

苏州地区平田黄泥土氮素供应过程的特点及其与氮肥施用方法的关系*

朱兆良 陈荣业 徐永福 徐银华 张绍林

(中国科学院南京土壤研究所)

氮肥对作物的增产效果, 决定于作物对氮肥的吸收率(即氮肥的利用率)和作物体内累积的氮素转化成经济产量的效率。水稻对氮肥的利用率一般显著低于旱作, 未被吸收利用的部分从土壤中的损失一般也较早地多。例如, 就太湖地区来说, 硫酸做返青肥表施时, 氮素利用率为40—47%, 损失达到34—36% (朱兆良等, 1977), 碳铵表施的利用率一般不足30%, 低的只有11% (陈荣业等, 1978; 奚振邦等, 1978)。研究表明, 氮肥深施、全层混施以及球肥或粒肥深施是提高氮肥利用率的有效措施^{1,2)} (Broeshart, 1971; 中国科学院南京土壤研究所长效肥组, 1974; 陈荣业等, 1978; 奚振邦等, 1978)就水稻体内累积氮素的稻谷生产效率来说, 影响的因素当然比较多。从土壤肥料的角度来看, 至少也应包括养分之间的协调供应, 以及土壤氮素供应过程与水稻需求之间的协调程度等两个方面。对于后一问题来说, 除了应当了解高产水稻的需氮特点外, 还必须弄清楚施氮肥后土壤所表现出来的氮素供应过程的特点。但是, 这方面的研究工作相对比较薄弱。在碳铵粒肥的研究和推广中已经发现, 粒肥深施的供氮特点与粉肥表施的显著不同 (陈荣业、范钦楨, 1978), 在掌握不当时, 常会出现前期生长缓慢、后期贪青的现象, 其结果是氮肥利用率虽然很高, 但氮素的稻谷生产效率却很低, 增产效果没有得到充分的发挥。目前尿素的产量激增, 尿素粒肥深施的问题也引起了重视 (吴金桂等, 1978), 但与碳铵粒肥深施时一样, 也存在着如何使其供氮特点与水稻的需求之间相协调的问题。因此, 必须研究土壤和氮肥的各自供氮特点及其相互影响。

群众经验早已指出, 土壤有不同的供肥特性。例如, 北方有“发小苗”和“发老苗”的说法, 南方则称之为“早发”和“晚发”。不同土壤上氮肥也有“见效快慢和持效长短”的不同。这些既是土壤本身供氮特点的反映, 也表明氮肥对土壤氮素供应状况的影响还受到土壤性质的制约。有关氮肥对土壤氮素供应状况影响的问题我们曾经进行过一些研究, 并指出氮肥在稻田土壤中的生物固定和再矿化过程, 以及铵态氮的吸附—解吸过程是影响氮肥见效快慢和持效长短的重要因素 (中国科学院南京土壤研究所主编, 1978), 这是就有机质和粘粒含量差异较大的土壤之间所表现出来的稳肥性的不同而言的, 也包括了有机肥料的影响。但是, 就当前来说, 苏州地区自大面积改种双三制以来, 一部分土壤出现了结构

* 本文经李庆远教授审阅指正, 谨致谢意。

1) 湖南省土壤肥料研究所, 1973: 提高化肥利用率的施肥技术——深层施肥的研究。土肥与科学种田, 第3期, 13—17页。

2) 辽宁省农科院农业物理研究所, 1975: 利用同位素¹⁵N对水稻几种氮肥施用方法的比较研究。(资料)

性变差的问题(陈家坊等, 1975)。研究这种变化对土壤氮素供应过程的影响, 不仅有助于了解改制后土壤肥力的演变情况, 而且也是因土制宜确定氮肥施用方法的一个重要依据。

因此, 在本工作中, 我们一方面探讨水稻土结构性的好坏对氮素供应过程的影响及其机理, 另一方面也同时研究氮肥在不同结构性的土壤中的供氮特点及其与氮肥施用方法的关系, 而以尿素作为重点研究对象。

一、试验设计和方法

试验于 1978 年早稻期间在江苏省无锡县东亭大队进行。试验田土壤是冲积—湖积物发育的两块粘壤质潜育性水稻土, 冬作期间地下水位约在 1 米以下, 前作皆为大麦。其一是高肥的鳊血黄泥土, 结构性和通透性均较好, 土块较松, 水稻易于早发, 后期也不脱力; 另一是僵板黄泥土, 肥力水平中等, 结构性和通透性都较差, 土块比较僵硬, 水稻早期生长较慢, 但后劲较足。据反映, 这两种土壤一年三熟的总产量可相差 400 斤左右。试验田土壤的某些性质见表 1。

表 1 试验田土壤的理化性质

土壤	pH (H ₂ O)	全 N (%)	有机质 (%)	C/N	速效磷 (P, ppm)	速效钾 (K, ppm)	<0.001 毫米* 粘粒(%)	<0.01 毫米* 粘粒(%)
鳊血黄泥土	6.6	0.153	2.53	9.6	—	—	23.0	52.4
僵板黄泥土	5.9	0.141	2.26	9.3	15	78	23.5	51.1

注: 速效磷用 0.5M NaHCO₃ 浸提法, 速效钾用 1N NH₄OAc 浸提法。

* 徐富安、许秀云同志测定。

试验分两组进行。

(一) 氮肥的氮素平衡 只在鳊血土上进行。采用田间微区方法。在种稻前埋入直径 29 厘米、高 35 厘米的无底塑料筒 32 个, 每个筒的面积约为万分之一亩。水稻品种为广陆矮 4 号, 秧龄 38 天, 5 月 18 日淹水按处理施肥、插秧, 每筒 4 穴, 每穴 4 株, 每株平均茎蘖数 3.1。各筒皆以磷、钾肥为底 (K₂HPO₄ + KCl), 用量为 P₂O₅ 和 K₂O 各 0.5 克/筒。氮肥处理如表 2, 4 个重复。氮肥用量均为 0.5 克 N/筒 (约折 10 斤 N/亩), ¹⁵N 丰度为: 尿素 9.65%、硫酸铵 13.33%、碳酸铵 11.21%。试验进行至 7 月 7 日水稻齐穗期结束, 取 0—20 厘米土壤和植株 (包括根系) 进行测定。

