

# 畜禽有机肥氮、磷在红壤中的矿化特征研究

杨蕊<sup>1,2</sup>, 李裕元<sup>2\*</sup>, 魏红安<sup>1,2</sup>, 高茹<sup>2</sup>, 石辉<sup>1\*</sup>, 吴金水<sup>2</sup>

(1 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西西安 710055;

2 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 湖南长沙 410125)

**摘要:** 选用腐熟的猪粪、鸡粪和第四纪红土发育的典型红壤为试验材料, 通过室内培养试验, 研究了土壤中矿质氮 ( $\text{NO}_3^- \text{-N}$  和  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ ) 及 Olsen-P 的动态变化。结果表明, 有机肥中氮和磷的矿化具有不同特征。氮在红壤中的矿化阶段为: 前 4 周缓慢释放, 矿化速率为  $\text{N } 0.29 \sim 0.46 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ; 4~10 周快速释放, 矿化速率为  $\text{N } 0.60 \sim 0.71 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ; 10~15 周缓慢下降, 矿化速率为  $\text{N } -0.20 \sim -0.09 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ; 而磷的矿化释放则主要发生在第 3 周。施用畜禽有机肥可以显著增加红壤中矿质氮和 Olsen-P 的含量, 但施肥量对有效氮磷的释放过程无显著影响。连续培养 15 周, 鸡粪矿质氮释放率 (15.6%~18.3%) 与猪粪的 (14.8%~16.9%) 接近, 而猪粪的有效磷释放率 (34.0%~41.6%) 显著高于鸡粪的 (30.2%~37.8%)。表明有机肥施入土壤后, 经过 15 周仍会有 60%~80% 未被矿化或矿化后被重新固定的氮、磷残留在土壤中。

**关键词:** 畜禽有机肥; 氮矿化速率; 矿质氮; 有效磷; 氮磷释放率; 红壤

中图分类号: S141.3; S147.2

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2011)03-0600-08

## Study on the nitrogen and phosphorus mineralization of livestock and chicken manure in red soil

YANG Rui<sup>1,2</sup>, LI Yu-yuan<sup>2\*</sup>, WEI Hong-an<sup>1,2</sup>, GAO Ru<sup>2</sup>, SHI Hui<sup>1\*</sup>, WU Jin-shui<sup>2</sup>

(1 College of Environment and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology,

Xi'an 710055, China; 2 Laboratory for Agro-Ecological Processes in Subtropical Region, Institute of

Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

**Abstract:** A laboratory incubation experiment was conducted using composted chicken and pig manures and red soil which derived from Quaternary red clay. The dynamic changes in mineral nitrogen ( $\text{NO}_3^- \text{-N}$  and  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ ) and soil available phosphorus (Olsen-P) were studied under different manure application rates. Results showed that the mineralization of N and P significantly differed. The N mineralization phases were: slow release stage in the initial 4-week with mineralization rates (MR)  $\text{N } 0.29 \sim 0.46 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ; rapid release stage from 4 through 10 weeks with MR  $\text{N } 0.60 \sim 0.71 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$  and slight decline stage from 10 through 15 weeks with MR  $\text{N } -0.20 \sim -0.09 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ . The release of available P mainly occurred in the third week. The application of chicken and pig manures could markedly increase soil mineral N and Olsen-P. However, the impacts of application amount on N and P release processes were negligible. Through 15-week incubation, the release ratio of mineral N for chicken manure ranged from 15.6% to 18.3%, which was close to that of pig manure by 14.8% to 16.9%. As respect to the release ratio of Olsen-P, the values of 34.0%~41.6% for pig manure were greater than those of 30.2%~37.8% for chicken manure. This suggested that 60%~80% of the applied manure N and P, which have not been mineralized or re-fixed in soil, were remained in the soil after 15-week application.

**Key words:** chicken and pig manures; nitrogen mineralization rate; mineral nitrogen; available phosphorus; N and P release ratio; red soil

收稿日期: 2010-10-01

接受日期: 2010-12-29

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-437); 国家外国专家局项目(20100491005-8)资助。

作者简介: 杨蕊(1985—), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要从事环境生态方面的研究。E-mail: yangrui504@163.com

\* 通讯作者 E-mail: liyy@isa.ac.cn; shihui06@126.com

随着集约化畜禽养殖业的迅猛发展,大量畜禽粪便的排放使农业生态环境污染问题日益严重,已成为农村环境污染的主要原因<sup>[1]</sup>。畜禽粪便中除了含有农作物生长必需的大量氮、磷、钾和丰富的有机质外,还含有相当数量的中、微量元素及氨基酸、核酸、糖、维生素等有机营养成分<sup>[2-3]</sup>,是一种优质的有机肥源。农业生产中合理利用畜禽粪便,不仅可以改善土壤理化性状,增加土壤肥力,还可以提高作物产量和品质<sup>[4]</sup>,同时减轻甚至消除环境污染。

