

氮肥去向的研究*

I. 稻田土壤中氮肥的去向

陈荣业 朱兆良

(中国科学院南京土壤研究所)

氮肥施入土壤后的去向,直接关系到作物增产和环境保护,是农业和环境科学研究中的基本资料。

对氮肥去向的研究,以在田间条件下进行的意义比较大。因此,1978—1980年,我们在华东地区三种不同土壤上,采用田间微区¹⁵N示踪的方法,分别测定了施用于水稻和小麦的几种常用氮肥的去向,并以尿素为重点,研究了施肥方法、施肥时期、土壤水分状况以及硝化抑制剂等对氮肥去向的影响。所得结果将分别整理。本文是稻田试验方面的初步总结。

一、材料和方法

(一) 试验田基本情况 试验在淮安三堡公社盛庄一队、无锡东亭公社东亭大队和金华开化公社开化大队进行。这三个试验点自北至南依次位于江苏省北部、南部和浙江省中部,也即分别地处暖温带、北亚热带和亚热带。从自然生产条件来说,江、浙一带受海洋性气候影响,气候温和,雨量充沛(三个试验点年平均气温分别约为14.5℃、15.5℃和17.1℃,年降水量分别约为900毫米、1,100毫米和1,500毫米)^{1,2)},土地宜稻宜麦,是我国有名的农业集约经营和商品粮基地之一。试验所在的三个生产队,生产水平较高,而试验田土壤的肥力水平在当地属中上等,其耕层土壤的基本性质列于表1。

(二) 试验设计与经过 微区用直径29厘米的无底塑料圆筒压入土中做成,面积约万分之一亩,栽植四穴水稻。试验重复四次,随机区组排列。各试验点共同的试验处理包括:在栽秧时表施的三种氮肥(即硫酸铵、尿素和碳铵)、尿素的三种施用方法(即施在土表、混入表层约10厘米土壤中以及施于约6厘米深处)和二一个施肥时期(即在栽秧时在在水稻生长中期)。此外,在淮安点和金华点试验中还包括有硝化抑制剂的处理,在无锡点试验中增加了在水稻生长中期排水搁田的处理,在金华点试验中增加了在栽秧时表施硝

* 此项研究是我所土壤—植物营养化学研究室1978年起新开课题,先后由氮组和肥料组承担,工作人员还有:徐银华、张绍林(1978年度)、范钦楦(1979年度)和李阿荣(1979—1989年度)。田间试验承苏州地区农科所、淮阴地区农科所以及试验田所在生产队大力协助。

1) 江苏省土壤普查鉴定委员会编著,1965:江苏土壤志。江苏人民出版社。

2) 浙江省土壤普查土地规划工作委员会编,1964:浙江土壤志。浙江人民出版社。

表 1 土壤基本性质
Table 1 Basic properties of the soils

试验地点 Site	土壤 Soil	母质 Parent material	pH (H ₂ O)	有机质 (%) O.M.	全 N (%) Total N	CaCO ₃ (%)	代换量 (meq/ 100g) CEC	机械组成(%) (粒径: mm) Mechanical composition					
								1—0.25	0.25— 0.05	0.05— 0.01	0.01— 0.005	0.005— 0.001	<0.001
淮安 Huainan	二合土 Strongly calcareous paddy soil	黄、淮冲积物 Alluvial deposits of the Hua- ng He and the Huai He	8.45	1.87	0.129	7.73	14.3	0.3	12.5	52.6	8.0	11.0	15.6
无锡 Wuxi	黄泥土 Slightly acid paddy soil	湖冲积物 Lacustrine alluvial deposits	6.09	2.37	0.138	—	18.6	0.4	2.9	47.1	12.2	17.0	20.4
金华 Jinhua	大泥土 Strongly acid paddy soil	第四纪红色粘土 Quaternary red clay	5.14	3.33	0.186	—	10.8	2.4	5.1	26.6	17.0	23.4	25.5

注: 土样采自试验田耕层。

Note: Soil samples were taken from the plough layer of the experimental plots.

