

# 红壤的供氮能力及化肥氮的去向\*

李辉信 胡 锋

蔡贵信<sup>†</sup> 范晓晖

(南京农业大学资源与环境学院, 南京 210095) (中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

**摘 要** 采用盆栽试验,研究了由第四纪红色黏土和红砂岩发育的不同侵蚀程度红壤以及施用有机或无机肥 10 年以上培肥的红壤在不加外源氮肥条件下的自然供氮能力,以及施用<sup>15</sup>N 肥源后肥料氮在土壤-作物系统中的去向。结果表明:红砂岩发育红壤(红砂土)的矿化量和供氮量显著高于第四纪红黏土(红黏土),同一母质中轻度侵蚀红壤的矿化量和供氮量又显著高于重度侵蚀红壤。培肥后红壤的矿化量和供氮量显著提高,其中有机培肥红壤高于无机培肥红壤。侵蚀红壤的氮肥利用率低,土壤残留氮率较高,氮肥损失率不大,其中红砂土的氮残留率明显低于红黏土,而氮肥损失率却显著高于红黏土。培肥后红壤的氮肥利用率明显增加,其中有机培肥红壤的氮肥利用率和残留率显著高于无机培肥的红壤,而氮肥损失率却明显低于无机培肥红壤。

**关键词** 红壤,母质类型,侵蚀程度,供氮能力,氮肥去向

**中图分类号** S143.1, S155.2<sup>†</sup> 5

由于强烈的地球化学风化和淋溶作用,红壤本身继承性肥力较低,加之侵蚀、季节性干旱以及不合理的农业管理措施等因素的影响,红壤退化较为严重,其中侵蚀退化是红壤退化特别是养分贫瘠化的主要原因。尽管侵蚀退化红壤氮素肥力特征及氮素肥力恢复研究已有报道<sup>[1-3]</sup>,但目前关于侵蚀红壤氮素循环、转化及供应能力的资料不多。本文在研究红壤氮素矿化作用和硝化作用<sup>[4]</sup>的基础上,进一步探讨了不同母质、不同侵蚀程度以及不同培肥措施红壤的供氮能力及其对化肥氮去向的影响,为氮素循环的研究提供基本参数,并为红壤氮素肥力管理提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 供试土壤

在中国科学院江西鹰潭红壤生态实验站周围选择第四纪红色黏土和红砂岩两种母质及两种侵蚀程度(将地表裸露和生长稀疏短草分别作为重度侵蚀和轻度侵蚀)的自然红壤(简称红黏土和红砂土)作为供试土壤,同时采集了试验站内连续 10 年以上施用有机肥(猪粪)和无机肥(NPK)试验小区的土样<sup>[5]</sup>及其附近的荒地土壤(第四纪红色黏土)。所有土样均采自表层(0~20 cm),样品的基本性状见表 1。

\* 国家“九五”攻关专题(96-004-03-12)及国家自然科学基金 95 期间重点项目(49631010)资助

† 通讯作者

收稿日期:2000-10-25;收到修改稿日期:2001-02-18

## 1.2 矿化试验

称 10g 过 2mm 筛的风干土于 100ml 离心管中, 按 65% 田间持水量加水后, 管口盖上塑料薄膜以保持土壤水分, 置于 28℃ 培养箱中培育。培育四周后, 取出离心管, 加入 50ml 2 mol L<sup>-1</sup> KCl 溶液, 振荡 1 小时后过滤。之后取滤液测定铵态氮和硝态氮。

