

盆栽和田间条件下土壤¹⁵N标记肥料氮的转化

程励励 文启孝 李洪

(中国科学院南京土壤研究所)

摘要

利用¹⁵N在盆栽条件下研究了铵的矿物固定作用对肥料氮在三种土壤中转化的影响。结果表明,红壤性水稻土不固定肥料铵,但在白土和夹沙土中,56—77%的肥料氮被土壤矿物所固定,这些“新固定”的固定态铵的有效性很高,其中90%以上在30—50天内即被水稻所吸收,或者为微生物所利用转变为生物固定态氮。生物固定态氮对当季作物的有效性远较“新固定”的固定态铵的低。田间微区试验的结果还表明,甚至第二、三季作物吸收的残留肥料氮中,20—86%的氮也系来自固定态铵。作者认为,对具有较强固铵能力的土壤来说,只有了解铵的矿物固定作用,才能正确了解肥料氮的其它转化过程。

由于肥料氮在土壤中的转化方面的知识是拟定合理施肥的必要前提,因此,很多研究者研究了有机肥料氮的矿化、化肥氮的生物固定和再矿化以及它们的挥发、反硝化损失等过程。土壤矿物具有固定 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的能力,而铵的矿物固定作用与土壤氮素的上述其它转化过程又密切相关。一些培育试验表明,铵的矿物固定作用将显著减少肥料氮的损失,降低肥料铵的生物固定量^[1,2]。但还不知道培育试验结果在多大程度上和田间种植条件下的情况相符。为了了解铵的固定作用对土壤中氮素的供应和氮的生物固定过程的影响,我们对盆栽和田间微区条件下¹⁵N标记肥料氮在不同生育期间的转化过程进行了研究。本文将报道这方面获得的一些结果。

一、材料和方法

1.土壤 供试土壤包括白土(黄土状物质上发育的中性水稻土)、夹沙土(长江冲积物上发育的灰性水稻土)和红壤性水稻土(第四纪红色粘土上发育的酸性水稻土)。三种土壤分别于1984年5月来自相应的麦田表土层。各土壤的主要性状见表1。三种土壤的粘土矿物组成各不同(白土以蒙皂石为主;夹沙土主要为水云母、绿泥石和蛭石;红壤性水稻土以高岭为主,伴有蛭石),其固定态铵含量彼此间也有较大的差异。夹沙土的“固有的”固定态铵含量最高,为297ppm,白土次之,红壤性水稻土最低,仅为99ppm。

2.盆栽试验 白土、夹沙土每盆栽土1.2公斤,红壤性水稻土每盆栽土1.5公斤。供试化学氮肥包括¹⁵N标记尿素(原子百分超为21.74%)和¹⁵N标记硫酸铵(原子百分超为22.28%),前者的施用量为84ppmN,后者的施用量为85ppmN。稻草(C39.3%,N0.68%,C/N57.5)按土重的0.13%加入。各

表 1 供试土壤的主要化学性状

Table 1 Some chemical properties of soils used in experiment

土壤 Soil	采集地点 Locality	C%	N%	pH	固定态 NH_4^+-N Fixed NH_4^+-N	
					ppm	占全 N% (% of total N)
白土	江苏无锡	1.16	0.126	6.5	197	15.6
夹沙土	江苏太仓	0.96	0.120	7.2	287	23.9
红壤性水稻土	江西泰和	0.95	0.105	5.0	99	9.4

土壤设 ^{15}N -尿素+稻草一个处理,白土另加 ^{15}N -硫酸+稻草处理。各盆均加入 320ppm KH_2PO_4 ,以保証磷钾的正常供应。化肥和稻草都是与土壤均匀混合作基肥用。5月28日施入肥料后立即泡水,5月30日移栽。供试作物是南京11号中稻,秧龄20天,每盆栽插三穴,每穴二株。各处理重复5次。7月3日、23日、8月16日各取出一盆供分析用。8月29日收获。