长期不合理施用有机肥不但不能持续增加作物产量,相反会导致氮、磷在土壤中的积累<sup>[5]</sup>,并通过地表径流和土壤渗漏等多种途径进入河流、湖泊等地表水体和地下水体<sup>[6]</sup>,造成水体富营养化<sup>[7-8]</sup>。研究表明,有机肥施用对环境的影响主要源于硝态氮的污染<sup>[9]</sup>。有机氮矿化为铵态氮以后除了部分被作物吸收利用外,大部分转化成硝态氮,土壤中硝态氮积累量随着有机肥施用量的增加而增加<sup>[5]</sup>。与施用矿质态氮相比,施用有机肥处理淋失的氮素量相对较高<sup>[10]</sup>。另外,大量施用有机肥也会增加磷素的移动性<sup>[11]</sup>,长期施用使土壤中磷素淋溶强度明显增加<sup>[12]</sup>。可见有机肥的不合理施用会对土壤和

水体生态环境造成潜在威胁。有机肥施入土壤以后,了解其氮、磷的释放过程和当季的释放率对于指导有机肥的合理施用具有重要意义,但这方面的报道较少。据此,选用鸡粪和猪粪研究其在红壤上的氮、磷矿化特征,以期为红壤区有机肥的合理、安全施用提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

供试土壤为第四纪红土母质发育的典型红壤,取自中国科学院桃源农业生态试验站内。试验区地处 28°55'N,111°30'E,海拔 92.2 m。该区为典型中亚热带北部湿润季风气候,年平均气温 16.5℃,年均降水量 1447.9 mm,年日照时数 1531.4 h。采样地前茬作物为红薯,于 2009 年 10 月份红薯收获后采集表层(0—20 cm)土壤,土样经风干后过 2 mm 筛备用。供试猪粪和鸡粪采于桃源试验站附近的畜禽养殖场,样品经堆沤腐熟 20 d 后,风干粉碎过 2 mm 筛备用。供试土壤、鸡粪及猪粪的基本性质见表 1。

表 1 供试土壤及猪粪、鸡粪的基本性状

Table 1 Basic properties of the chicken manure, pig manure and soil used for the experiment

样品 Sample	pH (H <sub>2</sub> O)	有机碳 Organic C (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	全磷 Total P (g/kg)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (mg/kg)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (mg/kg)	有效磷 Avail. P (mg/kg)	>0.05 mm 砂粒 Sand (%)	<0.002 mm 粘粒 Clay (%)
土壤 Soil	3.46	13.4	1.41	0.53	7.0	11.03	12.49	10.1	33.6
鸡粪 Chicken manure	8.81	250.7	25.11	6.85	362.7	238.20	2437.3		
猪粪 Pig manure	7.11	210.6	7.56	3.64	331.1	46.80	1800.3		

### 1.2 试验设计

试验采用室内恒温培养法。两种有机肥均以含磷量为依据,分别设置低、中、高 3 个施肥量水平,即: P 16.4、27.3、38.2 mg/kg,另设不施肥对照(CK),共 7 个处理,3 次重复。其中处理 1 为 CK,处理 2、3、4 为鸡粪处理,5、6、7 为猪粪处理。鸡粪和猪粪处理的同一施肥量水平均是等磷量。

称取经过前处理的风干土样 21 份,每份 4 kg,按照设置的施肥水平,并依据表 1 鸡粪和猪粪中氮磷的含量换算出所需的鸡粪和猪粪重量,准确称量有机肥后,将其均匀混入称好的土壤中,同时加入双蒸水使之达到饱和持水量的 45% (重量含水量约为

21%),充分混匀后装入广口塑料瓶中,并将其放置于密闭塑料桶中,在 25℃ 下恒温培养,定期(每周一次)取出瓶子通气。在放置土样的每个塑料桶底部放置适量蒸馏水以保持空气相对湿度为 100%,并放一小杯 1 mol/L NaOH 溶液以吸收土壤呼吸所释放的 CO<sub>2</sub>。从培养之日起,分别于培养当天(0 周)和 1、2、3、4、6、8、10、15 周时取样,经风干、磨碎过筛后测定其硝态氮、铵态氮、有效磷含量,每次取样后所余样品继续培养。

### 1.3 测定项目与方法

土壤和有机肥的有机碳采用 K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 氧化—外加加热法测定;硝态氮和铵态氮采用 1 mol/L KCl 浸提(土水比为 1:10),流动注射仪(FIAstar 5000,

FOSS Company, Sweden) 测定; 有效磷采用 0.5 mol/L  $\text{NaHCO}_3$  (pH 为 8.5) 浸提(土水比为 1:20), 钼锑抗显色—紫外/可见分光光度计(UV-2450)法测定。土壤全氮采用  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{MnO}_4$  消解—流动注射仪测定, 全磷采用  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HClO}_4$  消解—钼锑抗显色—紫外/可见分光光度计法测定, 机械组成采用比重计法。有机肥全氮、全磷采用  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$  消解, 流动注射仪测定全氮, 钼锑抗显色—紫外/可见分光光度计法测定全磷<sup>[13]</sup>。

氮释放率 = (土壤总矿质氮 - CK 中矿质氮) / 施氮量  $\times 100\%$ ;

磷释放率 = (土壤有效磷 - CK 中有效磷) / 施磷量  $\times 100\%$ 。

试验数据采用 SPSS13.0 软件包进行方差分析和多重比较; SigmaPlot 软件进行方程拟合。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤矿质氮的动态变化