表 1 供试土壤基本性状

Table 1 Characteristics of the soils used in the experiment

土壤 Soil	有机碳 Organic C (g kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total N (mg kg <sup>-1</sup> )	初始矿质氮 Initial mineral N(mg kg <sup>-1</sup> )	速效磷 Available P (mg kg <sup>-1</sup> )	pH
重度侵蚀红黏土	2.09	0.28	8.39	0.47	4.8
轻度侵蚀红黏土	6.15	0.68	8.43	0.44	4.5
重度侵蚀红砂土	1.51	0.14	5.67	0.13	4.9
轻度侵蚀红砂土 <sup>1)</sup>	4.06	0.36	6.09	2.96	5.4
荒地红黏土	6.84	0.66	13.0	0.25	4.6
有机肥培育红黏土	9.80	1.17	16.6	189	6.7
无机肥培育红黏土	5.57	0.72	17.8	36.9	6.6

1) 轻度侵蚀红砂土地表有草皮, 以前曾经开垦过

## 1.3 盆栽试验

将上述 7 种土样风干过 2mm 筛后装入塑料盆钵, 每钵装土 3kg, 施 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 0.86g 作为基肥。分别设置无 N 和施<sup>15</sup>N 肥料两个处理, 每个处理 3 次重复。施 N 肥处理每钵施 (<sup>15</sup>NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1.9g, <sup>15</sup>N 丰度为 5.30%。1998 年 11 月 13 日每钵播种发芽的黑麦草种子 20 粒。1999 年 1 月 12 日分地上部和地下部收获。

## 1.4 分析方法

按常规分析方法测定土壤的 pH、有机碳、速效磷、矿质 N 及土壤和植株全 N, <sup>15</sup>N 丰度在 Finnigan mat 251 质谱仪上测定。

# 2 结果与讨论

## 2.1 红壤的供氮能力

2.1.1 不同母质及侵蚀程度红壤的供氮量和矿化量 土壤供氮量是土壤对作物在一段生长期中所供应的氮素总量, 一般以无氮区作物收获时的吸氮量计得。在一般条件下主要决定于土壤起始速效氮量, 以及在作物整个生长过程中土壤有机氮的矿化量。田间或盆栽试验的氮素矿化量是由无氮区作物收获时的吸氮量与收获时土壤矿质氮量之和减去播种时土壤矿质氮量而计得的。培养试验的氮素矿化量则是土壤培育后与培育前的矿质氮量之差。这些指标是土壤供氮能力的良好指标<sup>[6, 7]</sup>。从表 2 培养条件下的矿化试验结果看出: 发育于两种母质上的侵蚀红壤的氮素矿化量明显不同, 其中轻度和重度侵蚀红砂土的矿化量是相应侵蚀程度的红黏土矿化量的 1.9 倍。同一母质上发育的红壤由于侵蚀程度不同, 氮素矿化量不同。轻度侵蚀红黏土和红砂土的矿化量分别是重度侵蚀红黏

土和红砂土的 3.8 倍左右。因此可以认为发育于砂岩母质的红砂土的矿化作用比第四纪红黏土强,轻度侵蚀的红砂土和红黏土的矿化作用又明显高于重度侵蚀的红砂土和红黏土。以黑麦草吸氮量表征土壤氮素供应能力,可以看出轻度侵蚀红黏土的供氮量是重度侵蚀红黏土的 1.9 倍,而轻度侵蚀红砂土的供氮量则为重度侵蚀红砂土的 4.4 倍,差异均达 1% 显著水平。比较不同母质发育红壤的供氮量,发现砂岩发育的红砂土供氮量高于红黏土,其中轻度侵蚀红砂土供氮量更强,是轻度侵蚀红黏土供氮量的 2.7 倍,差异达 1% 显著水平。重度侵蚀红砂土比重度侵蚀红黏土的供氮量也高 12.8%,但差异不显著。上述结果还表明,红壤供氮量与培养条件下矿化作用的强弱呈较好的正相关,相关系数达 0.97。由于发育于砂岩母质上的红砂土的矿化量大于红黏土,因而盆栽试验条件下黑麦草在红砂土上的吸氮量大于红黏土的吸氮量,但由于红砂土全氮含量和初始矿质氮含量均低于红黏土,因此盆栽试验结束时红砂土的矿质氮比初始矿质氮明显减少,而红黏土则减少较微,这也说明红砂土的供氮过程表现出“早发”的特点,需要注意增施肥料保持地力。