(二) 水稻对土壤氮和肥料氮的吸收过程 在两种土壤上同时进行测定, 但只做表 2 中的一部分处理, 并增加不施氮肥区 (CK)。试验方法同上, 但氮肥用量降为 0.4 克 N/筒, 硫酸铵的 ¹⁵N 丰度改为 11.30%。每个处理 10 筒, 每次采两筒作为重复。每次采样时, 将筒内植株全部取出, 剪去根系后供植株分析用, 同时将 0—20 厘米土壤全部取出混匀后分样供土壤分析用。

取一部分新鲜土样用 2NKCl 提取, 蒸馏测定 NH₄-N, 土液比为 1:5 (第 1、2 次采样时) 和 1:2.5 (第 3、4、5 次采样时)。其余的土样风干后测定全氮。土壤和植株的全氮测定采用 Bremner 修改的克氏法 (邢光熹等, 1978), 但施肥后第 6 天和第 11 天的土样则先用

表2 氮肥施用方法

代号	施 用 方 法
U 表	¹⁵ N 尿素作基肥表施,不扰动表层土壤
U 混	¹⁵ N 尿素混施于6厘米表土中作为基肥
U 深	¹⁵ N 尿素呈层状深施于6厘米深处。类似于氮肥撒施于田面后耕翻入土的深施方法,但深度略较浅些
U 粒	¹⁵ N 尿素在压片机上压成片状,塞施于四穴稻之间的6厘米深处做基肥。粒肥距每穴稻的水平距离约10厘米
U 穗	半量普通尿素作基肥表施,半量 ¹⁵ N 尿素于6月20日做穗肥表施,不扰动土壤
Nc 表	¹⁵ N 碳铵做基肥表施,不扰动土壤
Ns 表	¹⁵ N 硫酸铵做基肥表施,不扰动土壤
U 烤	¹⁵ N 尿素做基肥表施,不扰动土壤,中期烤田

水杨酸处理,以包括土壤风干过程中可能形成的硝酸态氮。样品的¹⁵N丰度的测定由我所质谱室承担。

二、试验结果和讨论

为了叙述方便起见,我们以¹⁴N代表土壤来源氮,¹⁵N代表肥料来源氮。土壤NH₄-N和水稻吸收氮的测定结果列于表3和表4,由各次土壤NH₄-N与水稻吸收氮量之和计得的氮素总供应量的结果列于表5。

(一) 不施氮肥时,土壤氮素的矿化和水稻对¹⁴NH₄-N的吸收 从图1来看,两种土壤对照区的氮素总供应量,都在6月8日以后迅速增加,这与有效积温的迅速增加是一致的(表6)。从不同土壤来看,鳝血土始终高于僵板土,但是,其高出的程度已远远超过了全氮含量的差异。例如,在6月8日和28日时,两个土壤的氮素总供应量的比值都为1.7,而土壤全氮的比值却只有1.1(表1)。从耕层的有效积温来看,二者并无明显的不同。从土壤性质来看,两种土壤的主要差别是结构性和pH。结构性好的鳝血土,土块松而易碎,

表3 土壤中的NH₄-N量(毫克N/筒)

土 壤	处 理	5月24日			5月29日			6月8日			6月28日			7月28日		
		¹⁴ N	¹⁵ N	合	¹⁴ N	¹⁵ N	合									
鳝血黄泥土	U 表	163	61	224	129	19	148	—	—	—	77	2	79	—	—	—
	U 混	152	80	232	119	39	158	71	3	74	78	2	80	—	—	—
	U 粒	180	199	379	149	154	303	120	14	134	119	3	122	—	—	—
	Ns 表	170	112	282	110	27	137	—	—	—	108	3	111	—	—	—
	CK	99	0	99	87	0	87	60	0	60	85	0	85	—	—	—
僵板黄泥土	U 表	129	54	183	71	17	88	58	4	62	51	2	53	89	2	91
	U 粒	118	112	230	132	156	288	107	42	149	62	2	64	81	2	83
	CK	79	0	79	71	0	71	48	0	48	47	0	47	81	0	81

注:¹⁴N代表土壤来源部分;¹⁵N代表肥料来源部分;合代表¹⁴N部分加¹⁵N部分的总量。下同。

表 4 水稻(地上部分)吸收氮量*(毫克 N/筒)

土 壤	处 理	5 月 24 日			5 月 29 日			6 月 8 日			6 月 28 日			7 月 28 日		
		¹⁴ N	¹⁵ N	合												
鱧血黄泥土	U 表	17	37	54	27	77	104	—	—	—	480	113	593	—	—	—
	U 混	23	29	52	29	81	110	108	107	215	508	129	637	—	—	—
	U 粒	13	15	28	31	55	86	113	253	366	467	272	739	—	—	—
	Ns 表	33	38	71	65	101	166	—	—	—	541	152	693	—	—	—
	CK	3	0	3	17	0	17	91	0	91	433	0	433	—	—	—
僵板黄泥土	U 表	15	33	48	21	56	77	88	82	170	304	97	401	515	99	614
	U 粒	-16	5	-11	-10	28	18	64	156	220	336	269	605	459	201	660
	CK	1	0	1	4	0	4	43	0	43	254	0	254	454	0	454

* 已扣除秧苗含氮量 106 毫克/筒。

表 5 氮素总供应量(每筒中水稻吸收 N + 土壤 NH₄-N 的毫克数)

土 壤	处 理	5 月 24 日			5 月 29 日			6 月 8 日			6 月 28 日			7 月 28 日		
		¹⁴ N	¹⁵ N	合												
鱧血黄泥土	U 表	180	98	278	156	96	252	—	—	—	557	115	672	—	—	—
	U 混	175	109	284	148	120	268	179	110	289	586	131	717	—	—	—
	U 粒	193	214	407	180	209	389	233	267	500	586	275	861	—	—	—
	Ns 表	203	150	353	175	128	303	—	—	—	649	155	804	—	—	—
	CK	102	0	102	104	0	104	151	0	151	518	0	518	—	—	—
僵板黄泥土	U 表	144	87	231	92	73	165	146	86	232	355	99	454	604	101	705
	U 粒	102	117	219	122	184	306	171	198	369	398	271	669	540	203	743
	CK	80	0	80	75	0	75	91	0	91	301	0	301	535	0	535

注: 每筒施入肥料氮 400 毫克。

大土块相对较少,加之泡水后土块易于化开,因此氮素矿化速率可能比较高;而结构性差的僵板土,土块僵硬不易碎散,而且泡水后也不易化开,氮素矿化也就比较慢。过去在这方面也曾有所报道(中国科学院南京土壤研究所主编,1978)。此外,结构性不同所引起的通透性的差异,以及土壤 pH 的不同,都可能导致微生物活性的不同。这些都是需要进一步研究的问题。