2.1.1 铵态氮 图 1 可见, 施用鸡粪和猪粪土壤的铵态氮的变化趋势基本一致, 可分为 3 个明显的阶段, 即: 迅速降低阶段、稳定阶段和波动上升阶段。但是鸡粪处理初期铵态氮含量较高, 下降幅度显著大于猪粪处理; 而且稳定阶段持续时间鸡粪一般为 1 周, 比猪粪(2 周)明显缩短, 然后开始波动上升。在迅速降低阶段, 鸡粪处理的土壤铵态氮含量随着施肥量的增加而增加, 差异显著; 而稳定阶段(第 3 周)之后, 不同施肥量间差异不显著。猪粪处理在整个培养时间内, 不同处理间差异均不显著。表明两种有机肥处理铵态氮在土壤中的转化仅在施肥初期具有一定差异。

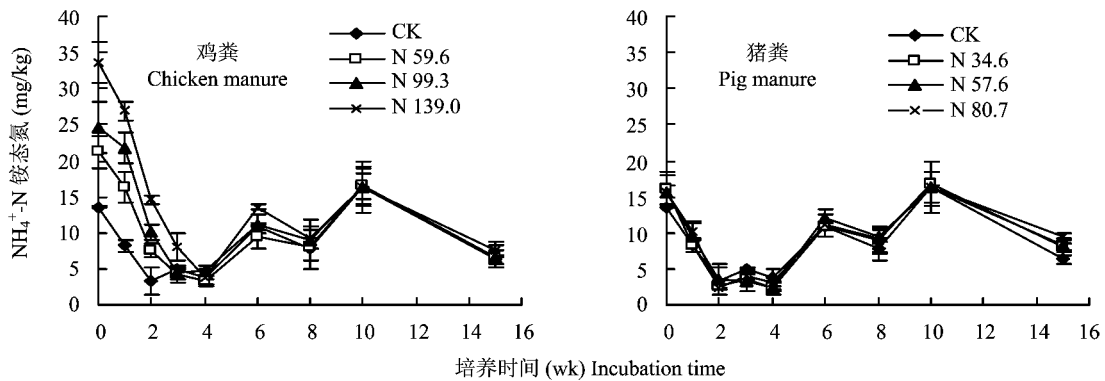


图 1 不同施肥处理土壤铵态氮含量的动态变化

Fig. 1 Dynamics of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  concentrations under different manure treatments

2.1.2 硝态氮 各施肥处理土壤硝态氮的动态变化(图 2)看出, 土壤中硝态氮随着培养时间的变化总体可分为两个阶段, 即: 迅速增加阶段和稳定增长阶段。各施肥处理随着施肥量的增加硝态氮含量明

显增加, 且差异显著, 说明施用鸡粪和猪粪显著增加了土壤中硝态氮含量。施用鸡粪和猪粪后土壤中硝态氮含量随着培养时间的增加而增加, 变化趋势基本一致; 但鸡粪处理硝态氮的快速增加在前 3 周,

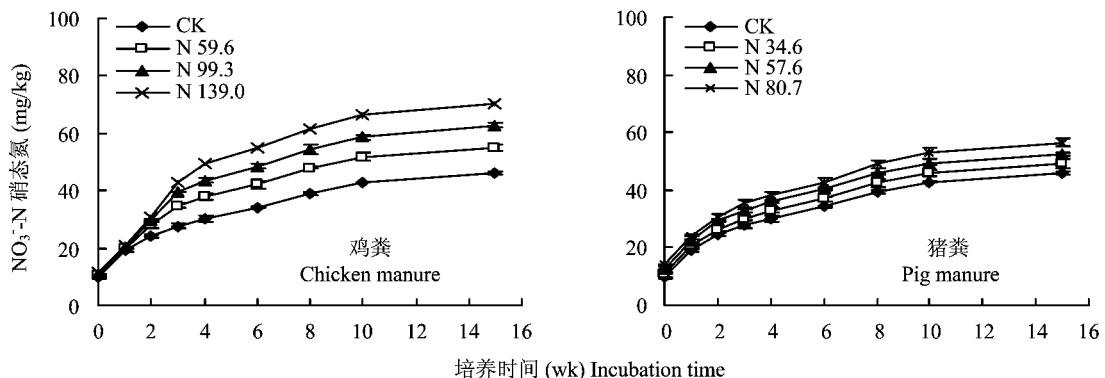


图 2 不同施肥处理土壤硝态氮含量的动态变化

Fig. 2 Dynamics of  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  concentrations under different manure treatments

而猪粪处理则主要在前 1 周,之后变为稳定增长,表明鸡粪处理硝态氮迅速增加阶段的持续时间要比猪粪处理长。鸡粪处理前 2 周处理间差异不明显,但 2 周以后差异逐渐增大,达到显著水平。

同一施肥量水平下,鸡粪处理中硝态氮含量均显著高于猪粪处理。回归分析表明,不同施肥处理土壤硝态氮含量随培养时间的变化可拟合为指数函数,决定系数  $R^2$  均达到极显著水平( $P < 0.01$ ),回归方程及其统计参数见表 2。

表 2 不同施肥处理土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量变化拟合方程

Table 2 Fitted equations of  $\text{NO}_3^-$ -N concentration as a function of incubation time under different manure treatments

