小麦收获后到玉米灌浆期不同施肥处理土壤 SMBN 含量一直呈增加的趋势,CK 和 F 处理 0—10 cm 土层土壤 SMBN 含量的增加达显著水平 ($P < 0.05$); 玉米收获后各施肥处理 0—10 cm 土层 SMBN 含量较玉米灌浆期显著降低 ($P < 0.05$),但在 10—20 cm 土层 SMBN 含量与玉米灌浆期无显著差异。

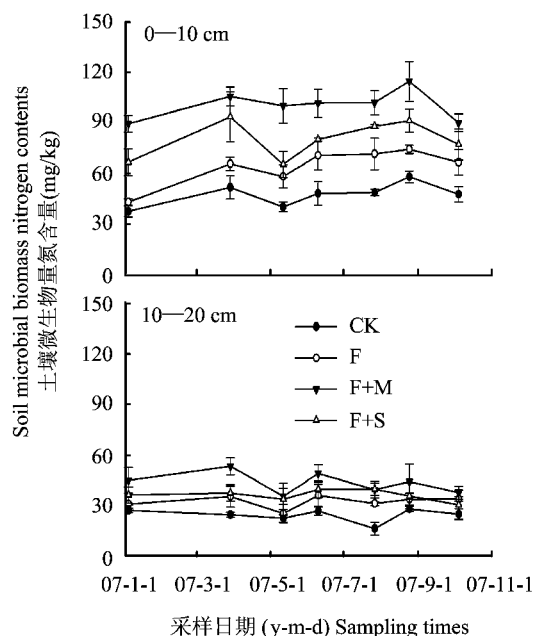


图 2 各施肥处理土壤微生物量氮含量动态变化
Fig.2 Changes of SMBN in different fertilizer treatments during wheat and corn growth

2.3 不同施肥处理土壤矿质态氮含量的动态变化

各采样时期 0—10 cm 和 10—20 cm 土层不同施肥处理土壤矿质态氮的含量以 F + S 处理最高, F 和

F + M 处理次之,CK 处理土壤矿质态氮含量最低(图 3)。

小麦苗期各处理土壤矿质态氮含量高于小麦其他生长时期,这与播种前施肥及小麦苗期对氮素吸收量相对较少有关。这一时期 F + M 处理 0—10 和 10—20 cm 土层土壤矿质态氮含量显著低于 F 处理,这是因为有机肥配合化肥施用后促进了土壤微生物对矿质态氮的固持和在施入有机肥后温度较低,有机氮矿化量较少所致。与苗期相比,小麦拔节期各施肥处理 0—10 cm 和 10—20 cm 土层土壤矿质态氮含量明显降低,CK、F、F + M 和 F + S 处理 0—10 cm 降幅分别为 27.4%、78.6%、52.9% 和 68.7%,10—20 cm 分别为 13.3%、79.7%、46.1% 和 70.7%。这一时期土壤矿质态氮含量的降低,一方面与小麦吸收有关,另一方面与土壤微生物对矿质态氮的固持有关。

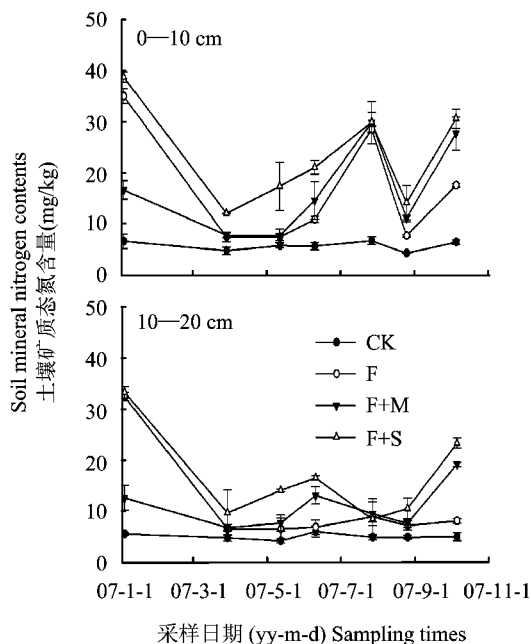


图 3 不同施肥处理矿质态氮含量动态变化

Fig.3 Changes of mineral N in different fertilizer treatments during wheat and corn growth

玉米生长期间由于小喇叭口期的追肥,使玉米大喇叭口期 F、F + M 和 F + S 处理 0—10 cm 土层土壤矿质态氮含量显著上升。玉米灌浆期生长旺盛,吸氮量多,从而使各处理 0—10 cm 土层土壤矿质态氮含量显著低于大喇叭口期 ($P < 0.05$)。到玉米收获时,由于土壤氮素矿化,各施肥处理 0—10 cm 和 10—20 cm 土层土壤矿质态氮含量又明显增加。这