表 2 试验处理 (用肥量毫克 N/微区)
Table 2 Experimental treatments (mg N/microplot)

处理 Treatment	试验地点 Site	淮 安 Huaian		无 锡 Wuxi		金 华 Jinhua	
	施肥期 Time of application	基 肥 6 月 22 日 Basal dressing June 22	追 肥 7 月 26 日 Top dressing July 26	基 肥 5 月 18 日 Basal dressing May 18	追 肥 6 月 20 日 Top dressing June 20	基 肥 5 月 31 日 Basal dressing May 31	追 肥 6 月 10 日 Top dressing June 10
¹⁵ N-尿素基肥表施		¹⁵ N 250	¹⁴ N 250	¹⁵ N 500	0	¹⁵ N 500	0
¹⁵ N-labelled urea, surface broadcasted as basal dressing							
¹⁵ N-尿素基肥混施		¹⁵ N 250	¹⁴ N 250	¹⁵ N 500	0	¹⁵ N 500	0
¹⁵ N-labelled urea, mixed with soil as basal dressing							
¹⁵ N-尿素基肥层施 6 厘米深处		¹⁵ N 250	¹⁴ N 250	¹⁵ N 500	0	—	—
¹⁵ N-labelled urea, deeply applied as basal dressing at 6 cm							
¹⁵ N-尿素粒肥深施于 6 厘米深处		¹⁵ N 250	¹⁴ N 250	¹⁵ N 500	0	¹⁵ N 500	0
¹⁵ N-labelled supergranular urea, deeply applied as basal dressing at 6 cm							
¹⁵ N-尿素追肥表施		¹⁴ N 250	¹⁵ N 250	¹⁴ N 250	¹⁵ N 250	¹⁴ N 250	¹⁵ N 250
¹⁵ N-labelled urea, top dressing							
¹⁵ N-碳铵基肥表施		¹⁵ N 250	¹⁴ N 250	¹⁵ N 500	0	¹⁵ N 500	0
¹⁵ N-labelled ammonium bicarbonate; surface broadcasted as basal dressing							
¹⁵ N-硫酸铵基肥表施		¹⁵ N 250	¹⁴ N 250	¹⁵ N 500	0	¹⁵ N 500	0
¹⁵ N-labelled ammonium sulphate, surface broadcasted as basal dressing							
¹⁵ N-尿素基肥表施+中期烤田		—	—	¹⁵ N 500	0	—	—
¹⁵ N-labelled urea, surface broadcasted as basal dressing + drainage							
¹⁵ N-尿素+CP* 基肥表施		¹⁵ N 250	¹⁴ N 250	—	—	—	—
¹⁵ N-labelled urea + CP*, surface broadcasted as basal dressing							
¹⁵ N-硫酸铵+CP* 基肥表施		¹⁵ N 250	¹⁴ N 250	—	—	¹⁵ N 500	—
¹⁵ N-labelled ammonium sulphate + CP*, surface broadcasted as basal dressing							
¹⁵ N-硝酸钾基肥表施		—	—	—	—	¹⁵ N 500	—
¹⁵ N-labelled potassium nitrate, surface broadcasted as basal dressing							

* CP 即 2-氯-6(3 氯甲基)吡啶, 用量为氮量的 3%。

CP: 2-chloro-6-(trichloromethyl) pyridine, of which the application rate amounts to 3% of the N applied.

态氮肥的处理 (详见表 2)。各处理均以磷、钾肥为底, 用量为每微区 0.22 克 P 和 0.42 克 K。氮肥用量均为每微区 0.50 克 N (约折每亩 10 斤 N), 分一次或二次施用, 分二次施用时, 凡处理施肥, 即要研究其氮素去向的那次施肥, 才用 ¹⁵N 标记肥料。所用的各种 ¹⁵N 标记肥料的 ¹⁵N 丰度均在 10% 上下。

供试水稻选用当地主栽品种。淮安点栽植的是单季中稻, 品种为“农垦 57”, 1978 年 6 月 22 日栽秧, 1978 年 9 月 1 日水稻进入齐穗期时收获。无锡点和金华点栽植的是双季早稻, 品种为“广陆矮 4 号”。无锡点试验 1978 年 5 月 18 日栽秧, 1978 年 7 月 7 日水