不施氮肥时,水稻吸收的氮量当然决定于土壤氮素的矿化量,但在水稻生长早期二者也不是严格成比例关系的。例如,从图 1 来看,从插秧到 6 月 8 日分蘖期间的三次测定中,鱧血土的对照区水稻吸收的氮量占土壤氮素总供应量的百分率都明显高于僵板土,到 6 月 28 日时这种差异才消失。这意味着,在分蘖期间,水稻对鱧血土中 ¹⁴NH₄-N 的吸收利用比较快。

由此看来,从氮素供应的角度来说,鱧血土上水稻表现为早发的原因有:(1)土壤氮

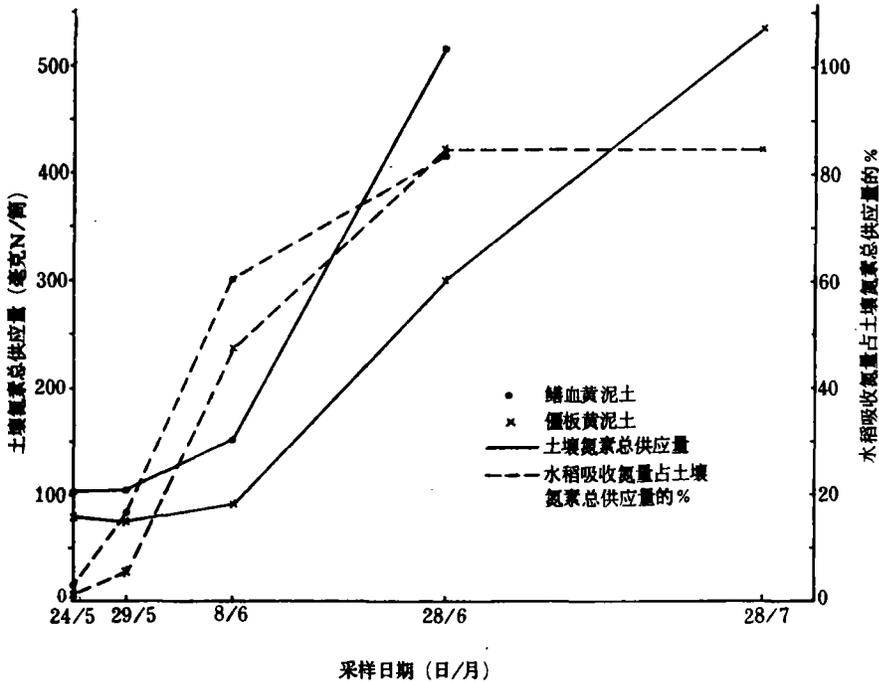


图1 对照区土壤氮素总供应量及水稻吸收氮量占土壤氮素总供应量的比例

表6 早稻生长期间耕层5厘米处的有效积温($^{\circ}\text{C}$)

土壤	5月24日	5月29日	6月8日	6月28日	7月28日
蜡血黄泥土	49.1	86.0	146.0	333.0	—
僵板黄泥土	44.1	79.6	138.6	331.0	673.9

注：每天于6、8、14、20时观测土温，计得日平均土温。日平均土温减去 15°C 计为有效温度，表列各时间的有效积温是从5月18日插秧后开始计算的。

素的矿化速率高，(2)在分蘖期间土壤矿化所形成的 $^{14}\text{NH}_4\text{-N}$ 能较快地被水稻所吸收。

(二) 氮肥的氮素平衡 硫酸铵的氮素平衡情况(表7)与过去的结果(朱兆良等, 1977)基本一致,但利用率有所增加,氮素损失略有减少,这显然是由于采样时间的不同所致。尿素和碳铵做基肥表施时,利用率相近而远低于硫酸铵表施,损失则达一半以上。尿素混施或层状深施都可显著提高利用率、减少损失。尿素粒肥深施的利用率最高,损失很少。尿素做穗肥表施的利用率也很高,但土壤中的残留量显著减少,氮素损失虽比基肥表施时明显减少,但仍达30%。

粒肥深施比粉肥层状深施或混施的利用率高得多而损失低得多的原因是值得进一步研究的。Reddy等(1976)指出,还原层中的铵向氧化层移动而引起的反硝化损失的氮量可占反硝化总损失量的一半。因此,影响铵向氧化层移动的各种因素都将可能影响到反硝化损失的氮量。我们推想,在层状深施或混施的情况下,氮肥向表层移动的截面积都比粒肥深施的大得多,因此,其反硝化损失量也就可能大得多。此外,粒肥深施所造成的施肥部位局部条件(如pH)的改变,也是应当考虑到的问题。陈华癸、周启(1961)认为,由

表 7 ¹⁵N 标记氮肥的氮素平衡(占施入 ¹⁵N 肥料氮的%)
(1978, 早稻, 齐穗期, 鱈血黄泥土)

处 理	水稻吸收(包括根系)	土壤中残留	亏 缺
U 表	27.5	18.6	53.9
U 混	37.2	22.7	40.1
U 深	37.6	18.9	43.5
U 粒	74.5	12.4	13.1
U 穗	64.7	5.4	29.9
Nc 表	24.0	18.6	57.4
Ns 表	50.1	21.4	28.5
U 烤	31.8	16.5	51.7
最小显著差 5%	4.7	5.3	7.4
1%	6.3	7.2	10.1

表 8 氮肥做基肥表施时氮素平衡情况的动态观测(占施入 ¹⁵N 肥料氮的%)

土 壤	处 理	采 样 日 期	水稻地上部分	土壤中残留	亏 缺
鱈血黄泥土	Ns 表	5 月 24 日	9.5	54.8	35.7
		5 月 29 日	25.3	37.3	37.4
		6 月 28 日	38.0	27.0	35.0
	U 表	5 月 24 日	9.3	49.3	41.4
		5 月 29 日	19.3	33.5	47.2
		6 月 28 日	28.3	29.5	42.2
僵板黄泥土	U 表	5 月 24 日	8.3	73.5	18.2
		5 月 29 日	14.0	49.5	36.5
		6 月 8 日	20.5	40.3	39.2
		6 月 28 日	24.3	27.8	47.9

于在水稻根面和根外也存在有氧化层和还原层的分异, 因而铵态氮可能在根表转化成硝酸态氮, 再在根外还原层遭到反硝化。如果这一机制存在的话, 则粒肥深施与粉肥层状深施或混施之间, 由这种机制所引起的反硝化损失量是否有所不同的问题, 也是值得进一步探讨的。