有机肥 Organic manure	施氮量 N rate (mg/kg)	回归方程 Regression equation	决定系数 $R^2$ Determination coefficient
CK	0	$y = 11.477 + 36.071 [1 - \exp(-0.190t)]$	0.9886 **
鸡粪 Chicken manure	59.6	$y = 10.901 + 44.940 [1 - \exp(-0.227t)]$	0.9945 **
	99.3	$y = 10.464 + 53.088 [1 - \exp(-0.234t)]$	0.9944 **
	139.0	$y = 9.944 + 62.290 [1 - \exp(-0.228t)]$	0.9934 **
猪粪 Pig manure	34.6	$y = 12.740 + 38.053 [1 - \exp(-0.195t)]$	0.9905 **
	57.6	$y = 14.041 + 39.491 [1 - \exp(-0.209t)]$	0.9914 **
	80.7	$y = 15.488 + 42.759 [1 - \exp(-0.195t)]$	0.9921 **

注 (Note):  $y$ — $\text{NO}_3^-$ -N 含量  $\text{NO}_3^-$ -N content (mg/kg);  $t$ —培养时间 Incubation time (wk); \*\*— $P < 0.01$

2.1.3 总矿质氮 各施肥处理土壤总矿质氮(硝态氮和铵态氮之和)的动态变化(图 3)看出,鸡粪处理和猪粪处理变化趋势基本一致,总矿质态氮含量随着施肥量的增加和培养时间的延长而增大,不同鸡粪处理差异显著,而猪粪处理间差异不显著。

结合图 3 和表 3 可以看出,两种有机肥处理,培养前 4 周土壤中总矿质态氮含量处于一个缓慢上升阶段,不同处理氮素平均矿化速率较低,为  $\text{N } 0.29 \sim 0.46 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ,从第 4 周开始迅速上升,平均矿化速率达  $\text{N } 0.60 \sim 0.71 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ,第 10 周以后趋于稳定,且含量略有降低。由于鸡粪含氮量较高,整个培养过程中同一施肥量(等磷量)水平下,

鸡粪处理的总矿质氮含量均高于猪粪处理,这主要是因为等磷量的鸡粪带入土壤的氮素明显大于猪粪(表 3)。

## 2.2 土壤有效磷动态变化

土壤有效磷(Olsen-P)的动态变化(图 4)看出,两种有机肥及不同施肥处理土壤 Olsen-P 随培养时间的变化均可分为 3 个明显的阶段,即迅速降低阶段(0~2 周),短暂上升阶段(第 3 周)和稳定阶段(4~15 周)。各施肥处理在前两个阶段(0~3 周)的变化均具有显著差异,但第 4 周以后土壤 Olsen-P 含量变化趋于平缓,差异不显著。从不同施磷量的比较来看,两种有机肥在各个变化阶段均

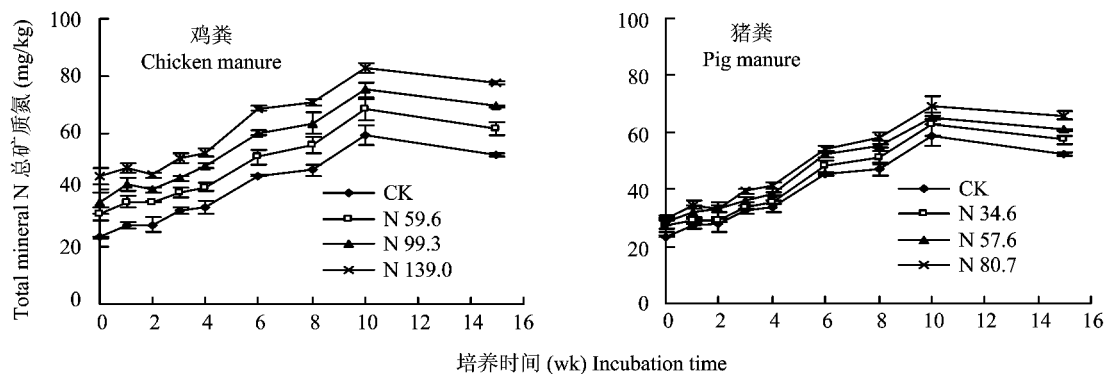


图 3 不同施肥处理土壤总矿质氮含量的动态变化

Fig. 3 Dynamics of total mineral nitrogen concentrations under different manure treatments

表 3 不同培养时期氮素的平均矿化速率[N, mg/(kg·d)]

Table 3 The average nitrogen mineralization rates during varied incubation periods

处理 Treatment	施氮量 N rate (mg/kg)	培养时间 Incubation time (wk)		
		0~4	4~10	10~15
CK	0	0.38 ± 0.07 a	0.60 ± 0.04 b	-0.19 ± 0.12 a
鸡粪 Chicken manure	59.6	0.33 ± 0.07 a	0.65 ± 0.06 ab	-0.20 ± 0.08 a
	99.3	0.46 ± 0.07 a	0.64 ± 0.08 ab	-0.19 ± 0.06 a
	139.0	0.29 ± 0.12 a	0.71 ± 0.01 a	-0.14 ± 0.06 a
	34.6	0.29 ± 0.11 a	0.65 ± 0.08 b	-0.15 ± 0.10 a
猪粪 Pig manure	57.6	0.36 ± 0.10 a	0.64 ± 0.03 b	-0.13 ± 0.01 a
	80.7	0.41 ± 0.03 a	0.66 ± 0.08 b	-0.09 ± 0.05 a

注 (Note): 同列数据后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters are significant at 5% level.

