

# 通过调节土壤氮素转化提高有机物料对红壤酸度的改良效果<sup>①</sup>

刘源<sup>1,2</sup>, 袁金华<sup>1,2</sup>, 钱薇<sup>1</sup>, 徐仁扣<sup>1\*</sup>

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008;

2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 通过培养试验, 比较研究了油菜秸秆、稻草、香樟叶和豌豆秸秆单独施用以及油菜秸秆、稻草和香樟叶与豌豆秸秆混合施用对红壤酸度的改良效果。结果表明, 在 60 天培养期内, 添加 4 种物料均提高了土壤 pH。培养试验结束时香樟叶、油菜秸秆、豌豆秸秆和稻草分别使土壤 pH 相对对照增加 0.53、0.42、0.30 和 0.26。对于灰化碱含量很高的非豆科物料如香樟, 其对土壤酸度的改良效果主要来源于物料所含碱性物质和物料对土壤硝化反应的抑制, 但对灰化碱含量较低的非豆科物料如油菜秸秆和稻草, 其改良效果主要来源于后者。豆科类豌豆秸秆主要通过所含碱性物质和有机氮矿化提高土壤 pH, 但培养试验后期铵态氮硝化反应释放的质子抵消了其部分改良效果。将油菜秸秆、稻草和香樟叶与豌豆秸秆配合施用, 使硝化反应受到一定程度的抑制, 提高了物料对土壤酸度的改良效果。培养试验结束时, 香樟叶、稻草和油菜秸秆与豌豆秸秆配合施用比豌豆秸秆单独施用土壤 pH 分别高 0.25、0.18 和 0.12。研究发现, 香樟叶灰化碱含量很高, 无论单独施用, 还是与豌豆秸秆配合施用均有很好的改良效果, 因此在南方地区推广种植香樟可以通过其凋落物修复酸化的森林土壤。

**关键词:** 植物物料; 红壤; 酸度改良; 氮素转化

**中图分类号:** S153

我国长江以南广泛地分布着大面积的酸性红黄壤, 铝毒和肥力水平低是这类土壤上植物生长不良的主要原因。酸化不仅导致农作物减产, 而且使农产品的品质下降<sup>[1]</sup>。施用石灰等碱性物质可以有效中和土壤酸度, 降低铝对植物的毒害<sup>[2]</sup>。近年来的研究发现, 一些农作物秸秆等农业废弃物也能中和土壤酸度, 但农业废弃物对土壤酸度的改良效果既与这些有机物料中碱性物质含量有关, 又与物料施入土壤后所发生的生物化学反应有密切联系<sup>[3-8]</sup>。一般豆科类植物物料的碱性物质含量高于非豆科类植物物料, 而且豆科类植物物料还含有较多的有机氮, 当植物物料施入土壤后, 碱性物质可以直接中和土壤酸度, 有机氮矿化形成  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的反应也消耗土壤中的质子, 这使得改良试验的初期豆科类植物物料表现出对土壤酸度很好的改良效果, 但随着时间增加, 有机氮矿化产生的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  发生硝化反应, 这一反应释放的质子导致土壤 pH 下降, 因此矿化产生的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的硝化反应释放的质子抵消了豆科物料对酸性土壤的部分改良效果, 使其改良酸性土壤的潜力不能充分发挥<sup>[7,9-10]</sup>。Mao 等<sup>[11]</sup>通过添加硝化抑制剂双氰胺抑制土壤酸度改良过程中的硝化反

应, 使豆科物料的改良效果大幅度提高。但双氰胺是人工合成的化学物质, 如能通过不同物料的合理配比, 以改变物料中氮在土壤中转化的方向, 达到提高豆科物料改良土壤酸度的目的, 则意义更大。本文比较了稻草、油菜秸秆、香樟叶与豌豆秸秆配合施用与单独施用对红壤酸度的改良效果, 探讨混施物料改良红壤酸度的机制, 研究结果可为酸性土壤高效有机改良剂的研发提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 土壤和植物物料