氮肥表施后 ¹⁵N 平衡情况的动态测定结果列于表 8。从总趋势来看, 氮肥做基肥表施后, 大量的损失是发生在施肥后的最初 11 天内, 到 ¹⁵NH₄-N 降至较低水平后(表 3), 肥料氮的损失量也就不再明显增加。Broadbent 和 Tusneem (1971), 吉野和出井 (1978) 也都报告过类似的结果。从两种土壤来看, 鱈血土中氮素损失似比僵板土中的快一些, 但到 6 月 28 日时的损失量则相近。

(三) 氮肥在土壤中的转化 在硫酸表施的情况下, 其初期的 ¹⁵N 总供应量迅速降低(表 5), 至 11 天时达到最低点, 共减少肥料氮 272 毫克, 占施入量的 68.0%, 从表 8 来看, 此时氮素损失为 37.4%, 折 150 毫克, 因此可以计得最大固定量为 122 毫克, 占施入氮量的 30.5%。这种固定态氮在水稻生长过程中可以部分地释放出来(朱兆良等, 1963; 関矢、志贺, 1975; 吉野、出井, 1978)。从转折点 5 月 29 日到 6 月 28 日, 硫酸处理的 ¹⁵N 总供应量增加 27 毫克, 即其再利用部分约占最大固定量的 22% (占施入氮量的 6.8%)。

尿素施入土壤后迅速进行水解,其水解速率受到土壤性质和施肥方法的影响。从图 2 来看,尿素表施时, ^{15}N 总供应量在 5 月 24 日以后虽有所增减(主要是由于如上所述的氮素损失,以及生物固定和再矿化作用的结果),但幅度不大,似乎表明水解是很快的,而且两种土壤之间没有明显的差别。尿素混施时水解也很快。但是,尿素粒肥深施时情况却有所不同。在两种土壤上, ^{15}N 总供应量都表现出明显突增的情况,尤以僵板土中更为明显,表明其水解速率比表施或混施时慢得多,特别是在僵板土中。

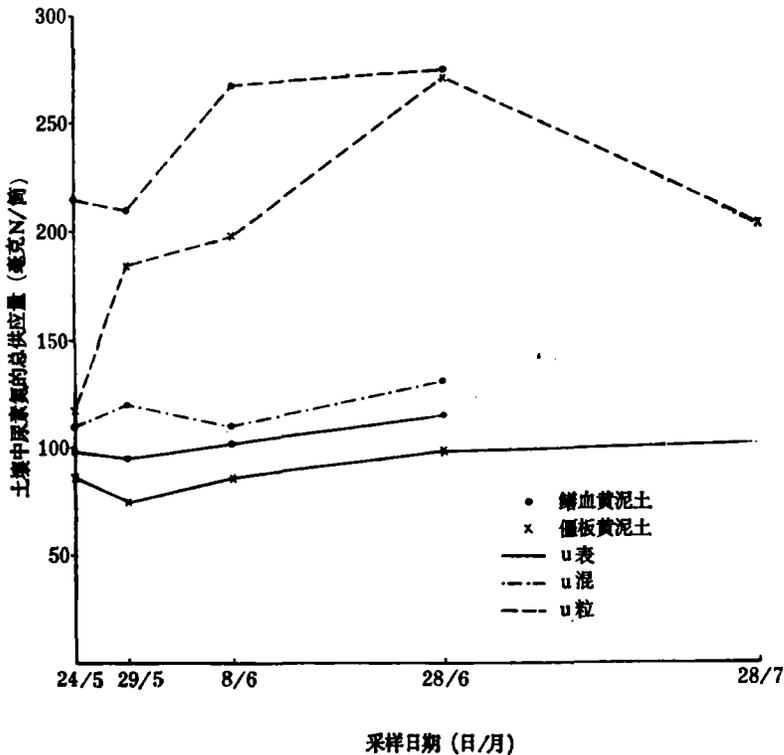


图 2 土壤中尿素来源的氮素总供应量的变化

尿素水解成铵后也将进一步遭受损失或固定。因此,在表施后初时, ^{15}N 总供应量急剧减少,至 5 月 29 日时降至最低点,对鳝血土和僵板土来说, ^{15}N 总供应量比施入 ^{15}N 量分别减少 304 毫克和 327 毫克,占施入 ^{15}N 量的 76% 和 82%。从表 8 来看,此时肥料氮损失 47.2% 和 36.5%,即每筒的损失量分别为 189 和 146 毫克,由此算得最大固定量分别为 115 毫克和 181 毫克(占施入氮量的 29% 和 45%)。到 6 月 28 日时再矿化量为 19 毫克和 26 毫克,占最大固定量的 16.5% 和 14.4%(占施入氮量的 4.8% 和 6.5%)。6 月 28 日以后 ^{15}N 总供应量不再明显增加,例如在僵板土上,从 6 月 28 日到 7 月 28 日期间,尿素表施时 ^{15}N 总供应量只增加 2 毫克,表明从 6 月 28 日以后,固定态肥料氮的释放量已经很少了。

(四) 水稻对肥料氮的吸收 水稻对表施肥料氮的吸收是很快的。从表 4 来看,两种土壤上在施肥后的 11 天内,水稻所吸收的 ^{15}N 量都已占最后一次测定时水稻吸收 ^{15}N 量的一半以上。到 21 天后水稻大量吸收氮素时,其主要氮源则来自土壤氮素的矿化。

尿素混施时，水稻对肥料氮的吸收情况与表施时相似（表 4），只是在施肥后第 6 天时，吸收量略低一些，此后即转而略高于表施的处理。

粒肥深施与其他施用方法显著不同，其利用率虽然最高，但是，在施肥后的 11 天内，水稻吸收的粒肥氮量都明显低于表施或混施的处理，吸收高峰迟到 11—21 天间（鱮血土）和 11—41 天间（僵板土）（表 4）。