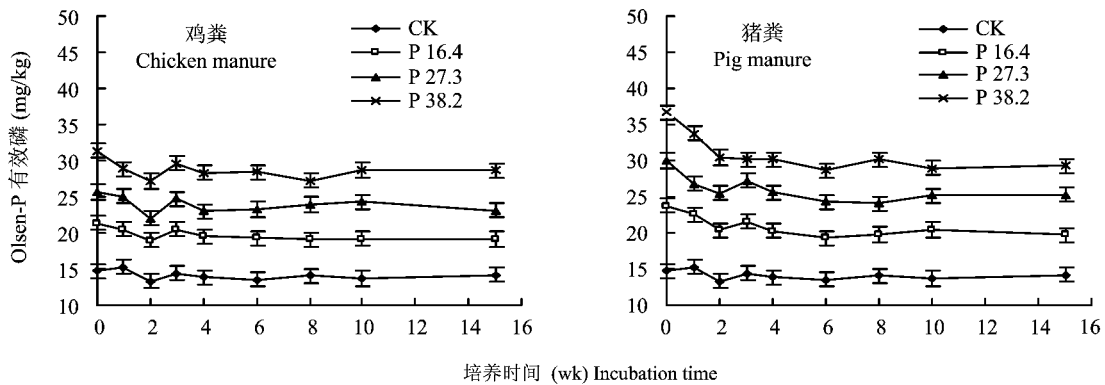


图 4 不同施肥处理土壤有效磷含量的动态变化

Fig. 4 Dynamics of soil available P concentrations under different manure treatments

有极显著差异; 同一施肥量水平下, 猪粪处理的土壤 Olsen-P 含量总体仅略高于鸡粪处理, 但差异不显著。表明施肥量对土壤 Olsen-P 含量的变化有显著影响, 而有机肥种类的影响较小。

### 2.3 有机肥中氮磷的释放率

培养结束(15周)时, 不同施肥量条件下, 鸡粪中氮释放率分别为 15.6%, 17.1%, 18.3%; 磷释放率分别为 30.2%, 32.8%, 37.8%。猪粪中氮释放率分别为 14.8%, 14.8%, 16.9%; 磷释放率分别为 34.0%, 40.5%, 41.6% (表 4)。说明两种有机肥中氮磷的释放率均随着施肥量的增加而略有增加, 其中磷的释放率显著高于氮。同一施磷量水平下猪粪中磷的释放率高于鸡粪; 而同一施氮水平下氮的释放率基本相当。

## 3 讨论

### 3.1 氮素的矿化特征

有机肥和土壤中的有机氮主要通过土壤微生物及其分泌的酶进行矿化释放<sup>[14]</sup>。本研究表明, 鸡粪

和猪粪氮素的矿化过程基本一致, 即培养前 4 周氮矿化速率相对较慢, 第 4~10 周矿化速率迅速加快, 10 周以后稳中略降。在培养前期, 由于土壤温度、湿度发生变化, 参与氮素矿化的土壤微生物由休眠进入活跃, 但是由于初期群落较小, 而且微生物增殖过程中也会消耗一定量的矿质氮, 因此前期氮矿化速率相对较慢。但有的研究认为, 在培养前期氮素矿化较快<sup>[15-17]</sup>, 这与本研究的结果有所不同。其原因可能在于这些试验中所用有机肥材料是从养殖场采集后直接风干磨碎的, 而本试验中有机肥材料经过了堆沤腐熟。在培养中期微生物形成稳定群落以后, 有机肥中氨基糖、蛋白质等有机物质为微生物提供了充足的能源, 土壤中各种酶的活性也显著增强<sup>[18-19]</sup>。本试验中, 有机氮进入快速矿化阶段可以维持约 6 周时间, 而且不同施肥量土壤矿质氮含量的变化趋势基本一致, 各阶段氮矿化速率也无显著性差异, 表明施肥量对氮素矿化过程没有显著影响。

试验培养初期, 两种有机肥的铵态氮含量均为最高, 这是因为有机肥经腐熟后已经矿化释放了部

表 4 鸡粪和猪粪处理不同施肥量水平下有效氮、磷的含量及释放率(15 周)  
Table 4 Release rate and content of available N and P under different chicken manure and pig manure fertilization treatments(15 weeks)

处理 Treatment	施氮量 N rate (mg/kg)	矿质氮 Mineral N (mg/kg)	氮释放率 N release rate (%)	施磷量 P rate (mg/kg)	有效磷 Avail. P (mg/kg)	磷释放率 P release rate (%)
CK	0	52.28 ± 0.54 d		0	14.18 ± 0.62 d	
鸡粪 Chicken manure	59.6	61.55 ± 2.42 c	15.6	16.4	19.13 ± 1.07 c	30.2
	99.3	69.28 ± 0.35 b	17.1	27.3	23.12 ± 0.53 b	32.8
	139.0	77.77 ± 0.64 a	18.3	38.2	28.62 ± 1.66 a	37.8
猪粪 Pig manure	34.6	57.38 ± 1.57 c	14.8	16.4	19.75 ± 0.72 c	34.0
	57.6	60.79 ± 0.49 b	14.8	27.3	25.24 ± 1.86 b	40.5
	80.7	65.92 ± 1.62 a	16.9	38.2	30.08 ± 1.99 a	41.6

注(Note): 同列数据后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters mean significant at 5% level.