为了节约,另布置了不种植作物的培育试验(土壤和肥料用量都为盆栽试验的1/10),以测定加入肥料10天后的 NH_4^+-N 的生物固定和矿物固定量。测定前,为了避免土壤干燥过程中部分交换性铵转变为固定态铵,土样干燥前均先洗去交换性铵,其操作步骤如下:土样取出立即加入 KCl 溶液使成 2N KCl (水:土=10:1),振荡1小时,离心,弃去上清液,再用离心法用蒸馏水洗1次,用酒精洗3次,然后在 50°C 下干燥、磨细,过100孔筛备用。测定其它各时期的 NH_4^+-N 的生物固定量和矿物固定量时,因为其时距水稻移栽已35天以上,即在水稻分蘖盛期和更晚一些时期,此时交换性铵含量已经很少,故土样干燥前未用上述方法洗涤。只在采样前1天落干,采样时在湿润状况下挑出稻根,然后将土壤晒干,去除细根、磨细、过100孔筛备用。

3. 田间微区试验 试验在江苏省望亭一块实行两年五熟水旱轮作制(双季早稻—双季晚稻—大麦—单季稻—大麦)的水稻田进行。具体试验处理等见另文¹⁾。

4. 分析方法 土壤有机碳含量用丘林法测定。土壤和植株的全氮量用克氏法测定。固定态铵用 Silva 和 Bremner 法²⁾。 ^{15}N 用质谱计测定。

二、结 果

(一) 植稻期中铵的矿物固定和释放

表2列出了植稻过程中固定态铵含量的变化。与表1中各土壤“固有的”固定态铵含量相比较,施肥10天后,白土和夹沙土新增加的固定态 NH_4^+-N 量分别为61—76ppm和99ppm,红壤性水稻土没有明显的变化。从 ^{15}N 的结果来看,施肥复水后10天,白土固定了56—64%(47.0—53.8ppm)的肥料氮,夹沙土固定了77%(64.7ppmN),而红壤性水稻土仅有1.2%的肥料氮转变为固定态铵。可见,白土和夹沙土施肥10天后转变为固定态铵的肥料氮量显著的小于土壤中新增加的固定态铵量。这说明,在新增加的固定态铵中,相当一部分来自土壤由于干土效应而矿化出来的矿质态氮。红壤性水稻土中固定态铵总量没有增加,但其中却有1.2%的肥料氮,说明发生了土壤中 ^{14}N 和肥料 ^{15}N 的交换作用。

1) 施书莲,廖海秋,文启孝,许学前,潘遵谱,1986: 几种绿肥和硫酸的氮素平衡账及其残留氮的有效性(待刊稿)。

表 2 植稻过程中固定态铵含量的变化 (ppm)

Table 2 Dynamic regime of fixed $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in the course of rice growth

土壤 Soil	处 理 Treatment	日期(日/月) Time (date/month)				
		8/VI*	2/VII	23/VII	16/VIII	29/VIII
白土	^{15}N 尿素+稻草 $^{14}\text{N} + ^{15}\text{N}$	258	238	179	162	164
	$^{15}\text{N}^{**}$	56.1	35.3	3.8	1.6	1.2
	^{15}N 硫酸铵+稻草 $^{14}\text{N} + ^{15}\text{N}$	273	236	177	169	165
	^{15}N	64.1	42.1	8.6	2.5	2.1
夹沙土	^{15}N 尿素+稻草 $^{14}\text{N} + ^{15}\text{N}$	386	346	295	262	277
	^{15}N	76.9	42.8	10.2	5.8	6.3
红壤性水稻土	^{15}N 尿素+稻草 $^{14}\text{N} + ^{15}\text{N}$	99	92	82	94	80
	^{15}N	1.2	1.7	0.8	0.8	0.4

* 施肥后 10 天, 未种作物; ** 占加入肥料 $^{15}\text{N}\%$ 。

植稻 1 个月后(分蘖盛期) 33—49% 的新固定的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 即已重新释出, 这表明, 新固定的肥料铵的有效性很高。乍看起来, 至水稻孕穗期(7 月 23 日)前, 各土壤中仍有 1—10% 的肥料氮以固定态铵存在, 但此时的固定态铵总量已不同程度的较试验开始前为低, 这证明此时实际上不但所有新固定的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均已释放出来, 而且一部分土壤中“固有的”固定态铵也释放了出来。可见, 上述残存于土壤中以固定态铵存在的肥料氮, 只不过是肥料- ^{15}N 和土壤中 ^{14}N 发生了交换作用的结果。