按照同位素稀释原理推测，水稻所吸收的 ^{15}N 量与 ^{14}N 量之比应与土壤中 $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ 与 $^{14}\text{NH}_4\text{-N}$ 之比相等，但是，从表 3 和表 4 所计得的这些比值却并非如此。以鱮血土尿素表施的处理为例，在 5 月 24 日和 29 日时，土壤中 $^{15}\text{NH}_4\text{-N}/^{14}\text{NH}_4\text{-N}$ 之比分别为 0.37 和 0.15，但是在此期间水稻所吸收的 ^{15}N 量与 ^{14}N 量的比值却高达 4.0（从 5 月 24 日到 29 日的 5 天内，该处理水稻吸收 ^{15}N 量为每筒 40 毫克，吸收 ^{14}N 量只有 10 毫克）。这意味着水稻偏向于更多地吸收 $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ 。因此，水稻吸收的 ^{15}N 量占 ^{15}N 总供应量的百分率也就显著高于水稻吸收 ^{14}N 量占 ^{14}N 总供应量的百分率（图 3）。从图 3 还可以看到，到 6 月 28 日水稻进入旺盛生长阶段后，这种差异即显著缩小。即随着生长的推移，水稻对 $^{14}\text{NH}_4\text{-N}$ 的吸收也渐趋充分。在这方面，粉肥混施与表施的情况相似，但粒肥深施时情况却显著不同。在施肥后的初期，粒肥的 $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ 被水稻吸收的快慢程度与 $^{14}\text{NH}_4\text{-N}$ 相近，而远低于于粉肥表施或混施的处理。

（五）氮肥对土壤氮素矿化和水稻吸收土壤氮的促进作用 不同氮肥处理中，土壤氮素矿化的激发量列于表 9。虽然各次测定结果波动较大，但从趋势上看，硫酸铵的激发作用比较强。尿素粒肥在僵板土上的激发作用则表现得比较迟。这与该土壤中尿素粒肥的水解较慢有关。

氮肥对水稻吸收土壤氮素的促进作用（表 10）与其对氮素矿化的激发作用是一致的。

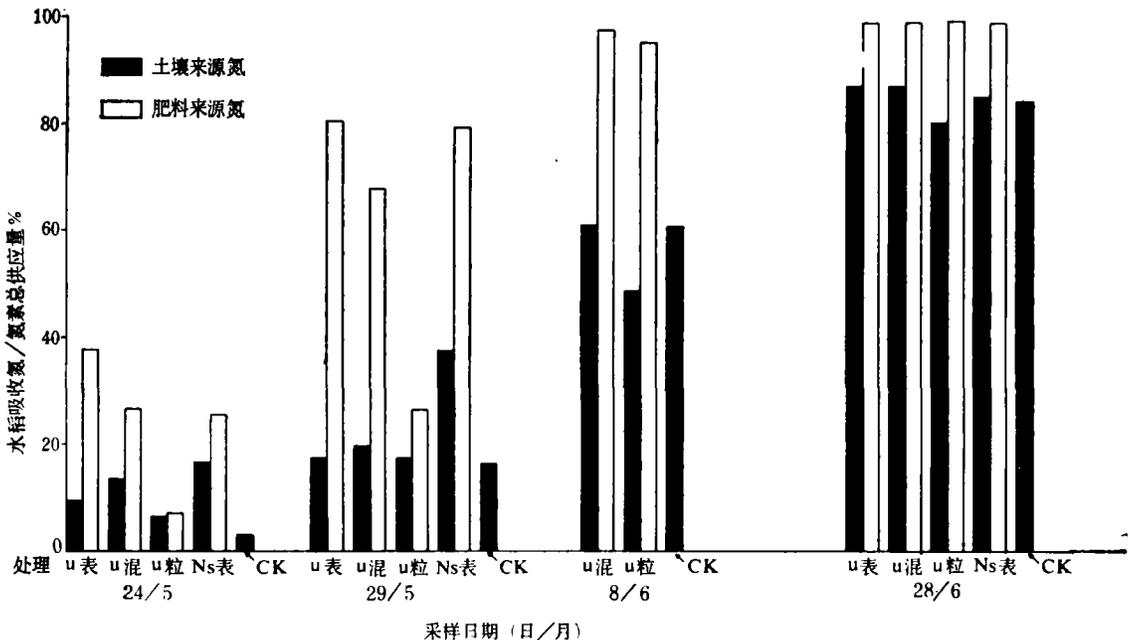


图 3 水稻吸收氮占氮素总供应量的比例(鱮血黄泥土)

表 9 氮肥对土壤氮素矿化的激发量(毫克 N/筒)

土壤	处理	5月24日	5月29日	6月8日	6月28日	7月28日
鱗血黄泥土	U 表	78	52	—	39	—
	U 混	73	44	28	68	—
	U 粒	91	76	82	68	—
	Ns 表	101	71	—	131	—
僵板黄泥土	U 表	64	17	55	54	69
	U 粒	22	47	80	97	5

注: 由施氮处理的¹⁴N总供应量(表5)减去同次测定中CK区的¹⁴N总供应量即得激发量。

表 10 氮肥对水稻吸收土壤氮素的促进量(毫克 N/筒)

土壤	处理	5月24日	5月29日	6月8日	6月28日	7月28日
鱗血黄泥土	U 表	14	10	—	47	—
	U 混	20	12	17	75	—
	U 粒	10	14	22	34	—
	Ns 表	30	48	—	108	—
僵板黄泥土	U 表	14	17	45	50	61
	U 粒	-17	-14	21	82	5

注: 施氮处理水稻吸收¹⁴N量(表4)减去同次测定中CK区水稻吸收¹⁴N量即得促进量。

但是,在僵板土上,粒肥深施后的初期,虽然已表现出了一定的激发作用,但对水稻吸收土壤氮素的促进作用却并未表现出来。

(六) 施肥后两种土壤上水稻吸收氮量的差异 水稻吸收的总氮量当然因施用氮肥而显著增加(表4),但施用氮肥是否扩大了两种土壤之间的差异呢?看来,不同施用方法下情况不尽相同。在尿素表施时,两种土壤上,氮肥对水稻吸收土壤氮素的促进量相同,而且,水稻对表施尿素氮的吸收量的差异也不大,因此,尿素表施并未明显地扩大两种土壤上水稻吸收总氮量的差异(表11)。但是,尿素粒肥深施时,情况就有所不同。在粒肥深施后的初期,两种土壤上水稻吸收的土壤氮量的差值比不施肥时有所扩大,加之对粒肥氮的吸收也有明显的不同,因此,水稻吸收的总氮量的差值就显著地大于不施氮肥时的差值(表11)。这与僵板土上粒肥的激发效应表现得比较迟、水稻对该土中粒肥氮的吸收又

表 11 两种土壤上水稻吸收氮量的差异及其来源(毫克 N/筒)

处理	来源	5月24日	5月29日	6月8日	6月28日
CK	¹⁴ N	2	13	48	179
U 表	¹⁴ N	2	6	—	176
	¹⁵ N	4	21	—	16
	总量	6	27	—	192
U 粒	¹⁴ N	29	41	49	131
	¹⁵ N	10	27	97	3
	总量	39	68	146	134