供试红壤(淋溶土-中国土壤系统分类)采自安徽郎溪县旱地农田, 采样深度为 0~10 cm, 土壤 pH 4.3 (1:2.5 土水比), 土壤有机质 16.49 g/kg, 土壤交换性  $\text{H}^+$  和  $\text{Al}^{3+}$  分别为 0.20 和 5.97  $\text{cmol}_{(+)}/\text{kg}$ , 土壤交换性  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  分别为 0.53、0.68、4.92、0.35  $\text{cmol}_{(+)}/\text{kg}$ 。土壤样品风干、磨细后过 2 mm 筛备用。试验中所用豌豆秸秆、稻草、油菜秸秆采自南京郊区, 香樟叶采自安徽郎溪, 将植物物料在 80℃ 下烘干、磨细后过 2 mm 筛备用。植物物料化学成分列于表 1。

①基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2009BAD6B02)资助。

\* 通讯作者 (rkxu@issas.ac.cn)

作者简介: 刘源 (1988—), 女, 河南南阳人, 博士研究生, 主要从事土壤电化学研究。E-mail: liuyuan@issas.ac.cn

表 1 有机物料的化学组成

Table 1 Contents of elements and ash alkalinity of plant materials used

植物物料	灰化碱 (cmol/kg)	总盐基阳离子 (cmol/kg)	总 N (g/kg)	总 C (g/kg)	C/N 比
油菜秸秆	43.3	35.0	1.9	457	241
稻草	33.6	45.0	8.7	412	47
豌豆秸秆	61.6	79.5	35.0	436	12
香樟叶	89.4	97.4	10.3	506	49

注：总盐基阳离子为  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$  和  $\text{Na}^+$  含量的总和。

## 1.2 培养试验

称取 200 g 过 2 mm 筛的风干土放入塑料杯中，按土重 20 g/kg 比例加入植物物料，将土样与植物物料混合均匀，用去离子水将混合体系的含水量调节至田间持水量的 70%，以保证土壤呈湿润和通气状态。用塑料保鲜膜将塑料杯封口，并在保鲜膜中间留一个小孔，以便气体交换并减少水分损失。然后将烧杯置于 25°C 的恒温培养箱中培养，每隔 3 天称重一次并补充水分，以保持土壤含水量恒定。在培养开始后的第 5、10、20、30、40、50、60 天取新鲜土样测定 pH 值，另取一份土样风干后测定土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)\text{-N}$ 。培养试验持续 60 天，培养结束后将土壤样品取出风干，磨细过 1 mm 筛备用。培养试验共设置对照、稻草、油菜秸秆、香樟叶、豌豆秸秆、稻草+豌豆秸秆、油菜秸秆+豌豆秸秆和香樟叶+豌豆秸秆等处理，每个处理设 3 次重复。

## 1.3 培养后土壤分析方法

按 1:2.5 的土水比制备土壤悬液，用复合 pH 电极测定土壤 pH。土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)\text{-N}$  用 2 mol/L 的 KCl 浸提，浸提液中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)\text{-N}$  用流动分析仪测定。

## 1.4 数据处理

采用 SPSS 15.0 统计软件对数据进行统计分析。

## 2 结果和讨论

### 2.1 植物物料单独施用对土壤 pH、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)\text{-N}$ 含量的影响

添加豌豆秸秆、香樟叶、油菜秸秆和稻草对土壤 pH 的影响如图 1 所示。不加有机物料的对照处理，培养过程中土壤 pH 呈逐渐降低的趋势，表明土壤发生进一步酸化。这是因为该土壤采自农田表层，含有一定的残留  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 。培养期间， $\text{NH}_4^+\text{-N}$  发生硝化反应，释放  $\text{H}^+$ ，使 pH 不断降低。图 2 和图 3 中土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)\text{-N}$  的动态变化结果证明了

这一点，随着培养时间增加，对照处理土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量逐渐减小（图 2），但土壤  $(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)\text{-N}$  含量显著增加（图 3），说明土壤中发生了硝化反应，并导致土壤 pH 下降。与对照相比，添加 4 种植物物料均显著提高了土壤 pH ( $P < 0.05$ )，说明植物物料对土壤酸度起到了一定程度的改良作用。但不同物料的改良效果存在差异，60 天培养试验结束时香樟叶、油菜秸秆、豌豆秸秆和稻草分别使土壤 pH 值相对对照增加 0.53、0.42、0.30 和 0.26，香樟叶的改良效果最好，其次是油菜秸秆，豌豆秸秆和稻草的改良效果较差。3 种非豆科植物物料对土壤酸度的改良效果与它们的灰化碱的含量大小一致（表 1），说明物料碱含量越高，对土壤酸度的改良效果越好。虽然豌豆秸秆的灰化碱含量较高，但由于培养过程中氮素转化释放的质子抵消了其对土壤酸度的部分改良效果，使最终的改良效果较小。这可从培养过程中土壤 pH、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)\text{-N}$  的动态变化得到解释。