从孕穗期前直至收获期, 固定态铵总量和以固定态铵态存在的肥料氮量均继续下降。这说明, 部分“固有的”固定态铵在一定条件下可以作为氮素来源之一。根据差值法得到的结果, 在试验条件下, 在水稻生长期间, 每公斤白土、夹沙土和红壤性水稻土分别为作物提供了 33mg N、10mg N 和 19mg N 的“固有的”固定态铵。分别相当于种植水稻前“固有的”固定态铵总量的 16.8%, 3.5% 和 19.2%。Mengel 和 Scherer 曾观察到^[10], 种植一季作物以后, 黄土的表土和心土中的“固有的”固定态铵降低了 23% 和 22%。

(二) 肥料氮的生物固定及其再矿化

肥料氮进入土壤后, 一部分将被微生物所固定。各土壤在植稻期间的生物固定态氮量的变化如表 3 所示。由表可见, 施肥 10 天后, 在白土和红壤性水稻土中, 有 9.8—12.3% 的化肥氮转变为生物固定态。在夹沙土中, 相应的数值则高达 21.9%。夹沙土中此时的生物固定态氮量显著高于白土和红壤性水稻土, 看来是由于前者中稻草的分解速度显著大于后二者中的缘故。这一点也可由下列事实得到验证: 随着时间的推移, 在白土和红壤性水稻土中, 生物固定态氮逐渐上升, 大约在施肥后两个月内(水稻孕穗期间)达到高峰, 而在夹沙土中, 此期间生物固定态氮量则很少变化。表 3 中有两点值得注意, 一是在整个水稻生育期间并没有多少生物固定态氮再矿化出来。二是由于各土壤的粘土矿物组成不同, 因而它们的固铵能力差异较大, 但在加稻草的情况下, 它们的最高生物固定量并无明显差异(占加入肥料氮 24—28%)。这似乎表明, 肥料氮的生物固定并不受铵的矿物固定的影响。

(三) 残留氮的后效

表 3 植稻条件下氮素的固定与释放(占加入 $^{15}\text{N}\%$)

Table 3 Immobilization and release of fertilizer N in the course of rice growth

土壤 Soil	处 理 Treatment	日期(日/月) Time (date/month)				
		8/VI*	2/VII	23/VII	16/VIII	29/VIII
白土	^{15}N 尿素+稻草 残留氮	67.0	55.9	30.6	24.1	20.3
	生物固定态氮	10.9	20.6	26.8	22.5	19.6
	^{15}N 硫酸+稻草 残留氮	73.9	67.1	36.6	26.5	29.4
	生物固定态氮	9.8	25.0	28.0	24.0	27.3
夹沙土	^{15}N 尿素+稻草 残留氮	98.9	63.9	—	30.2	28.9
	生物固定态氮	21.9	21.0	—	24.4	22.5
红壤性水稻土	^{15}N 尿素+稻草 残留氮	13.5	25.7	24.5	25.4	21.4
	生物固定态氮	12.3	24.0	23.7	24.6	21.0

* 施肥后 10 天, 未种作物。

表 4 种植五季作物过程中固定态铵的变化(微区试验)

Table 4 Change of fixed $\text{NH}_4^+\text{-N}$ during 5 cropping seasons (Microplot expt.)

处 理 Treatment	固定态 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量 ppm A amount of fixed $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ppm					
	原有的 Original	第一季后 After 1st crop	第二季后 After 2nd crop	第三季后 After 3rd crop	第四季后 After 4th crop	第五季后 After 5th crop
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	203	204	199	194	195	197
紫云英	203	209	196	195	194	196
田 菁	203	214	199	196	195	196
绿 萍	203	206	205	199	201	197

表 5 种植五季作物过程中固定态 $^{15}\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的变化(微区试验)Table 5 Change of fixed $^{15}\text{NH}_4^+\text{-N}$ during 5 cropping seasons (Microplot expt.)