时 F + M 处理土壤矿质态氮含量显著高于 F 处理,微生物固持氮的释放可能是玉米成熟期土壤矿质态氮含量增加的原因之一。

3 讨论

3.1 小麦-玉米轮作体系中的不同施肥处理土壤微生物生物量碳、氮含量变化的实质

本试验中对照由于长年不施肥,土壤中有效养分匮乏,作物生长量低,通过根系及地上部分残茬归还到土壤中的有机物相对较少,因此,在小麦和玉米生长期间土壤微生物生物量碳、氮及矿质态氮含量均处在最低水平,因此该处理作物与微生物对氮素竞争作用明显。小麦和玉米生长期间 F + S 处理土壤微生物生物量碳、氮含量均高于 CK 和 F 处理,这与这一处理给土壤中补充了丰富的有机物碳、氮有关。

F + M 处理与 F 处理相比,两者矿质态氮含量除小麦苗期外,其他各采样时期相差不大,但是 F + M 处理中 SMBN 含量显著地高于 F 处理。高出的这部分氮素除部分来源于施入的牛廐肥和土壤原有的氮素外,还有一部分可能来源于施入的化学氮肥。韩晓日等^[13]通过同位素标记研究发现,玉米生长期间,有机肥与化肥配施处理中 SMBN 来源于施入化肥的比例为 8.5%—41.5%,来源于土壤氮的比例为 40.4%—49.6%,并且随着玉米的生长,来源于化肥的比例增加。F + M 和 F 处理施氮量一致,但 SMBN 含量一直显著高于 F 处理,这也说明土壤微生物对氮素起到了很好的固持作用,减少了氮素的损失。

有机物料与化肥配合施用使土壤微生物固定无机氮的能力增强,但固定量和固定强度因碳源物质、施用量和腐解条件而异^[14-15]。本试验 F + M 处理施入的是腐熟的牛廐肥,这部分有机物料 C/N 比较低,含有大量的可溶性有机物^[16],既可以提供碳源,又可补充有效氮源,从而最大程度地促进了微生物的生长、繁衍。Saetre 等^[6]利用¹⁵N 标记试验也表明,碳氮比低的有机物料更能够促进微生物生物量的提高而加快碳素和氮素的循环。在 F + S 处理中,施入的玉米秸秆 C/N 比较高,而且秸秆中的有机物结构复杂,再加上所施的秸秆体积较大,与牛廐肥相比,不易被微生物迅速分解利用,从而使微生物对氮素的固定较少,导致 F + S 处理土壤微生物生物量碳、氮低于 F + M 处理,矿质态氮含量高于 F + M 处理。Ocio 等^[17]也指出,不同碳源物质对无机氮的微生物固持影响很大。所以就施用有机物料来说,施

用有机肥比施用秸秆更能够促进微生物生物量的提高,增加矿质态氮的固定,降低氮素损失。

综上所述,小麦-玉米轮作体系中作物不同生长期不同施肥处理土壤微生物量碳、氮含量差异显著,这是土壤微生物对进入土壤中不同碳源和氮源综合利用的反应。在农业生产中通过有机物料和化肥配合施用,调节土壤中碳、氮比,不仅保持了土壤中原有的氮素,而且对施入的化学氮肥也有很好的保氮作用。如何协调二者的关系,在保证作物氮素供应的前提下减少氮的损失,达到以碳调氮的作用,是值得进一步深入研究的问题。

3.2 土壤微生物生物量氮与矿质态氮含量间的关系

在小麦拔节期到灌浆期的旺盛生长阶段,各施肥处理土壤 SMBN 含量均下降,而矿质态氮含量变化不大,处于较低水平,旺盛生长的小麦所吸收的氮有可能来源于微生物生物量氮的释放。Robertson 等^[18]的培养试验结果表明,土壤新矿化的无机氮有 55%~89% 来自土壤微生物生物量氮; Singh 等^[19]在贫瘠的热带森林和草原上的研究表明,在植物迅速生长阶段,氮的矿化作用加强,土壤微生物生物量氮含量降低。韩晓日等^[20]的盆栽试验发现,在作物生长过程中土壤微生物生物量氮的减少量与该时期内土壤矿质态氮的增加量呈极显著相关。这些都说明在微生物体内固定的氮是植物所需氮源的重要来源。但在玉米旺盛生长期(大喇叭口期到灌浆期),F + M、F + S 和 F 土壤矿质态氮含量显著下降,而在这 3 个处理中 SMBN 含量均升高,这与玉米生长期小喇叭口期追施的化学氮肥有关。

由此可以认为,土壤微生物生物量氮含量与土壤矿质态氮含量间具有此消彼长的趋势。在土壤矿质态氮含量较高时(玉米小喇叭口期),植物首先利用土壤中的矿质态氮,而在土壤矿质态氮含量处于较低水平时(小麦拔节期),微生物固持的氮可能会释放出来,供作物吸收利用。因此有必要采用¹⁵N 的方法定量研究作物生长期土壤微生物对氮的固持与释放,以评价其在协调土壤氮素供应中的作用。

参 考 文 献:

[1] McGill W B, Cannon K R, Robertson J A, Cook F D. Dynamics of soil microbial biomass and water-soluble organic C in Breton L after 50 years of cropping to two rotations [J]. *Can. J. Soil Sci.*, 1986, 66(1): 1-19.