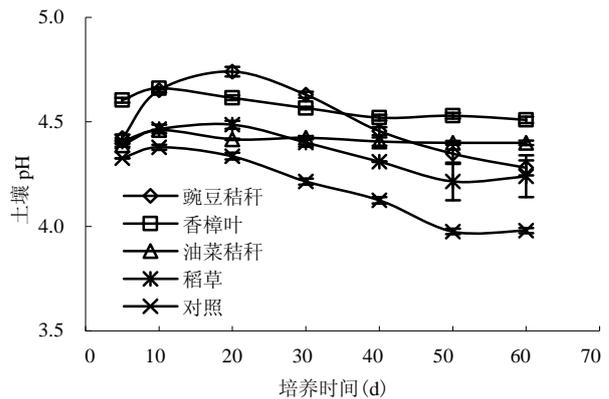
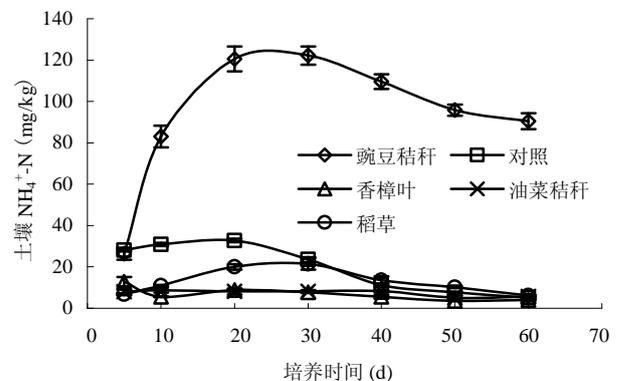


图 1 添加植物物料对培养过程中土壤 pH 动态变化的影响

Fig. 1 Effects of plant materials on dynamics of soil pH during incubation

图 2 添加植物物料对土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  动态变化的影响Fig. 2 Effects of plant materials on dynamics of soil  $\text{NH}_4^+\text{-N}$

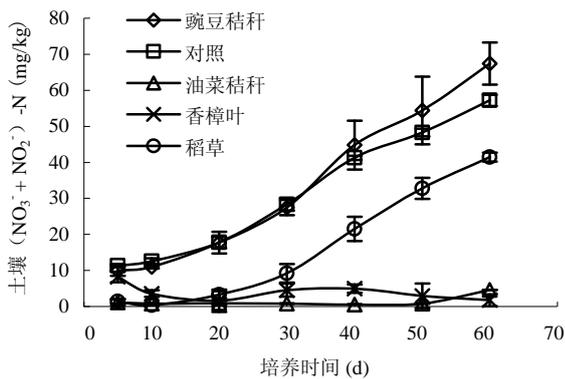


图3 添加植物物料对土壤 $(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)\text{-N}$ 动态变化的影响

Fig. 3 Effects of plant materials on dynamics of soil  $(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)\text{-N}$