处 理 Treatment	固定态 $^{15}\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量(占加入 $^{15}\text{N}\%$) Amount of fixed $^{15}\text{NH}_4^+\text{-N}$ (% of added ^{15}N)				
	第一季后 After 1st crop	第二季后 After 2nd crop	第三季后 After 3rd crop	第四季后 After 4th crop	第五季后 After 5th crop
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	6.46	2.83	2.47	2.26	2.33
紫云英	4.02	2.30	1.35	1.20	1.15
田 菁	5.67	2.59	1.42	1.31	1.35
绿 萍	2.29	1.57	0.73	0.78	0.77

在田间条件下, 作物吸收的固定态铵量和残留在土壤中的肥料氮量与盆栽条件下均有所不同。由表 4 可见, 在田间微区试验条件下, 第一季作物收获时, 不但施用化学氮肥的处理土壤固定态铵量并未降低, 各施用有机肥料的处理反而有不同程度的增高。但在第三季作物收获时, 无论那一个处理, 其固定态铵含量均较试验前明显降低。这表明, 第一季作物未吸收利用“固有的”固定态铵, 并不是由于在田间条件下完全不能为作物利用, 而是由于在此条件下, 作物的根系密度较小, 因而吸收土壤养分能力相对较弱所致。

表4还指出,第三季作物以后,固定态铵含量基本保持不变。这表明,这部分固定态铵被土壤牢固地吸持着,它们不能为作物吸收利用。这一点也可为固定态 $^{15}\text{NH}_4$ 的结果所证实。由表5可见,和固定态铵总量的变化趋势相一致,来自肥料氮的固定态铵含量在种植第二季作物和第三季作物期间均明显减少,但第三季作物后却基本上保持不变。

施书莲等曾指出,肥料残留氮的有效性较低。特别是栽种第二季作物以后^[2]。肥料残留氮包括固定态铵和生物固定态氮。由表6可见,在田间条件下第二季作物利用的残留氮相当一部分仍然来自固定态铵。施用硫酸铵的处理,作物利用的残留氮,60%来自固定态铵;施用有机肥的处理,固定态铵的贡献要少一些,在22%至41%之间。已经知道,有机肥中的氮素是逐步矿化释出的,例如,即使是最易分解的紫云英当作基肥施用,在种植一季早稻期间释出的氮量也仅占施入氮量的53.8%。因此,施用有机肥料的处理中,所谓的“生物固定态氮”的利用率实际上是生物固定态氮和有机肥料中较难分解部分的有机氮的利用率的总和,由于有机肥料中较难分解部分的有机氮的数量多且其利用率低,所以它的“生物固定态氮”的利用率显著低于化学氮肥处理者。

表6 残留氮的利用率*(微区试验)

Table 6 Availability of the fixed $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ in comparison with that of the immobilized ^{15}N (Microplot expt.)

处 理 Treatment	第二季作物 During 2nd crop	第三季作物 During 3rd crop	第四季作物 During 4th crop
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	残留氮	19.53	8.25
	固定态铵	11.30	0.96
	“生物固定态氮”	8.23	7.29
紫 云 英	残留氮	16.62	6.76
	固定态铵	3.72	0.95
	“生物固定态氮”	12.90	6.31
田 菁	残留氮	15.17	6.46
	固定态铵	6.58	0.33
	“生物固定态氮”	8.59	6.13