稻进入齐穗期时收获。金华点试验 1980 年 5 月 31 日栽秧, 同年 7 月 23 日水稻成熟时收获。

(三) 样品的采集与分析 淮安点和无锡点试验在水稻齐穗期进行采样, 而金华点试验是俟水稻成熟才采样的。由于水稻对氮素养分的吸收至齐穗期一般已达高峰, 而在氮素养分水平较高时, 齐穗期以后植株体内累积的氮素常会有所损失。因此, 在齐穗期采样得到的 ^{15}N 平衡帐可能与成熟期进行采样的结果会有一定的差异, 但同一点的试验中不同处理间的差异, 在趋势上应是相同的。而且, 本试验的氮肥用量不高, 不同试验点的结果也可以作一粗略地相互比较。

采样时, 将各微区的稻株(包括根)和 0—20 厘米的土壤全部取出, 分别经过干燥、称重、磨碎、过筛、混匀, 然后从中分样供分析用。样品的全氮测定用 Bremner 修改的克氏法^[6], 样品的 ^{15}N 丰度测定由本所质谱室进行。

二、结果和讨论

(一) 不同品种氮肥的氮素去向 表 3 列出了氮肥作水稻基肥表施时的氮素去向。从表 3 可见, 几种氮肥比较, 在三个试验点上, 皆以碳铵氮被水稻吸收最少, 损失最多。估计这很大程度上是由于碳铵性质不稳定, 表施时分解挥发损失较为严重所造成。三个试验点上尿素的去向变化不很大, 平均统计的结果是: 水稻吸收 $29.9 \pm 9.0\%$, 土壤残留 $21.8 \pm 7.5\%$, 亏缺 $48.3 \pm 5.1\%$ 。而硫酸铵在各试验点上的去向有明显的差别: 在无锡点和金华点(非石灰性水稻土)上, 其利用率分别为 50.1% 和 58.7%, 远高于尿素, 亏缺率分别为 28.5% 和 12.7%, 远低于尿素; 但在淮阴点(石灰性水稻土)上, 其利用率降到 22.5%, 亏缺率增至 51.2%, 大体上与尿素相同。这样的结果可能与硫酸铵在石灰性土壤上直接产生的氨挥发损失有关。

一般认为, 水田是不宜施用硝态氮肥的, 因为硝态氮肥在淹水条件下易遭受反硝化脱氮损失。金华点的试验结果表明, 栽秧时表施的硝酸钾, 其氮素被水稻吸收 24.5%, 残留土壤部分仅 3.8%, 亏缺率高达 71.7%, 效果确实大大不如各种铵态氮肥(包括碳铵)。

(二) 土壤性质对氮肥去向的影响 从表 3 来看, 用作水稻基肥表施的氮肥, 在第四纪红色粘土发育的大泥土上利用率较高, 损失较少; 在太湖湖积物发育的黄泥土上利用率和亏缺率居中; 而在黄河冲积物发育的二合土上, 利用率较低, 损失较多。联系到这三种土壤的基本性质(表 1)来看, 肥料氮在土壤—植物体系中的回收率似有随土壤 pH 值增高而减小的趋势。众所周知, 氨挥发在碱性土壤上比在酸性土壤要严重得多, 因而土壤酸碱度毋庸置疑是影响氮肥去向的一个较为重要的土壤属性。虽然目下尚无适用的方法分别测定肥料氮经由各种途径损失的数量, 但一般认为^[3,8], 肥料氮在稻田中的损失, 除硝化—反硝化作用外, 氨的挥发也是一个重要的途径, 特别是当氮肥表施在石灰性土壤上的时候。至于在水稻生长期间通过流失产生的肥料氮损失量, 除一些质地轻、代换量低、渗漏量大的土壤外, 估计是微不足道的。已有结果表明, 在黄泥土上表施的硫酸铵, 其下移深度不超过 20—30 厘米^[2]。

表 3 栽秧时表施的 ^{15}N -肥料的去向Table 3 Fate of ^{15}N -labelled fertilizer broadcasted on soil surface at transplanting of rice seedlings in the field