表 2 不同母质及侵蚀程度红壤的供氮能力( $\text{mg kg}^{-1}$ )

Table 2 Nitrogen supply of red soils eroded to different extents and derived from different parent materials

土壤 Soil	培养条件下 氮素矿化量 Mineralized N in incubation experiment	土壤供氮量 Nitrogen supplied by soil	盆栽条件下 氮素矿化量 Mineralized N in pot experiment	试验收获时 土壤矿质氮 Soil mineral N at the harvesting
重度侵蚀 红黏土	0.95 <sup>C, D)</sup>	1.72 <sup>C</sup>	0.94 <sup>c</sup>	7.61 <sup>a</sup>
轻度侵蚀 红黏土	3.65 <sup>B</sup>	3.22 <sup>B</sup>	2.26 <sup>b</sup>	7.47 <sup>a</sup>
重度侵蚀 红砂土	1.84 <sup>C</sup>	1.94 <sup>C</sup>	0.52 <sup>c</sup>	4.25 <sup>b</sup>
轻度侵蚀 红砂土	6.98 <sup>A</sup>	8.58 <sup>A</sup>	4.99 <sup>a</sup>	2.50 <sup>c</sup>

1) 同一列中的大、小写字符分别表示其差异达到 0.01 和 0.05 显著水准,以下同

2.1.2 培肥措施对红壤供氮能力的影响 当施用有机肥或无机肥改良培育土壤后,红壤的有机碳,全氮,矿质氮和速效磷含量以及 pH 都明显提高(表 1)。有机和无机肥培育的红壤与荒地相比,矿化量和供氮量增加数倍甚至数十倍,差异均达极显著水平(表 3)。从两种培肥方式来看,有机培肥红壤的矿化量和供氮量又显著高于无机培肥红壤,这是由于前者的有机质和全氮含量较高,而且施用有机肥改善了土壤物理化学性质,促进了微生物量和活性的提高,故有利于土壤有机氮的矿化作用。再比较盆栽试验中氮素的实际矿化量可以看出,有机培肥红壤的矿化量是无机培肥红壤的 5.7 倍。这说明有机培肥措施能有效地提高土壤的氮素肥力。

表 3 不同培肥措施对红壤供氮能力的影响

Table 3 Effect of long-term application of organic manure and inorganic fertilizer on nitrogen supply of red soil ( $\text{mg kg}^{-1}$ )

土壤 Soil	培养条件下 氮素矿化量 Mineralized N in incubation experiment	土壤供氮量 Nitrogen supplied by soil	盆栽条件下 氮素矿化量 Mineralized N in pot experiment	试验结束时 矿质氮 Mineral N at the end of pot experiment
有机培育 红黏土	27. 1 <sup>A</sup>	38. 2 <sup>A</sup>	26. 6 <sup>A</sup>	5. 06 <sup>B</sup>
无机培 育红黏土	13. 8 <sup>B</sup>	17. 5 <sup>B</sup>	4. 68 <sup>B</sup>	5. 01 <sup>B</sup>
荒地 红黏土	0. 94 <sup>C</sup>	2. 71 <sup>C</sup>	0. 72 <sup>C</sup>	11. 0 <sup>A</sup>

## 2.2 化肥氮的去向

2.2.1 氮肥利用率 表 4 结果显示, 4 种侵蚀红壤的氮肥利用率, 除轻度侵蚀红砂土较高达 55. 9% 外, 其余 3 种红壤的氮肥利用率均很低, 为 1. 8% ~ 1. 9%。这是由于这 3 种侵蚀红壤存在黏、板等不良物理性状和较低的 pH 以及固磷能力强等因素, 从而限制了黑麦草的生长。而轻度侵蚀的红砂土以前曾经开垦改良过, pH 和速效磷都有所提高, 因而施用氮肥后黑麦草生长良好, 氮肥利用率较高。经有机和无机培肥后, 红壤的氮肥利用率明显提高, 达 61. 2% ~ 64. 2%, 是荒地的 30. 6~ 32. 1 倍, 其中有机培肥处理氮肥利用率又比无机肥处理高 4. 9%, 差异明显。由此可见, 在侵蚀红壤上氮肥利用率极低, 经合理培肥后有明显的升高。