* 以种植当季作物前的残留氮量为100%。

三、讨 论

肥料氮施入土壤中后,视土壤粘土矿物组成的不同,或者几乎完全不被粘土矿物所固定,或者绝大部分均被固定。一些研究者报道,“新固定”的固定态铵的有效性很高,在盆栽条件下,它们中的绝大部分甚至全部均可被当季作物所利用^[5,11]。本工作的结果和上述报道一致,在种植水稻约50天后90%以上的新固定的肥料氮即已被利用。这说明,铵的矿物固定作用,并不会降低肥料中氮素的利用率。而是起着增强土壤对矿质态氮的缓冲能力的作用。当然,在不同试验条件下,由于根系密度的不同,利用率的高低也会有所不同。例如,后面将要谈到,在微区试验条件下,种植一季水稻后,尚有6.5%的硫酸铵仍以固定态铵存在;Keerthisinghe等还报道^[9],在大田条件下,种植一季水稻后,尚有54—60%的氯化铵氮以固定态铵态存在。

铵的矿物固定降低了土壤溶液中铵的浓度。众所周知,铵的挥发、反硝化损失等的多少与铵的浓度密切相关^[8,13],因而铵的矿物固定可以减少肥料铵的挥发和(或)反硝化损失。Fixcher 等^[7]报道,在固铵能力极弱的土壤中,加入的肥料氮经培育 127 天后损失了 50%,在固铵能力较强的土壤中,则仅损失了 20%。文启孝等^[14]也观察到,无论紫云英或绿萍,在第四纪红色粘土中腐解的,其氮素的损失均较在下蜀黄土中的为多。在本工作中,由于种植水稻等原因肥料氮损失极少,因而看不出铵的矿物固定作用对氮素损失的影响。

夹沙土和红壤性水稻土的固铵能力虽差异较大,但它们的最高生物固定量并没有差别。反之,在夹沙土中,施肥 10 天后,转入生物固定态的肥料氮量显著地较在红壤性水稻土中者为多。这充分说明,新固定的固定态铵对微生物的有效性很高。Bower^[6]曾指出,硝化细菌利用固定态铵的能力较大麦等作物还要高。看来,无论是旱地土壤或水田土壤,在研究肥料氮等的命运时,均可不考虑铵的矿物固定作用对生物固定作用的影响。

肥料氮进入土壤后,部分将作为微生物身体的组成部分进一步转变为土壤有机质。一些培育试验指出,视土壤有机物料和培育条件的不同,到达最大净固定量和开始净矿化的时间亦不同^[14,16]。在本试验条件下,大约 30—50 天生物固定量达到最大值,以后即为净矿化。但由于施有较多量 C/N 比宽的稻草,因而其再矿化量较低。

铵的矿物固定作用对肥料氮的生物固定和再矿化虽无显著影响,但若忽视前者,则在对后者的研究中可能导致错误的概念。例如,如果把留存在土壤中的肥料氮都看作是生物固定态氮,在某些情况下,将会过高估计生物固定量的最大值及其再矿化率^[14,16]。由表 3 可见,只有在以 1:1 型矿物为主、固铵能力很小的土壤,如红壤性水稻土中,残留肥料氮量才基本上等于生物固定态氮量。

一些研究者研究了残留肥料氮对后季作物的有效性,但未将生物固定态氮和固定态铵加以区分^[2,3,15]。表 6 表明,在微区试验条件下,第二季作物吸收的残留肥料氮中 20—60% 为固定态铵。在大田条件下,这个数字可能更高。可见,如忽视铵的矿物固定作用,会认为生物固定态氮的有效性随时间的延长降低得非常快。例如把残留硫酸铵都看作是生物固定态氮,则其在第二季作物时的利用率为 19.5%,比第四季作物时(8.3%)高 1 倍多。实际上,第四季作物时生物固定态氮的有效性虽较第二季作物时明显降低,但降低的幅度远不是那样大。

总之,对具有较强固铵能力的土壤来说,铵的矿物固定和释放是土壤中氮素转化的重要过程之一,只有了解这一过程,才有可能正确了解氮素的其它转化过程。

参 考 文 献

- [1] 程励励、文启孝、施书莲,1986: 有机肥和化学氮肥配合施用对氮素的供应和转化。《我国土壤氮素研究工作的现状和展望》, 104—115 页, 科学出版社。
- [2] 施书莲、文启孝、廖海秋,1980: 绿肥植物的化学组成对其氮素有效性的影响。土壤学报, 第 17 卷 3 期, 240—246 页。
- [3] 黄东迈、高家骅、米培立,1981: 有机、无机肥料氮在水稻—土壤系统中的转化与分配。土壤学报, 第 18 卷 2 期, 107—121 页。
- [4] Broadbent, F. E. and Nekashima, T., 1971: Losses of nitrogen from some flooded soils in tracer experiments. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 35: 922—926.