土 壤 Soil	氮 肥 品 种 N source	水稻吸收 (地上部+根) (%) Recovery in rice plant (top + root)	土壤残留 (%) Retained in soil	亏 缺 (%) Deficit
二 合 土 (淮安) Strongly calcareous paddy soil (Huaian)	碳 铵 Ammonium bicarbonate	17.1	12.7	70.2
	尿 素 Urea	22.3	30.4	47.3
	硫 铵 Ammonium sulphate	22.5	26.3	51.2
	L. S. D 5%	2.8	6.9	7.2
	L. S. D 1%	3.8	9.5	9.9
	平均 Mean	20.6	23.1	56.3
黄 泥 土 (无锡) Slightly acid paddy soil (Wuxi)	碳 铵 Ammonium bicarbonate	24.0	18.6	57.4
	尿 素 Urea	27.5	18.6	53.9
	硫 铵 Ammonium sulphate	50.1	21.4	28.5
	L. S. D 5%	4.7	5.3	7.4
	L. S. D 1%	6.3	7.2	10.1
	平均 Mean	33.9	19.5	46.6
大 泥 土 (金华) Strongly acid paddy soil (Jinhua)	碳 铵 Ammonium bicarbonate	33.5	15.0	51.5
	尿 素 Urea	39.8	16.4	43.8
	硫 铵 Ammonium sulphate	58.7	28.6	12.7
	L. S. D 5%	6.7	9.1	9.4
	L. S. D 1%	9.0	12.3	12.8
	平均 Mean	44.0	20.0	36.0

注: 淮安点和无锡点试验在水稻齐穗期采样, 金华点试验在水稻成熟时采样。

Note: Samples were taken at full-heading stage in the experiments of Huaian and Wuxi, and at maturity in the experiment of Jinhua.

(三) 施肥方法对氮肥去向的影响 将氮肥深施于土壤还原层中, 或与耕层土壤混施是提高氮肥增产效果的常用施肥方法。表 4 结果表明, 上述二种施肥法在提高氮肥利用率和减少肥料氮素损失方面与表施方法相比, 效果大都是明显的。但值得指出的是, 在本文所研究的所有施肥方法中, 粒肥深施的利用率最高而亏缺率最低。按表 4 三个试验点结果平均统计, 它与目前最常用的全层混施方法相比, 利用率相对提高了 30—100%, 平均 73%; 亏缺率相对减少了 86—206%, 平均 127%。在碳铵粒肥的研究中, 也发现碳铵粒肥深施比粉肥深施的利用率高得多而损失低得多^[1,4,5,7]。出现这种结果的原因可能是

表 4 以不同方法施用作为基肥的 ^{15}N -尿素去向Table 4 Fate of ^{15}N -labelled urea applied as basal dressing with different methods

土壤 Soil	施肥方法 Application method	水稻吸收 (地上部+根) (%) Recovery in rice plant (top + root)	土壤残留 (%) Retained in soil	亏缺 (%) Deficit
二合土 (淮安) Strongly calcareous paddy soil (Huaian)	粉肥表施 Powder, surface broadcasted	22.3	30.4	47.3
	粉肥混施 Powder, mixed with soil	29.0	31.5	39.5
	粉肥深施 Powder, deeply dressed	25.8	23.3	50.9
	粒肥深施 Supergranule, deeply dressed	55.1	23.7	21.2
黄泥土 (无锡) Slightly acid paddy soil (Wuxi)	粉肥表施 Powder, surface broadcasted	27.5	18.6	53.9
	粉肥混施 Powder, mixed with soil	37.2	22.7	40.1
	粉肥深施 Powder, deeply dressed	37.6	18.9	43.5
	粒肥深施 Supergranule, deeply dressed	74.5	12.4	13.1
大泥土 (金华) Strongly acid paddy soil (Jinhua)	粉肥表施 Powder, surface broadcasted	39.8	16.4	43.8
	粉肥混施 Powder, mixed with soil	44.9	19.8	35.3
	粒肥深施 Supergranule, deeply dressed	62.7	18.6	18.7

注: 各试验处理间的最小显著差见表 3。

Note: L. S. D between treatments in the experiments are shown in Table 3.