注: 表内数据系鱗血土上水稻吸收氮量减去僵板土上水稻吸收氮量。

比较慢有密切的关系。

(七) 养分移动性概念在稻田土壤氮素供应过程研究中的应用 作物对土壤养分的吸收利用, 不仅决定于养分的化学形态, 而且还与其移动性的大小有密切的关系 (Bray, 1954; Barber, 1962)。养分从土壤到达根面的过程, 包括(1)养分由土壤中的存在部位向根面的移动过程;(2)根系向养分存在部位的伸展过程。养分从土壤到达根面的速率是决定作物对养分的吸收速率的重要因素之一。因此, 在研究土壤的供氮特点时, 除了应当注意土壤氮素的矿化过程以外, 也应研究有效态氮从土壤到达根面的供应过程。在本次试验中, 我们在田间布置了两个辅助试验, 以期了解两种不同供氮特点的土壤上, 后一过程的相对快慢。

1. 用 ^{32}P 测定两种土壤中水稻根系伸展的相对快慢。将高 22 厘米、边长 33 厘米的正方形无底塑料框埋入耕层中, 每框表施硫酸 5 克。5 月 20 日在框内一侧的中间部位栽水稻一穴(10 个茎蘖), 剪去根系。5 月 26 日落干后, 在离稻株 25 厘米处呈弧形垂直埋入一 ^{32}P 滤纸条(以稻株为圆心, 弧长 36 厘米), 埋深 6 厘米, 盖土后继续落干一天, 然后灌水。6 个重复。 ^{32}P 滤纸的制法是, 取每毫升含 P 61.8 毫克、放射强度为 227.3 微居里的 KH_2PO_4 溶液 0.8 毫升, 涂布于 2×36 厘米的长滤纸条上。因为 ^{32}P 的移动性很小, 我们可以根据水稻地上部分出现放射性的时间和累积的 ^{32}P 量, 来判断两种土壤中水稻根系伸展的相对快慢。这里忽略了两种土壤上根系吸收能力可能存在的差异。但是, 从图 4 来看, 在尿素表施时, 两种土壤上水稻对肥料氮的吸收都很快, 而且极其相近, 这似乎表明两种土壤中根系的吸收能力的差异并不大。

2. 用 ^{86}Rb 测定两种土壤中一价阳离子移动的相对快慢。为了检测方便, 我们没有用 $^{15}\text{NH}_4^+$, 而是用 ^{86}Rb 作为指示离子。其法是: 在田间埋入高 22 厘米、长 25 厘米、宽 15 厘米的无底塑料框 6 个, 做为 6 个重复。在框内一侧垂直埋入一外径 5.5 厘米、内径 3.8 厘米、长 15 厘米的砂滤管, 管内装入混有 2 克硫酸的土壤。5 月 21 日在管内栽水稻(6 个茎蘖)。5 月 26 日框内落干后, 在离砂滤管 8 厘米处, 垂直埋入涂有 ^{86}Rb 的滤纸片, 深 6 厘米。滤纸片的制法是: 吸取每毫升含 $\text{Rb}0.297$ 克、放射强度为 0.5 毫居里的 RbCl 溶液 0.4 毫升, 涂于用四层滤纸叠成的 2×3.5 厘米的纸片上。纸片埋入后盖土, 并继续落干一天。由于根系被限制在砂滤管内, 因此, 水稻地上部分出现放射性的时间和 ^{86}Rb 的累积量, 可以反映出 ^{86}Rb 在两种土壤中移动的相对快慢。与 ^{32}P 的试验相同, 也忽略了两种土壤中根系吸收能力可能具有的差异。

从表 12、13 来看, 鱗血土中水稻根系的伸展速率比僵板土中快得多, Rb 离子的移动

表 12 水稻对 ^{32}P 的吸收

测定日期	土 壤	地上部分 ^{32}P 量(微克)	t 测试
6 月 3 日(栽后 14 天, 剪取 2 个主茎进行测定)	鱗血黄泥土	0.0388 ± 0.0067	
	僵板黄泥土	0	
6 月 14 日(栽后 25 天, 全部稻株取出进行测定)	鱗血黄泥土	0.233 ± 0.030	$t = 8.10^{**}$ ($t_{0.01} = 3.17$)
	僵板黄泥土	0.0447 ± 0.0083	

* 表中数据系 $\bar{x} \pm S_x$ 。

表 13 水稻对 ^{86}Rb 的吸收

测定日期	土 壤	地上部分 ^{86}Rb 量(微克)	t 测试
6月18日(施 ^{86}Rb 后 23 天,稻株全部取出进行测定)	鱗血黄泥土	0.0615 \pm 0.0073	t = 2.14 ($t_{0.05} = 2.23$)
	僵板黄泥土	0.0410 \pm 0.0062	

表中数据系 $\bar{x} \pm S_x$ 。

速率似也略有差异(统计上接近于达到 5% 的显著水准)。造成这种差异的原因可能比较多。从两种土壤来看,结构性似是其中的一个重要因素。结构好的土壤,土块易于整细,淹水种稻后土块也易于化开,根系伸展和养分移动所经过的路径的弯曲程度比较小,因而有利于根系的伸展和养分的移动,从而也将有利于水稻对养分的吸收。而且,正因为结构好的土壤中水稻生长初期对养分的吸收比较快,因此,其地上部分的生长也较迅速,这反过来又会促进根系的伸展和对养分的吸收。至于其他因素(如 pH)可能产生的影响问题,尚待进一步研究。

下面我们将运用养分移动性概念,对本试验中的某些现象做一初步讨论。

1. 不施氮肥时,土壤来源的 $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ 是全层性的,根系附近的 $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ 被吸收利用后,存在于其他部位的 $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ 向根系的移动愈快,或者根系向其存在部位伸展得愈快,则水稻愈能保持较高的氮素吸收速率。鱗血土中水稻根系的伸展比僵板土中的快得多,因此,生长其上的水稻对 $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ 的吸收也就比僵板土上要快一些(图 1)。但是,随着水稻生长期的推移,根系伸展范围逐步扩大,两种土壤中,水稻对 $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ 的吸收就都比较充分了(如图 1 所示,到 6 月 28 日时,水稻吸收 ^{15}N 量占 ^{15}N 总供应量的比值都达到 80% 以上),土壤之间的差异也就逐渐消失。高桥等(1976)也曾指出,在水稻分蘖期间,根量是限制水稻吸收氮素的一个重要因素,而到幼穗分化以后,根量已达最大值,但此时 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量却很低,因此,此时水稻对氮素的吸收则主要受土壤有机氮的矿化所制约。