分铵态氮;在矿化速率较慢的阶段,铵态氮在硝化细菌作用下转化为硝态氮,土壤铵态氮含量迅速降低(尤其在前 2 周),而硝态氮含量迅速增加。第 4 周之后,铵态氮有所回升并在一定范围内波动上升,这意味着土壤中的氨化作用的开始,有机肥中难降解的大分子有机物质随着时间的延长在微生物作用下被逐渐矿化分解,释放出铵态氮,硝化作用也基本上在同步进行。

鸡粪本身铵态氮含量(238.20 mg/kg)显著高于猪粪(46.80 mg/kg),在等磷量条件下,随鸡粪带入土壤的总氮量也高于猪粪。因此,鸡粪处理培养初期土壤铵态氮含量显著高于猪粪,相应地铵态氮转化为硝态氮所持续的时间也就更长。第 4 周以后,随有机肥带入土壤的铵态氮基本转化完成,进入有机肥的净矿化阶段,由于有机氮在氨化过程中形成的铵态氮的量很小,而且很快被硝化,转化为硝态氮<sup>[15]</sup>,因此两种有机肥以及不同施肥量处理间土壤铵态氮的含量相近,变化趋势一致。但也有研究认为,不同有机肥的氮素矿化过程并不一致<sup>[16-17, 20-21]</sup>,其原因可能在于土壤性质、有机肥组分以及前处理状况(腐熟)的不同<sup>[22-24]</sup>。

总的来讲,红壤施用鸡粪和猪粪腐熟有机肥,其有机氮的矿化主要发生在施入土壤后的第 4 ~ 10 周,持续时间较长,相当于天然的缓控释肥料。因此,通过调整有机肥用量既可以满足作物生长对氮素的需求,同时也解决了畜禽粪便排放带来的环境问题。但是在有机肥施用初期的 1 个月内,由于有机氮的矿化速率低,氮的供应不能满足作物苗期对

氮肥的需求,因此需要配施少量的化肥,以弥补有机肥氮素供应的不足。

### 3.2 磷素的矿化特征

有机肥施入土壤以后,土壤有效磷含量随培养时间的变化表现为迅速降低、短暂上升和稳定变化特征。主要由于鸡粪和猪粪直接带入了部分腐熟过程中矿化的无机磷,因此培养初期土壤有效磷含量最高;但由于红壤本身具有强烈的固磷特征,随着培养时间的延长,无机磷很快被土壤吸附固定,导致土壤有效磷含量迅速降低。另外,土壤微生物群落快速增殖过程中磷的生物固定<sup>[25]</sup>也是导致前期土壤有效磷含量降低的重要原因。土壤中的有效磷是处于一个矿化释放与土壤固定的动态平衡之中,尽管有机肥矿化过程中氮、磷是同时释放的,但因无机磷极易被土壤固定,只有在磷释放速率高于固定速率时,才能测出其增加。有研究表明,水溶性磷肥施入红壤后在 3 h 之内磷固定率即达到 51.6%<sup>[26]</sup>,因此很难通过直接测定土壤有效磷的变化来定量研究有机磷的矿化释放过程,从这一点来讲,磷与氮有较大的差异。本试验结果显示,在第 3 周各个处理中有效磷都有一个比较明显而短暂的增加过程,该阶段磷的矿化速率显著超出固定速率,是有机磷矿化最快的阶段;而其它阶段则均是固定速率高于矿化速率,所以有机肥在红壤中的矿化主要发生在施肥后的第 3 周。据报道,有机肥在分解过程中产生的有机酸会对 Fe-P、Al-P 等无机磷有一定的活化作用<sup>[27-29]</sup>,可在一定程度上提高土壤的有效磷含量,并维持土壤有效磷处于一个较高的含量水平;而化

学磷肥施入土壤后在短期内(3 h ~ 3 d)有效性会大幅度下降,固定率达到(50% ~ 80%)<sup>[26,30]</sup>。可见,施用畜禽有机肥不仅能够实现养殖废弃物的资源化利用,而且对于活化土壤本身的无效磷,提高土壤磷素的有效性也有重要作用。

猪粪磷的释放率明显高于鸡粪,这是因为猪粪的C/N比(27.9)和C/P比(57.9)都显著高于鸡粪(分别为10.0和36.6),因此有机肥矿化过程中土壤微生物活性更强<sup>[15]</sup>,更有利于有机磷的矿化释放。另外,猪粪本身Olsen-P占总磷的比例(49%)也明显高于鸡粪(36%),腐熟阶段猪粪中有机磷的矿化比例也明显高于鸡粪。因此,尽管鸡粪总磷含量高于猪粪,但是在等施磷量条件下,猪粪中的磷更容易矿化释放,有利于植物的吸收利用。