- [5] Black, A. S. and Waring, 1972: Ammonium fixation and availability in some cereal producing soils in Queensland. *Aust. J. Soil Res.*, 10: 197—207.
- [6] Bower, C. A., 1951: Availability of ammonium fixed in difficulty exchangeable form by soils of semiarid region. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 15: 119—122.
- [7] Fixcher, W. R., Pfanneberg, T., Niederbudde, E. A., and Medina, R., 1981: Transformation of ^{15}N -labelled NH_4 in two soils differing in NH_4 -fixing capacity. *J. Soil Sci.*, 32: 409—418.
- [8] Hauck, R. D., 1981: Nitrogen fertilizer effects in nitrogen cycle processes. P. 551—562. In F. E. Clark and T. Rosswall (ed.) *Terrestrial nitrogen cycles*. *Ecol. Bull.* 33. Swedish Natural Science Research Council, Stockholm.
- [9] Keerthisinghe, G., Mengel, K., and Datta, S. K., 1984: The release of nonexchangeable ammonium (^{15}N labelled) in wetland rice soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48: 291—294.
- [10] Mengel, K., and Scherer, H. W., 1981: Release of nonexchangeable (fixed) soil ammonium under field conditions during the growing season. *Soil Sci.*, 131: 226—232.
- [11] Mohammed, I. H. 1979: Fixed ammonium in Libyan soils and its availability to barley seedings. *Plant Soil*, 53: 1—9.
- [12] Siliva, J. A., and Bremner, J. M., 1966: Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soil. 5, Fixed ammonium. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 30: 587—594.
- [13] Vlek, P. L. G., and Stumpe, J. M., 1978: Effect of solution chemistry and environmental conditions on ammonia volatilization losses from aqueous systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42: 416—421.
- [14] Wen Qi-Xiao, Cheng Li-li, and Shi Shu-li, 1988: Decomposition of azolla in field and its nitrogen availability to plants. p. 241—254 in *Azolla Utilization*. Los Banos Philippine.
- [15] Webster, C. P. and Dowdell, R. J., 1985: A lysimeter study of the fate of nitrogen applied to perennial ryegrass swards: Soil analyses and the final balance sheet. *J. of Soil Sci.*, 36—611.
- [16] Yoneyama, T. and Yoshida, T., 1977: Decomposition of rice residue in tropical soil. III. Nitrogen mineralization and immobilization of rice residue during its decomposition in soil. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 23(2): 175—183.

TRANSFORMATION OF ^{15}N LABELLED FERTILIZER N IN SOILS UNDER GREENHOUSE AND FIELD CONDITIONS

Cheng Lili, Wen Qixiao, and Li Hong

(*Institute of Soil Science, Academia Sinica, Nanjing*)

Summary

The effect of ammonium fixation on the transformation of ^{15}N labelled fertilizer N in three soils was studied in a pot experiment. Little fertilizer N was fixed by clay minerals in a paddy soil derived from red earth, while 56—77% of fertilizer N applied was fixed in bleached paddy soil and calcareous permeable paddy soil. Availability of these “newly” fixed ammonium N was so high that over 90% of it was recovered by rice plant or microorganisms within 30—50 day after the transplantation of rice seedlings. The availability of the biologically immobilized N to the current crop was much less than that of the “newly” fixed ammonium N. In a field microplot experiment conducted on bleached paddy soil, it was found that 20—86% of the residual fertilizer N taken up by the successive crops (2nd and 3rd crops) was derived from fixed ammonium nitrogen. The authors consider that for soils with fairly strong NH_4^+ -N-fixing capability, only the NH_4^+ -N fixation by clay minerals and its release are known, can the N immobilization, remineralization be evaluated.