2. 水稻对肥料氮吸收的快慢受到施用方法的影响。从图 4 来看,表施时, $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ 可能因其与根系比较接近,因而水稻对其吸收很快,而且两种土壤之间在吸收快慢上也没有什么差异。氮肥与土混施者, $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ 的分布情况比表施时要分散一些,因此,在施用后的最初几天,水稻对其吸收也略慢一些,但因其为混施于表土 6 厘米的范围内,一俟根系有所伸展以后,水稻对其吸收利用仍是很快的。另一方面,在粒肥深施的情况下,肥料集中分布于离根系一定距离处的较小范围内,水稻对其吸收利用需要有一个根与养分互相接近的过程,因此,水稻对粒肥的吸收高峰比表施或混施的要迟得多。而且,由于僵板土中根系伸展比较慢,因此,在僵板土中,水稻对粒肥氮的吸收也就更加缓慢。

3. 尿素表施或与 6 厘米表土混施时,肥料来源的铵态氮比土壤来源的铵态氮更易被水稻迅速吸收(图 3)。这似乎也可以从它们在土壤中分布情况的不同得到解释。即在表施时,肥料氮相对地集中分布于表层根系易于迅速到达的部位;混施于表层 6 厘米时,肥料氮也是分布于根系伸展初期所能占据的浅层土壤中。而且,无论是表施或混施,肥料氮主要地应是存在于土块的表面及与之相接触的液相中。因而比较容易被根系所吸收利用。与此不同,土壤 $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ 则是全层性分布的,而且土块内部的 $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ 需要移动到土块表面,才能提供给水稻吸收利用。因此,水稻对 $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ 的吸收利用就比较慢。由

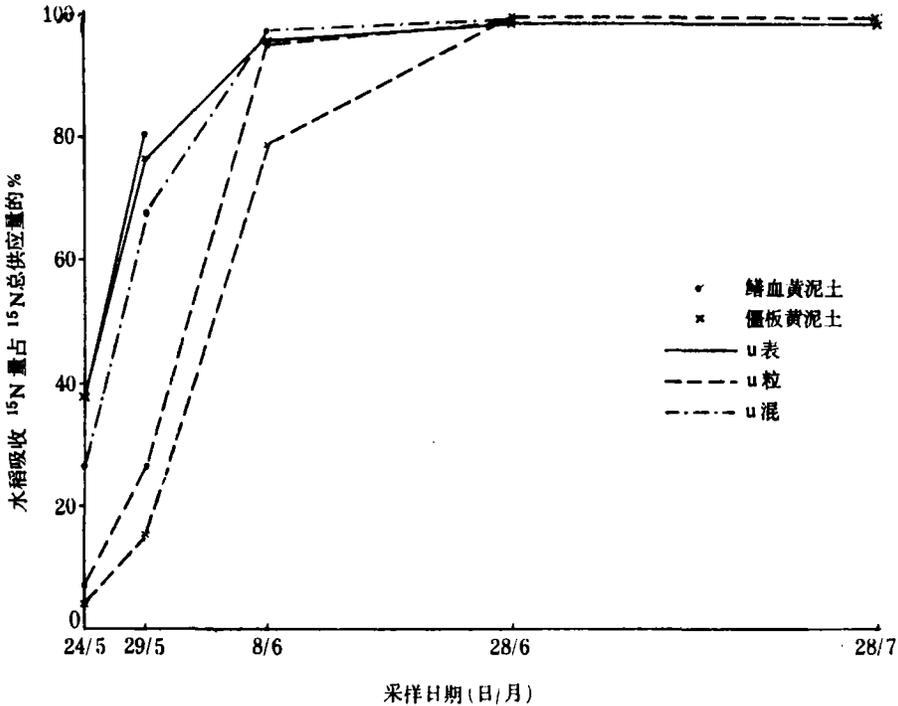


图 4 不同施肥方法下水稻对肥料氮的吸收量占土壤中肥料来源的氮素总供应量的比例

此看来, 表施或混施氮肥对提高水稻早期吸氮速率的作用就远大于由土壤有机氮矿化所释出的 $^{14}\text{NH}_4\text{-N}$, 即氮肥对于土壤氮素供应强度的贡献远大于土壤来源的铵态氮。不仅如此, 从图 3 还可以看到, 氮肥表施或混施时, 还明显地提高了水稻早期吸收 ^{15}N 量占 ^{15}N 总供应量的比值, 即氮肥不仅具有影响土壤氮素矿化的激发作用, 而且还能促使早期水稻更多地吸收利用土壤来源的铵。其原因可能有两个。其一是氮肥促进了水稻地上部分的生长, 因而促进了根系的伸展。另一方面, 激发作用所产生的 $^{14}\text{NH}_4\text{-N}$ 应与 $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ 的分布部位相同, 易于被水稻迅速吸收利用。正是由于(1)肥料来源的铵态氮比土壤来源的铵态氮能更快地被水稻吸收; (2)氮肥对土壤氮素的矿化具有激发作用; 和(3)氮肥能促使水稻更快地吸收土壤来源的铵态氮等原因, 因此, 氮肥在提高早期水稻吸氮速率中的作用就远远超过其提高氮素总供应量的作用。从表 4 和表 5 的结果可以明显地看到这一点。例如, 以鱧血土为例, 在 5 月 24 日和 29 日时, 尿素表施区的氮素总供应量 (^{14}N 和 ^{15}N 总供应量之和) 仅为对照区的 2.7 和 2.4 倍, 但水稻吸氮总量 ($^{14}\text{N} + ^{15}\text{N}$) 却为对照区的 18.0 和 6.1 倍。生产实践中常常碰到这样的情况, 施用的氮肥按其提供的氮量计算并不多, 但它对水稻生长的影响却很明显, 其部分原因即在于此。

从以上的结果来看, 粉肥表施或混施时, 虽然可以显著地提高水稻的早期吸氮速率, 但其利用率较低, 损失较多, 尤以碳铵和尿素表施时表现得更为明显。粒肥深施的利用率虽然很高, 损失也很少, 但是其供氮特点明显偏迟。因此, 如何改进粒肥的施用技术, 使之既能达到较高的利用率, 又能较快地供给水稻吸收, 是一个值得研究的问题。例如, 对双季稻来说, 为了促使水稻早发, 以争取更多的有效分蘖和良好的营养生长, 是否可以将粒