### 3.3 有机肥中氮、磷矿化的相关性及其环境影响

鸡粪和猪粪中氮,有机态占95%~98%,矿质态仅占2%~5%;而有机态磷比例占64%~51%,Olsen-P占36%~49%,说明这两种有机肥中氮主要是以有机氮形态存在,而磷则有至少1/3以上为无机态,因此其氮和磷的矿化释放过程显著不同。有机氮在施入土壤4周以后进入矿化高峰期,而有机磷的矿化高峰在第3周;而且参与有机氮、磷矿化作用的微生物也不相同,这可能也是造成两者差异的重要原因。相关分析表明,在前4周各处理中土壤矿质氮和有效磷含量呈正相关关系,其中鸡粪处理的相关性达到极显著水平( $R^2 = 0.7044^{**}$ ),但猪粪处理的相关性不显著,这与猪粪中有机磷在腐熟阶段矿化率较高有关。有研究表明,施有机肥土壤氮素的矿化率与土壤有效磷含量的对数呈极显著正相关<sup>[31]</sup>。但是,关于有机肥中氮、磷矿化关系的研究则很少。加强这方面的研究对于合理利用畜禽有机肥、调控作物生长过程中氮磷供应,并最大限度地控制其环境影响将具有重要的理论价值。

本试验表明,鸡粪和猪粪氮的释放率均低于20%,磷低于40%,这意味着室内培养条件下连续培养15周(相当于一个作物生长季),有机肥中仍有60%~80%的氮、磷未被矿化或矿化后重新被土壤固定,并残留在土壤中。赵明等<sup>[20]</sup>的研究表明,鸡粪和猪粪在棕壤上的碱解氮释放率分别为39.9%和35.3%,而Olsen-P的释放率分别为24.6%和34.8%,与本试验结论基本一致。实际大田条件下因为有植物的直接吸收利用,残留率可能会略低,而其影响大小尚需进一步的试验研究。

### 参考文献:

- [1] 李庆康,吴雷,刘海琴,等. 我国集约化畜禽养殖场粪便处理利用现状及展望[J]. 农业环境保护,2000,19(4): 251-254.  
Li Q K, Wu L, Liu H Q *et al.* The status and outlook of treatment on excreta from intensive animal farming in China[J]. *Agric. Environ. Prot.*, 2000, 19(4): 251-254.
- [2] 杨玉爱,王珂,叶正钱,魏幼璋. 有机肥料资源及其对微量元素螯溶和利用研究[J]. 土壤通报,1994,25(7): 21-25.  
Yang Y A, Wang K, Ye Z Q, Wei Y Z. Study on organic manure resources and their chelate dissolution and utilization for trace elements[J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 1994, 25(7): 21-25.
- [3] 中国农业科学院土壤肥料研究所. 中国肥料[M]. 上海: 上海科学技术出版社,1994. 114-129.  
Soil and Fertilizer Institute, CAAS. Chinese fertilizer[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Publisher, 1994. 114-129.
- [4] 李国良,张政勤,姚丽贤,等. 养殖场鸡粪在蔬菜上的合理安全施用技术研究[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(2): 470-478.  
Li G L, Zhang Z Q, Yao L X *et al.* Safe utilization of chicken manure from intensive poultry farms in vegetable[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2010, 16(2): 470-478.
- [5] 张风华,廖文华,刘建玲. 连续过量施磷和有机肥的产量效应及环境风险评价[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(6): 1280-1287.  
Zhang F H, Liao W H, Liu J L. Applications of phosphorus and organic fertilizers on yields of vegetables and their environmental impacts[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2009, 15(6): 1280-1287.
- [6] 周翠,章明奎,方利平. 粪肥对不同磷水平土壤磷流失潜力的影响[J]. 土壤通报,2006,37(4): 706-709  
Zhou C, Zhang M K, Fang L P. Effects of organic manure application on P runoff from soils with different P levels[J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2006, 37(4): 706-709.
- [7] Kleinman P J A, Wolf A M, Sharpley A N *et al.* Survey of water-extractable phosphorus in livestock manures[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2005, 69(3): 701-708.
- [8] Schroeder P D, Radcliffe D E, Cabrera M L. Rainfall timing and poultry litter application rate effects on phosphorus loss in surface runoff[J]. *J. Environ. Qual.*, 2004, 33(6): 2201-2220.
- [9] 姚丽贤,周修冲. 有机肥对环境的影响及预防研究[J]. 中国生态农业学报,2005,13(2): 113-115.  
Yao L X, Zhou X C. Impact of organic manure on the environment and its corresponding preventive researches[J]. *Chin. J. Eco-Agric.*, 2005, 13(2): 113-115.
- [10] Siemens J, Kaupenjohann M. Contribution of dissolved organic nitrogen to N leaching from four German agricultural soils[J]. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 2002, 165(6): 675-681.
- [11] Sharpley A N, McDowell R W, Kleinman P J. Amounts, forms and solubility of phosphorus in soils receiving manure[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2004, 68(6): 2048-2057.
- [12] Jager P, Claassens A. Long-term phosphorus desorption kinetics of