添加豌豆秸秆处理, 土壤 pH 先随培养时间增加而升高, 在 20 天时达最大, 然后随培养时间的进一步增加而下降。豌豆属于豆科植物, 秸秆中有机氮含量高, 培养过程中氮素的形态转化及伴随的质子的产生和消耗是土壤 pH 发生先升后降变化的主要原因<sup>[9-10]</sup>。图 2 中的结果表明, 添加豌豆秸秆处理, 土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  随培养时间增加显著增加, 约 25 天时达最大, 随后随培养时间的进一步增加而减小。这说明培养试验初期, 豌豆秸秆中的有机氮在土壤中发生矿化反应转化为  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , 这一过程消耗质子, 导致土壤 pH 升高。随后土壤中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  发生硝化反应, 导致  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量减小,  $(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)\text{-N}$  含量显著增加 (图 3)。土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  与  $(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)\text{-N}$  的动态变化与土壤 pH 的动态变化相吻合。因此, 硝化反应释放质子, 导致土壤 pH 下降, 这是培养试验后期土壤 pH 持续下降的主要原因。添加香樟叶和油菜秸秆处理, 培养过程中土壤 pH 波动很小, 添加稻草处理培养试验后期土壤 pH 有所下降。非豆科物料中碱性物质 (灰化碱) 可以直接中和土壤酸度, 是它们对土壤酸度有改良效果的主要原因。另一方面, 非豆科植物物料对土壤氮素转化的影响是土壤 pH 变化的另一个重要原因。如图 2 和图 3 所示, 添加香樟叶和油菜秸秆处理, 培养过程中土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)\text{-N}$  一直处于很低水平, 说明添加这两种非豆科物料使土壤无机氮转化为土壤有机氮。从表 1 可知, 两种物料的总氮含量很低, C/N 比很高, 可以促进土壤无机氮向有机氮转化。由于抑制了土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的硝化, 阻止了土壤 pH 的下降, 间接增加了它们对土壤的改良效果。

对于灰化碱含量很低的非豆科类植物物料, 抑制土壤中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的硝化反应是其改良土壤酸度的主要机制。如图 4 所示, 培养试验中, 当油菜秸秆的添加

量由土重的 1% 提高到 2%, 土壤 pH 并未明显提高。假如油菜秸秆的改良效果主要来自灰化碱的作用, 土壤 pH 应随油菜秸秆加入量的增加, 即碱性物质加入量的增加而增加。因为 1% 的油菜秸秆已经足够将土壤中的无机氮转化为有机氮 (图 2 和图 3), 提高油菜秸秆用量对土壤 pH 影响很小。

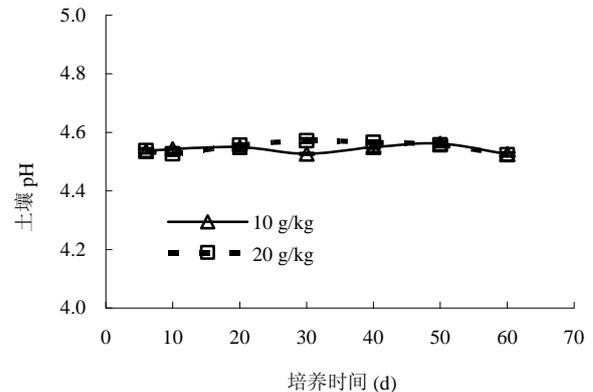


图4 油菜秸秆添加量对土壤 pH 的影响

Fig. 4 Effects of amount of canola straw added on soil pH

## 2.2 非豆科植物物料与豌豆秸秆配合施用对土壤 pH、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)\text{-N}$ 含量的影响

由上文分析可知, 培养试验中豌豆秸秆有机氮矿化产生的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  在土壤中发生硝化反应, 这一过程释放的质子抵消了其对土壤酸度的改良效果。与之相反, 香樟叶、油菜秸秆和稻草等非豆科植物物料, 由于 C/N 比高, 添加这些物料可以促进土壤无机氮向有机氮转化。将豆科物料与非豆科物料配合施用, 可以发挥各自的特点, 通过调节氮素形态转化提高物料对土壤酸度的改良效果。图 5 结果表明, 将香樟叶、稻草与豌豆秸秆配合使用, 培养试验期间两种物料配合施用处理的土壤 pH 均高于单独添加豌豆秸秆处理。油菜秸秆与豌豆秸秆配合施用处理, 虽然培养试验前期, 土壤 pH 低于单独添加豌豆秸秆处理, 但 30 天后两者顺序发生改变。培养试验结束时, 香樟叶、稻草和油菜秸秆与豌豆秸秆配合施用处理的土壤 pH 分别比对照提高 0.55、0.48 和 0.42, 比单施豌豆秸秆处理提高 0.25、0.18 和 0.12。两种物料配合施用, 一方面碱性物质数量增加, 另一方面土壤氮素转化发生改变。如图 6 和图 7 所示, 香樟叶、油菜秸秆与豌豆秸秆配合施用处理土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)\text{-N}$  含量均显著低于单施豌豆秸秆处理, 说明非豆科物料与豌豆秸秆配合施用改变了体系的 C/N 比, 影响氮素的转化, 使有机氮的矿化和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的硝化均受到明显的抑制。特别是对硝化反应的抑制, 使改良过程中质子的释放量减小, 间