[2] Araujo A S F, Santos V B, Monteiro R T R. Responses of soil microbial biomass and activity for practices of organic and conventional farm-

ing systems in Piaui state, Brazil [J]. *Eur. J. Soil Biol.*, 2008, 44(2): 225-230.

[3] Hrusikesh P, Lingaraj P, Swain S C *et al.* Effect of organic source and nitrogen levels on soil microbial biomass nitrogen in rice under rice-wheat cropping system [J]. *Asian J. Exp. Sci.*, 2009, 23(1): 109-113.

[4] Kong W D, Zhu Y G, Fu B J *et al.* Effect of long-term application of chemical fertilizers on microbial biomass and functional diversity of a black soil [J]. *Pedosphere*, 2008, 18(6): 801-808.

[5] Li F, Liang W, Zhang X *et al.* Changes in soil microbial biomass and bacterial community in a long-term fertilization experiment during the growth of maize [J]. *Adv. Environ. Biol.*, 2008, 2(1): 1-8.

[6] Saetre P, Stark J M. Microbial dynamics and carbon and nitrogen cycling following re-wetting of soils beneath two semi-arid plant species [J]. *Oecol.*, 2005, 142(2): 247-260.

[7] 唐玉霞,孟春香,贾树龙,等.不同碳氮比肥料组合对肥料氮生物固定、释放及小麦生长的影响[J].*中国生态农业学报*, 2007, 15(2): 37-40.

Tang Y X, Meng C X, Jia S L *et al.* Effects of different C/N combinations of fertilizers on biological fixation and release of nitrogen fertilizer and wheat growth [J]. *Chin. J. Eco-Agric.*, 2007, 15(2): 37-40.

[8] Brookes P C, Landman A, Pruden G, Jenkinson D S. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil [J]. *Soil Biol. Biochem.*, 1985, 17(6): 837-842.

[9] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil Biol. Biochem.*, 1987, 19(6): 703-707.

[10] Cabrera M L, Beare M H. Alkaline persulfate oxidation for determining total nitrogen in microbial biomass extracts [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57(4): 1007.

[11] Norman R J, Edberg J C, Stucki J W. Determination of nitrate in soil extracts by dual-wavelength ultraviolet spectrophotometry [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1985, 49(5): 1182-1185.

[12] Wu J, Joergensen R G, Pommerening B *et al.* Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction-an automated procedure [J]. *Soil Biol. Biochem.*, 1990, 22: 1167-1169.

[13] 韩晓日,郑国砥,刘晓燕,等.有机肥与化肥配合施用土壤微生物量氮动态、来源和供氮特征[J].*中国农业科学*, 2007, 40(4): 765-772.

Han X R, Zheng G D, Liu X Y *et al.* Dynamics, sources and supply characteristic of microbial biomass nitrogen in soil applied with manure and fertilizer [J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2007, 40(4): 765-772.

[14] 廖先苓,周卫军,何电源.¹⁵N 标记羊粪和稻草还田氮素的转化和效应的研究[J].*土壤学报*, 1995, 32(3): 292-299.

Liao X L, Zhou W J, He D Y. Comparison of N transformation and its effect on rice yield between direct application of ¹⁵N-labelled rice straw and application of goat feces after feeding goat with rice straw [J]. *Acta. Pedol. Sin.*, 1995, 32(3): 292-299.

[15] 沈其荣,余玲,刘兆普.有机无机肥料配合施用对滨海盐土土

- 壤生物量态氮及土壤供氮特征的影响[J].土壤学报,1994,31(3): 287-294.
- Shen Q R, Yu L, Liu Z P. Effects of combining application of organic and inorganic nitrogen fertilizers on biomass nitrogen and nitrogen-supplying characteristics of coastal saline soil [J]. Acta. Pedol. Sin., 1994, 31(3): 288-294.
- [16] 赵满兴,周建斌,陈竹君,杨绒.有机肥中可溶性有机碳、氮含量及其特性[J].生态学报,2007,27(1): 397-403.
- Zhao M X, Zhou J B, Chen Z J, Yang R. Concentration and characteristics of soluble organic nitrogen (SON) and carbon (SOC) in different types of organic manures [J]. Acta Ecol. Sin., 2007, 27(1): 397-403.
- [17] Ocio J A, Brookes P C, Jenkinson D S. Field incorporation of straw and its effects on soil microbial biomass and soil inorganic N [J]. Soil Biol. Biochem., 1991, 23(2): 171-176.
- [18] Robertson K, Schntürer J, Clarholm M *et al.* Microbial biomass in relation to C and N mineralization during laboratory incubations [J]. Soil Biol. Biochem., 1988, 20(3): 281-286.
- [19] Singh J S, Raghubanshi A S, Singh R S, Srivastava S C. Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna [J]. Nature, 1989, 338(6215): 499-500.
- [20] 韩晓日,邹德乙,郭鹏程,陈恩凤.长期施肥条件下土壤生物量氮的动态及其调控氮素营养的作用[J].植物营养与肥料学报,1996,2(1): 16-22.
- Han X R, Zou D Y, Guo P C, Chen E F. Change of soil biomass and its role in adjusting-controlling nitrogen nutrition under long-term fertilization conditions [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1996, 2(1): 16-22.