表 4 标记肥料氮的去向 (占施 N 量的%)

Table 4 Fate of  $^{15}\text{N}$  labeled fertilizer nitrogen (% of applied N)

土壤 Soil	植物吸收 Plant recovery	土壤残留 Soil recovery	总回收 Total recovery	损失 Total N loss
重度侵蚀红黏土	1. 8 <sup>d</sup>	87. 9 <sup>a</sup>	89. 7 <sup>a</sup>	10. 3 <sup>c</sup>
轻度侵蚀红黏土	1. 9 <sup>d</sup>	92. 7 <sup>a</sup>	94. 6 <sup>a</sup>	5. 4 <sup>c</sup>
重度侵蚀红砂土	1. 9 <sup>d</sup>	74. 4 <sup>b</sup>	76. 3 <sup>c</sup>	23. 7 <sup>a</sup>
轻度侵蚀红砂土	55. 9 <sup>c</sup>	26. 2 <sup>c</sup>	82. 1 <sup>b</sup>	17. 9 <sup>b</sup>
有机培育红黏土	64. 2 <sup>a</sup>	27. 0 <sup>c</sup>	91. 2 <sup>a</sup>	8. 8 <sup>c</sup>
无机培育红黏土	61. 2 <sup>b</sup>	13. 4 <sup>d</sup>	74. 6 <sup>c</sup>	25. 4 <sup>a</sup>
荒地红黏土	2. 0 <sup>d</sup>	84. 8 <sup>a</sup>	86. 8 <sup>ab</sup>	13. 2 <sup>c</sup>

2.2.2 肥料氮在土壤中的残留 表 4 数据表明, 上述 4 种氮肥利用率很低的侵蚀红壤, 肥料氮的残留率都比较高, 在 74. 4% ~ 92. 7% 之间。这与红壤上油菜 $^{15}\text{N}$ 田间微区试

验中无磷处理的结果相似,该处理由于油菜生长极差,肥料氮残留率高达72%<sup>[18]</sup>。从不同母质发育的红壤来看,重度侵蚀和轻度侵蚀红砂土氮肥残留率分别比相应侵蚀程度的红黏土低13.5%和66.5%,差异达极显著水平( $p < 0.01$ ),这是因为红砂岩发育的红壤其黏粒和有机质含量都少于第四纪红黏土,因而对化肥氮的固持能力较弱。红黏土经培肥后,土壤理化性质得到明显改善,黑麦草生长良好,吸收了较多的肥料氮,因此氮肥残留率较荒地显著减少。而有机培肥的红黏土比无机培肥的红黏土其氮肥残留率高1倍,差异显著。说明有机培肥方式不仅有利于土壤氮素的有效供应,还有利于化肥氮在土壤中的生物固持。

侵蚀红壤包括荒地红黏土施氮处理的残留肥料氮量很高,而且收获时土壤矿质氮含量也很高(表5)。后者来自土壤氮和肥料氮两部分,从表2和表3无氮处理收获时土壤矿质氮含量大多低于 $10\text{mgkg}^{-1}$ 推测,大部分矿质氮来自氮肥。意味着侵蚀红壤上残留的肥料氮约有一半以矿质氮的形态存在,故只有50%左右被生物固持(表5)。与此相反,施用有机肥或无机NPK肥培育10年后的红黏土上,由于植物吸收的肥料氮量很高,残留在土壤中的肥料<sup>15</sup>N量较低,其中90%以上被生物固持。以上结果表明侵蚀红壤的生物固持能力很弱,培肥后的红壤其生物固持能力则大大提高。侵蚀红壤的氮素净残留率较大,这有利于氮素肥力的保持和提高,有利于侵蚀红壤肥力的恢复和重建。由于侵蚀红壤的生物固持能力弱,残留在土壤中的肥料氮有相当一部分以矿质氮的形态存在,又可能通过各种途径损失,不利于肥料氮的保存。看来,有机无机肥配合施用,增施有机肥应该是培肥红壤、提高红壤有机质及氮素肥力最有效的措施。