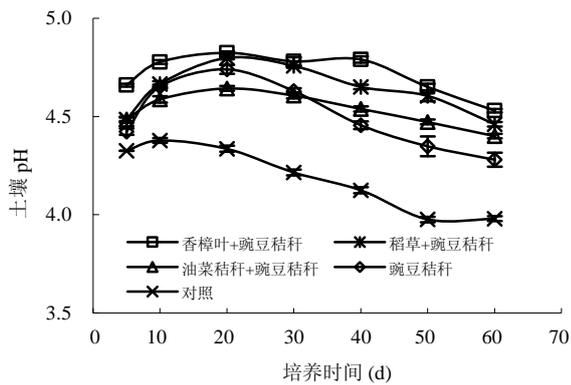


图 5 非豆科物料与豌豆秸秆配合施用对土壤 pH 动态变化的影响

Fig. 5 Effects of incorporation of non-legume materials with pea straw on dynamics of soil pH

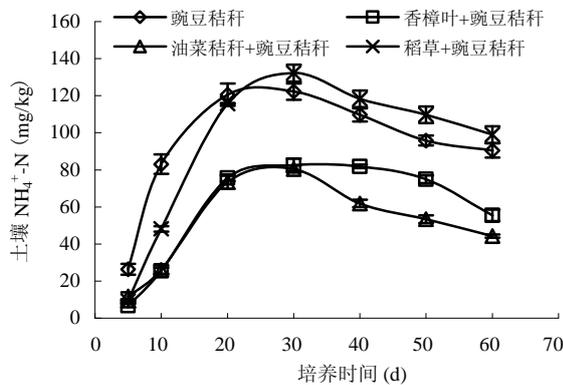


图 6 非豆科物料与豌豆秸秆配合施用对土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  动态变化的影响

Fig. 6 Effects of incorporation of non-legume materials with pea straw on dynamics of soil  $\text{NH}_4^+\text{-N}$

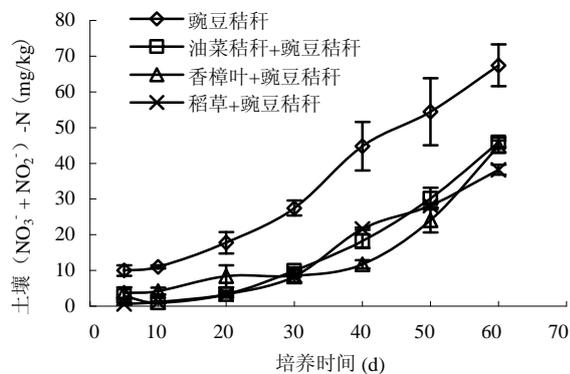


图 7 非豆科物料与豌豆秸秆配合施用对土壤  $(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)\text{-N}$  动态变化的影响

Fig. 7 Effects of incorporation of non-legume materials with pea straw on dynamics of soil  $(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)\text{-N}$

接提高了豆科物料的改良效果。因此，将含氮量和碱性物质含量低的非豆科植物物料与含氮量高的植物物料配合施用，可以减缓物料中有机氮向无机氮转化的速度，提高物料对酸性土壤的改良效果。

研究结果还表明，香樟叶碱性物质含量很高（表 1），无论单独施用还是与豌豆秸秆配合施用均取得很好的改良土壤酸度的效果。香樟是我国南方地区的常见树种，在酸性土壤上种植香樟，可以利用其凋落物中和土壤酸度，提高土壤 pH。特别对自然植被下的酸性土壤，可以利用香樟建立酸化土壤的生物修复方法。通过广泛的推广和种植，达到修复大面积酸化森林土壤的目的。