表 5 在水稻生长中期表施的 ^{15}N -尿素的去向Table 5 Fate of ^{15}N -labelled urea top dressed at middle stage of rice growth

土壤 Soil	水稻吸收 (地上部+根) (%) Recovery in rice plant (top + root)	土壤残留 (%) Retained in soil	亏缺 (%) Deficit
二合土(淮安) Strongly calcareous paddy soil (Huaian)	61.8	12.4	25.8
黄泥土(无锡) Slightly acid paddy soil (Wuxi)	64.7	5.4	29.9
大泥土(金华) Strongly acid paddy soil (Jinhua)	54.8	17.3	27.9

多方面的,就目前我们的认识来看,粒肥深施与粉肥深施的基本差别在于前者较后者“完全”和“集中”。因此粒肥深施时,散布在表层的氮量甚少,从而大大减少了它通过氨的挥发和硝化—反硝化作用产生的氮素损失。另一方面,由于粒肥深施兼具集中施肥的优点,它与土壤的接触面很小,从而使它在土中的固定较少,能更多地被水稻吸收。

(四) 施肥时期对氮肥去向的影响 表5是在水稻生长中期表施的尿素 ^{15}N 的去向结果。它与表3所列的栽秧时表施的尿素 ^{15}N 去向的结果相比较,其明显的特点是水稻吸

表6 排水搁田对作基肥表施的 ^{15}N -尿素去向的影响

Table 6 Effect of temporary drainage at middle stage of rice growth on the fate of ^{15}N -labelled urea applied as basal dressing

处 理 Treatment	水稻吸收 (地上部+根)(%) Recovery in rice plant (top + root)	土壤残留 (%) Retained in soil	亏 缺 (%) Deficit
对 照 CK	27.5	18.6	53.9
排水搁田 Temporary drainage	31.8	16.5	51.7

注: 1978年无锡田间微区试验。

Note: Field microplot trials were carried out in Wuxi, 1978.

表7 硝化抑制剂西吡对氮肥去向的影响

Table 7 Effect of nitrification inhibitor (CP) on the fate of ^{15}N -labelled fertilizer applied in rice field

土 壤 Soil	处 理 Treatment	水稻吸收 (地上部+根) (%) Recovery in rice plant (top + root)	土壤残留 (%) Retained in soil	亏 缺 (%) Deficif
二 合 土 (淮安) Strongly calcareous paddy soil (Huainan)	^{15}N -尿素基肥表施 ^{15}N -labelled urea, surface broadcasted as basal dressing	22.3	30.4	47.3
	同上 + CP Ditto + CP	24.8	27.8	47.4
	^{15}N -硫酸铵基肥表施 ^{15}N -labelled ammonium sulphate, surface broadcasted as basal dressing	22.5	26.3	51.2
	同上 + CP Ditto + CP	23.8	27.2	49.0
大 泥 土 (金华) Strongly acid paddy soil (Jinhua)	^{15}N -硫酸铵基肥表施 ^{15}N -labelled ammonium sulphate, surface broadcasted as basal dressing	58.7	28.6	12.7
	同上 + CP Ditto + CP	55.1	25.8	19.1

收利用部分较多(高达 54.8—64.7%), 而土壤残留部分较少(只有 5.4—17.4%)。合计起来, 它亏缺部分虽有所减少, 但还是相当可观的(25.8—29.9%)。我们知道, 氮肥施入土壤后, 植物的吸收, 微生物和粘土矿物的固定, 以及氨的挥发和硝化—反硝化损失三者之间必然存在着相互竞争的关系。在水稻生长中期, 根系已经发育完全, 对肥料氮的吸收量和吸收速率较大, 竞争能力强, 因而中期追肥的利用率一般较高。至于固定作用和损失的相对强弱问题, 从所得结果来看, 前一作用似乎弱于后一作用, 因此, 肥料氮在土壤中残留量大大减少, 而损失仍然比较高。