表5 氮肥的残留量与土壤中的矿质氮含量

Table 5 Fertilizer N residue in soil and soil mineral N at harvesting

土壤 Soil	土壤残留肥料氮量 Fertilizer N residue in soil (A) ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	收获时土壤矿质氮含量 Soil mineral N at harvesting (B) ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	B/A (%)
重度侵蚀红黏土	123	63.0	51.2
轻度侵蚀红黏土	129	66.8	51.8
重度侵蚀红砂土	104	62.9	60.5
轻度侵蚀红砂土	35.7	9.2	25.8
有机培育红黏土	18.9	1.4	7.4
无机培育红黏土	37.7	1.1	2.9
荒地红黏土	118	69.3	58.7

从表6数据看出,侵蚀红壤的氮素表观激发量为负值,表明施用氮肥后不但未增加作物对土壤氮素的吸收,反而略有降低。将土壤中的残留肥料氮量减去表观激发量可计算出氮肥的净残留量<sup>[6,9]</sup>。培肥后的红壤氮素表观激发量为正值,净残留量减少,与一般结果相似<sup>[6]</sup>。

表 6 氮肥的残留量与激发效应

Table 6 Fertilizer N residue in soil and the priming effect of N fertilizer (mg pot<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	无氮区吸收 土壤氮量 Uptake of N from unfertilized soil	施氮区吸收 土壤氮量 Uptake of N from fertilized soil	土壤氮素表观激 发量 Increment in N uptake from soil by priming effect	土壤残留肥 料氮量 Fertilizer N residue in soil	净残留量 Net fertilizer N residue in soil	
					绝对量 Amount	占施氮量% of applied N
重度侵蚀红黏土	4.9	3.4	-1.5	353.2	354.7	88.2
轻度侵蚀红黏土	9.3	4.1	-5.2	372.7	377.9	94.0
重度侵蚀红砂土	5.6	3.3	-2.3	299.0	301.3	75.0
轻度侵蚀红砂土	25.3	60.6	35.3	105.1	69.8	17.4
有机培肥红黏土	110.0	136.0	26.0	108.7	82.7	20.6
无机培肥红黏土	50.0	83.3	33.3	53.9	20.6	5.1
荒地红黏土	7.8	4.7	-3.1	341.0	344.1	85.6

2.2.3 化肥氮的损失 试验结果表明(表4),化肥氮的损失在5.4%~25.4%之间,与红壤上油菜田间微区试验得出的结果相似<sup>[8]</sup>,而低于一般田间试验结果。化肥氮在轻度侵蚀红黏土中的残留比在重度侵蚀红黏土中高,因此轻度侵蚀红黏土的氮肥损失率较重度侵蚀红黏土有减少的趋势。轻度侵蚀红砂土的氮肥损失率也比重度侵蚀红砂土低,但这主要是因为轻度侵蚀红砂土的氮肥利用率较高所致。两种母质的侵蚀红壤相比,红黏土的氮肥损失率比红砂土明显降低,差异达显著水平。红黏土经无机培肥后,硝化和反硝化作用增强<sup>[4, 10~11]</sup>,氮素损失率显著提高达25.4%,而有机培肥方式的红黏土由于生物固持作用较强,因而氮素损失率比无机培肥方式的红黏土有明显的减少。