### 3 结论

油菜秸秆和稻草等氮和灰化碱含量低的物料主要通过抑制土壤中残留  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的硝化反应对红壤酸度起间接改良作用，香樟叶灰化碱含量高，氮含量低，它既可直接中和土壤酸度，又可抑制硝化反应，表现出对红壤酸度很好的改良效果。豌豆秸秆由于含有大量有机氮，其矿化产生的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的硝化反应抵消了其部分对红壤酸度的改良效果。将油菜秸秆、稻草和香樟叶与豌豆秸秆配合施用，由于非豆科有机物料对培养过程硝化反应的抑制作用，有机物料对土壤酸度的改良效果提高。

### 参考文献:

- [1] 王辉, 徐仁扣, 黎星辉. 施用碱渣对茶园土壤酸度和茶叶品质的影响. 生态与农村环境学报, 2011, 27(1): 75-78
- [2] Adams F. Soil Acidity and Liming. 2nd ed. Agronomy 12. Madison, WI: Am. Soc. Agron., Crop Sci. Soc. Am. and Soil Sci. Soc. Am., 1984
- [3] Noble AD, Zenneck I, Randall PJ. Leaf litter ash alkalinity and neutralization of soil acidity. Plant and Soil, 1996, 179: 293-302
- [4] Pocknee S, Sumner ME. Cation and N contents of organic matter determine its soil liming potential. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61: 86-92
- [5] Tang C, Sparling GP, McLay CDA, Raphael C. Effect of short-term legume residue decomposition on soil acidity. Australian Journal of Soil Research, 1999, 37: 561-573
- [6] Yan F, Schubert S. Soil pH changes after application of plant shoot materials of faba bean and wheat. Plant and Soil, 2000, 220: 279-287
- [7] Xu RK, Coventry DR. Soil pH changes associated with lupin and wheat plant materials incorporated in a red-brown earth soil. Plant

- and Soil, 2003, 250(1): 113-119
- [8] Xu JM, Tang C, Chen ZL. The role of plant residues in pH change of acid soils differing in initial pH. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38: 709-719
- [9] 毛佳, 徐仁扣, 黎星辉. 豆科植物物料中氮的转化对其改良茶园土壤酸度的影响. *生态与农村环境学报*, 2009, 25(4): 42-45, 99
- [10] Wang N, Xu RK, Li JY. Amelioration of an acid Ultisol by agricultural by-products. *Land Degradation and Development*, 2011, 22(6): 513-518
- [11] Mao J, Xu RK, Li JY, Li XH. Effect of dicyandiamide on liming potential of two legume materials when incubated with an acid Ultisol. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(9): 1632-1635

## Increase in Ameliorating Effects of Crop Residues on An Acidic Red Soil Through Adjustment of Nitrogen Transformation

LIU Yuan<sup>1,2</sup>, YUAN Jin-hua<sup>1,2</sup>, QIAN Wei<sup>1</sup>, XU Ren-kou<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The amelioration effects of black locust leaves, straws of canola, rice and pea on acidity of a red soil from Anhui Province were investigated with incubation experiments. The results showed that the addition of the plant materials increased soil pH to some extent compared with control during 60-day incubation. At the end of incubation, soil pH increased by 0.53, 0.42, 0.30 and 0.26 units as a result of the incorporation of black locust leaves, and straws of canola, pea and rice. The increased extent of soil pH was consistent with the amount of ash alkalinity in the plant materials. The black locust leaves increased soil pH to greatest extent among these organic materials due to the greater ash alkalinity of the plant materials and nitrification inhibiting. Straws of rice and canola increased soil pH mainly through nitrification inhibiting in the soil. Pea straw increased soil pH through ash alkalinity and mineralization of organic N in the plant material. While in the later stage of incubation, the nitrification of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  from the mineralization of organic N released  $\text{H}^+$  and decreased soil pH, which reduced the final amelioration of the material on soil acidity. The incorporation of black locust leaves and straws of rice and canola together with pea straw, the amelioration effect of plant materials on the acid soil increased due to the inhibiting of nitrification. Soil pH increased respectively by 0.25, 0.18 and 0.12 units as a result of incorporation of black locust leaves and straws of rice and canola together with pea straw compared with single incorporation of pea straw. We found that incorporation of black locust leaves singly or together with pea straw had greater amelioration effect on acid soils. Thus bio-remediation method can be developed with black locust to ameliorate acidic forest soils in south of China.

**Key words:** Plant materials, Red soil, Amelioration of soil acidity, Nitrogen transformation