(五) 排水搁田和硝化抑制剂对氮肥去向的影响 一般认为, 稻田干湿交替会加剧氮素损失, 而生产上常采用在水稻生长中期排水搁田来控制水稻的营养生长, 人们很关心它到底对氮肥去向的影响如何? 从无锡点初步试验结果来看(表 6), 中期搁田似乎并不使栽秧时施入的肥料氮素损失有所增加。当然, 如果反复排灌或氮肥(特别是尿素)是在临近排水时表施的话, 那末通过排水产生的氮素损失将是严重的。

为了避免或减少肥料氮通过硝化—反硝化作用损失, 国内外对硝化抑制剂曾进行了大量的试验研究, 但迄今对其实际使用效果还未获一致肯定。淮安点和金华点的试验结果表明, 硝化抑制剂西吡[化学名称 2-氯-6(三氯甲基)吡啶, 代号 CP 或 N-Serve] 对稻田氮肥去向并无显著影响(表 7)。看来, 西吡在减少肥料氮素损失和提高作物对肥料氮素利用率上不是无效, 就是在我们的试验中没有提供发挥其效果的条件。从实践和理论的角度出发, 对硝化抑制剂种类及其有效使用的条件, 值得进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院南京土壤研究所长效肥组, 1974: 碳酸氢铵粒肥的肥效和机械造粒。土壤, 第 3 期, 91—96 页。
- [2] 朱兆良、蔡贵信、俞金洲, 1977: 稻田中 ^{15}N 标记硫酸铵的氮素平衡的初步研究。科学通报, 22 卷, 503 页。
- [3] 朱兆良, 1979: 土壤中氮素的转化和移动的研究近况。土壤学进展, 第 2 期, 1—16 页。
- [4] 陈荣业、范钦楨、曹志洪、蒋佩弦, 1978: 几种 ^{15}N 标记的氮肥对稻、麦不同施用方法的比较研究。土壤, 第 6 期, 213—217 页。
- [5] 陈荣业、范钦楨, 1978: 碳铵粒肥在非石灰性水稻土上深施的氮素供应状况。土壤学报, 第 15 卷 1 期, 75—82 页。
- [6] 邢光熹、曹亚澄, 1978: ^{15}N 质谱分析某些技术的改进。土壤, 第 6 期, 224—229 页。
- [7] Ching-kwei Li and Rong-ye Chen, 1980: Ammonium bicarbonate used as a nitrogen fertilizer in China. Fertilizer Research, 1:125—136.
- [8] Craswell, E. T and Vlek, P. L. G., 1979: Fate of fertilizer nitrogen applied to wetland rice, in "Nitrogen and Rice", 175—192, IRRI, Manila, Philippines.

STUDIES ON FATE OF NITROGEN FERTILIZER

I. THE FATE OF NITROGEN FERTILIZER IN PADDY SOILS

Chen Rong-ye and Zhu Zhao-liang

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

Summary

In both calcareous and noncalcareous paddy soils, the fate of urea, ammonium sulfate and ammonium bicarbonate were investigated in microplot experiments laid out in the rice fields using ^{15}N tracer technique. The results obtained showed that when the N-fertilizers were surface-broadcasted as basal dressing, the recovery of ammonium bicarbonate was the lowest, while the N-loss was the greatest. The balance sheets of urea-N in the strongly calcareous, slightly acid and strongly acid paddy soils showed that the recoveries in rice plant were 22.3%, 27.5% and 39.8%, the N retained in soils were 30.4%, 18.6% and 16.4%, and the N deficits were 47.3%, 53.9% and 43.8%, respectively. In the two noncalcareous paddy soils, the recovery of ammonium sulfate amounted to 50.1% and 58.7%, but in a calcareous paddy soil, it decreased to 22.5%. Obviously, the nitrogen loss through ammonia volatilization in the calcareous paddy soil may play an important role in addition to denitrification. The deep-dressing of granulated urea and ammonium bicarbonate was the most effective method for the application of N-fertilizers. Besides, experiments also revealed that N-fertilizer top-dressed at the middle stage of rice growth gave a high recovery about 60% by the rice plant. Experiments also showed that the loss of fertilizer nitrogen were not significantly affected either by temporary drainage at the vigorous tillering stage or by the application of nitrification inhibitor (CP).