- an acid sand clay soil from South Africa[J]. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 2005, 36: 309–319.
- [13] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983. 62–132, 375–376.  
Nanjing Soil Institute, CAS. The soil physical and chemical analysis[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Publishers, 1983. 62–132, 375–376.
- [14] 曹志平. 土壤生态学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007. 31–39.  
Cao Z P. Soil ecology[M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2007. 31–39.
- [15] Azeez J O, Van Averbeke W. Nitrogen mineralization potential of three animal manures applied on a sandy clay loam soil[J]. *Bioresour. Tech.*, 2010, 101(14): 5645–5651.
- [16] Abbasi M K, Hina M, Khalique A, Khan S R. Mineralization of three organic manures used as nitrogen source in a soil incubated under laboratory conditions[J]. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 2007, 38: 1691–1711.
- [17] Wichern F, Muller T, Joergensen R G., Buerkert A. Effects of manure quality and application forms on soil C and N turnover of a subtropical oasis soil under laboratory conditions[J]. *Biol. Fert. Soils*, 2004, 39: 165–171.
- [18] 刘光荣, 冯兆滨, 刘秀梅, 等. 不同有机肥源对红壤旱地耕层土壤性质的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2009, 31(5): 928–932.  
Liu G R, Feng Z B, Liu X M *et al.* Effects of different manure sources on soil characters in upland red soil[J]. *Acta Agric. Univ. Jiangxiensis*, 2009, 31(5): 928–932.
- [19] 张信娣, 曹慧, 徐冬青, 等. 光合细菌和有机肥对土壤主要微生物类群和土壤酶活性的影响[J]. *土壤*, 2008, 40(3): 443–447.  
Zhang X D, Cao H, Xu D Q *et al.* Effects of photosynthetic bacteria and organic fertilizer on soil microorganisms and soil enzyme activities[J]. *Soils*, 2008, 40(3): 443–447.
- [20] 赵明, 陈雪汇, 赵征宇, 等. 鸡粪等有机肥料的养分释放对土壤有效铜、锌、铁、锰含量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(2): 47–50.  
Zhao M, Chen X H, Zhao Z Y *et al.* Releasing of N, P and K of organic fertilizers and their effects on the contents of available Cu, Zn, Fe and Mn in soil[J]. *Chin. J. Eco-Agric.*, 2007, 15(2): 47–50.
- [21] Van Kessel J S, Reeves III J B, Meisinger J J. Nitrogen and carbon mineralization of potential manure components[J]. *J. Environ. Qual.*, 2000, 29: 1669–1677.
- [22] Probert M E, Delve R J, Kimani S K, Dimes J P. Modelling nitrogen mineralization from manures; representing quality aspects by varying C: N ratio of sub-pools[J]. *Soil Biol. Biochem.*, 2005, 37(2): 279–287.
- [23] Khalil M I, Hossain M B, Schmidhalter U. Carbon and nitrogen mineralization in different upland soils of the subtropics treated with organic materials[J]. *Soil Biol. Biochem.*, 2005, 37(8): 1507–1518.
- [24] Atallah T, Andreux F., Choné T, Gras F. Effect of storage and composting on the properties and degradability of cattle manure[J]. *Agric., Ecosyst. Environ.*, 1995, 54(3): 203–213.
- [25] Kouno K, Wu J, Brookes P C. Turnover of biomass C and P in soil following incorporation of glucose or ryegrass[J]. *Soil Biol. Biochem.*, 2002, 34: 617–622.
- [26] 鲁如坤, 时正元, 钱承梁. 磷在土壤中有有效性的衰减[J]. *土壤学报*, 2000, 37(3): 323–329.  
Lu R K, Shi Z Y, Qian C L. Decline of phosphorus availability with time in soil[J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2000, 37(3): 323–329.
- [27] Toor G. S, Bahl G. S. Effect of solitary and integrated use of poultry manure and fertilizer phosphorus on the dynamics of P availability in different soils[J]. *Bioresour. Tech.*, 1997, 62(1–2): 25–28.
- [28] 王林权, 周春菊, 王俊儒, 等. 鸡粪中的有机酸及其对土壤速效养分的影响[J]. *土壤学报*, 2002, 39(2): 268–275.  
Wang L Q, Zhou C J, Wang J R *et al.* Organic acids in chicken feces and their effects on available of nutrients in loess soil[J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2002, 39(2): 268–275.
- [29] 黄敏, 肖和艾, 黄巧云, 等. 有机物料对水旱轮作红壤磷素微生物转化的影响[J]. *土壤学报*, 2004, 41(4): 584–589.  
Huang M, Xiao H A, Huang Q Y *et al.* Effect of amendment of organic materials on transformation of P in red-earth soil under flood-drought cultivation[J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2004, 41(4): 584–589.
- [30] 石辉, 邵明安. 土壤中磷素转化的双库模型[J]. *应用基础与工程科学学报*, 1999, 7(1): 29–33.  
Shi H, Shao M A. Dual sink model of phosphorus inversion in soil[J]. *J. Basic Sci. Eng.*, 1999, 7(1): 29–33.
- [31] 李辉信, 胡锋, 刘满强, 等. 红壤氮素的矿化和硝化作用特征[J]. *土壤*, 2000, (4): 194–197.  
Li H X, Hu F, Liu M Q *et al.* The characteristics of nitrogen mineralization and nitrification in red soil[J]. *Soils*, 2000(4): 194–197.