### 3 结 论

侵蚀红壤的矿化作用和供氮能力弱,其中红砂岩母质发育的红砂土的矿化量和供氮量显著高于第四纪红黏土,侵蚀轻的红壤又高于侵蚀重的红壤。由于侵蚀红壤的物理性状较差、pH值低,故氮肥利用率很低,但土壤残留氮量较高,氮肥损失率不大,这对红壤肥力的恢复和重建有利。另一方面因侵蚀红壤的生物固持能力弱,残留在土壤中的肥料氮有相当一部分以矿质氮的形态存在,又可能通过各种途径损失,而不利于肥料氮的保存。有机或无机培肥措施能有效地提高红壤氮素的矿化量、供氮量以及氮肥的利用率和在土壤中的生物固持,而以有机培肥措施更优。

### 参 考 文 献

1. 罗家贤,包梅芬,蒋梅茵等. 肥力贫瘠化红壤的特点及产生原因. 见:中国科学院红壤生态实验站编. 红壤生态系统研究(第三集). 南昌:中国农业科技出版社,1995:3:208~213
2. 鲁如坤,时正元,钱承梁等. 中亚热带低丘红壤农田生态系统养分平衡特征研究 I 农田养分循环. 见:中国科学院红壤生态实验站编. 红壤生态系统研究(第四集). 南昌:江西科学技术出版社,1997:4:56~63

3. 孙波, 张桃林, 赵其国. 我国中亚热带缓丘区红黏土红壤肥力的演化. 土壤学报, 1999, 36(2): 203~ 217
4. 李辉信, 蔡贵信, 范晓晖等. 红壤氮素的矿化和硝化作用特征. 土壤, 2000, 32(4): 194~ 197
5. 鲁如坤, 时正元. 退化红壤肥力障碍特征及重建措施 I. 退化状况评价及酸害纠正措施. 土壤, 2000, 32(4): 198~ 200
6. 朱兆良. 土壤氮素的矿化和土壤氮素有效性指标的评价. 见: 朱兆良、文启孝主编. 中国土壤氮素. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992 37~ 59
7. 周鸣铮编著. 土壤肥力学概论. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1985. 210
8. Cai Guixin, Peng Guanghao, Wu Yiwei, *et al.* Fate of urea nitrogen applied to rape grown on a red soil and efficiency of urea in raising rape yield. *Pedosphere*, 1995, 5(2): 107~ 114
9. 金翔, 韩晓增, 蔡贵信. 黑土—春小麦中三种化学氮肥的去向. 土壤学报, 1999, 37(4): 448~ 453
10. 潘映华, 李良谟, 伍期途等. 不同利用方式下红壤的硝化和反硝化活性研究. 土壤, 1988, 20: 184~ 187
11. Sahavat K L. Nitrification in some tropical soils. *Plant and Soil*, 1982, 65: 281~ 286

## SOIL NITROGEN SUPPLY CAPACITY AND FATE OF APPLIED FERTILIZER NITROGEN IN RED SOILS

Li Huixin    Hu Feng

*(College of Natural Resources & Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095)*

Cai Guixin    Fan Xiaohui

*(Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)*

### Summary

A pot experiment was conducted to study soil nitrogen (N) supply capacity in eroded and improved red soils. The eroded red soils were derived from Quaternary red clay and red sandstone. The improved red soils derived from Quaternary red clay had been applied with organic manure or inorganic fertilizers for more than 10 years. Results showed that the amount of soil N mineralized and supplied to plant in the soil derived from red sandstone was higher than in that derived from Quaternary red clay. Soil N supply capacity of the improved red soils increased significantly with the soil applied with organic manure taking the lead. When N fertilizer was applied to eroded soils the N taken up by plant was low, with high N residue left in the Quaternary red clay in particular, and unaccounted for N was low with a lower value in Quaternary red clay. When N fertilizer was applied to improved soils efficiency of N fertilizer was high. Both plant and soil recoveries in the improved soil applied with organic manure were higher than in that applied with inorganic fertilizers.

**Key words**    Ped soils, Parent materials, Extent of erosion, Nitrogen supply capacity, Fate of fertilizer N