肥深施于近根处,而不是像通常那样深施于行间。至于生长期较长的单季稻,早发的要求不像双季稻那样高,粒肥深施的供氮特点与水稻需求之间的矛盾可能比较小。

三、结论和摘要

1. 稻田土壤氮素供应过程的特点是土壤氮素的矿化过程和水稻对矿化形成的铵态氮的吸收过程的综合反映。结构性好的土壤,在早稻生长期,氮素的矿化速率始终明显高于结构性差的土壤,尽管两种土壤的全氮含量比较接近。而且,良好的结构性还有利于分蘖期间水稻根系的迅速伸展,因而可以促进水稻生长早期对土壤氮素的吸收。正是由于这两个方面的原因,结构性好的土壤上,在分蘖期间水稻吸收的氮量明显高于结构性差的土壤,从而有利于早发。进入旺盛生长期以后,两种土壤上水稻对土壤氮的吸收都很快,其吸收量则主要决定于土壤氮素的矿化速率。

2. 不同氮肥以及同一种氮肥在不同施用方法下的氮素平衡情况差异很大。齐穗期的测定结果表明,在中性水稻土上,硫酸铵、尿素和碳铵做基肥表施时,利用率分别为 50.1%、27.5% 和 24.0%,氮素损失分别为 28.5%、53.9% 和 57.4%,尿素与碳铵的情况十分相近而显著劣于硫酸铵。尿素混施于 6 厘米表土中或层状施于 6 厘米深处,其利用率可提高到 37—38%,损失相应地降为 40—43.5%。尿素做穗肥表施的利用率虽达 64.7%,但土壤中残留量显著减少,损失仍达 30%。尿素造粒做基肥施于行间 6 厘米深处(距稻株的水平距离约 10 厘米),利用率高达 74.5%,损失只有 13.1%。无论是尿素表施或造粒深施,两种土壤之间在氮肥利用率上都没有明显的不同。

3. 氮肥表施后,肥料氮的损失和固定都很快,至施肥后第 11 天两种作用都已达到或接近于最大值,此时损失量约占施入量的 37—47%,被固定的氮量约占施入量的 29—45%。后者约有 14—22% 可在当季水稻生长过程中重新释放出来供吸收利用。

4. 在分蘖期间,水稻对表施或混施的肥料氮的吸收速率远大于对土壤氮的吸收速率,表明氮肥在提高这一时期的氮素供应强度、促进水稻早发中具有显著的作用。此外,水稻对施于不同部位的肥料氮的吸收速率也有显著的不同。例如,水稻对表施或混施的肥料氮的吸收很快,主要的吸收时间是在施肥后的 20 天之内,但对粒肥氮的吸收则慢得多,吸收高峰显著推迟。这些差别看来可能是由于不同来源的铵态氮、以及不同施用方法下肥料来源铵态氮在耕层中的分布情况的不同所致。此外,在尿素表施时,水稻对肥料氮的吸收速率并没有因土壤不同而有明显的差别,但在尿素粒肥深施时,在结构性差的土壤中,供氮迟缓的特点却更为突出。这显然可以从两种土壤中水稻根系的伸展速率和尿素粒肥的水解速率的不同得到解释。

5. 因此,良好的结构性有利于增加水稻生长初期的吸氮量,促进水稻早发。氮肥在促进水稻分蘖初期的氮素吸收和生长方面具有显著的作用,但其施用部位必须靠近根系。这一点在结构性差的土壤中尤为重要。而且,结构性差的土壤,由于氮素矿化速率比较慢,所以要促进水稻早发,可能需要增加氮肥的用量,以补土壤氮素矿化和供应较慢之不足。

参 考 文 献

- 中国科学院南京土壤研究所主编, 1978: 中国土壤。364—365, 370—372, 科学出版社。
- 中国科学院南京土壤研究所所长效肥组, 1974: 碳酸氢铵粒肥的肥效和机械造粒。土壤, 第3期, 91—96。
- 朱兆良、汪祖强、徐银华, 1963: 土壤氮素供应状况的研究 II. 硫酸铵在植稻土壤中的转化及其对土壤氮素供应状况的影响。土壤学报, 11: 185—195。
- 朱兆良、蔡贵信、俞金洲, 1977: 稻田中¹⁵N标记硫酸铵的氮素平衡的初步研究。科学通报, 22: 503。
- 吉野 箭、出井嘉光, 1978: 水田土壤における施肥窒素の行方および窒素肥料の土壤窒素無機化に及ぼす影響。日本農事研, 28: 91—113。
- 吴金桂、姜德仁, 1978: 提高尿素化肥利用率的研究。土壤肥料, 第5期, 20—24。
- 邢光熹、曹亚澄, 1978: ¹⁵N质谱分析某些技术的改进。土壤, 第6期, 224—229。
- 陈华癸、周启, 1961: 农业措施对水稻田土壤中微生物生命活动的影响及其丰产意义 I. 烤田对土壤微生物区系变化的影响。土壤学报, 9: 133—139。
- 陈家坊等, 1975: 苏州平田地区水稻土发僵问题的探讨。土壤, 第6期, 286—291。
- 陈荣业等, 1978: 几种¹⁵N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。
- 陈荣业、范钦植, 1978: 碳酸粒肥在非石灰性水稻土上深施的氮素供应状况。土壤学报, 15: 75—82。
- 奚振邦等, 1978: 双季稻的吸肥高峰与挥发性氮肥全层施用法的研究。土壤学报, 15: 113—125。
- 高桥重郎等, 1976: 水田における窒素の動態と水稻による窒素吸収について, 第6报。温度が水稻の窒素吸収および土壤中のアンモニア態窒素の消長におよぼす影響。日作紀, 45: 213—219。
- 関矢信一郎、志賀一, 1975: 北海道における水田土壤中の窒素の動態と水稻の窒素吸収パターンについて。日土肥, 46: 280—285。
- Barber, S. A., 1962: A diffusion and mass-flow concept of soil nutrient availability. *Soil Sci.*, 93: 39—49.
- Bray, R. H., 1954: A nutrient mobility concept of soil-plant relationship. *Soil Sci.*, 78: 9—22.
- Broadbent, F. E. and Tusneem, M. E., 1971: Losses of nitrogen from some flooded soils in tracer experiments. *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.*, 35: 922—926.
- Broeshart, H., 1971: The Fate of Nitrogen Fertilizer in Flooded Rice Soils, in *Nitrogen-15 in Soil-Plant Studies*. 47—54, IAEA, Vienna, Austria.
- Reddy, K. R., Patrick, W. H. and Phillips, R. E., 1976: Ammonium diffusion as a factor in nitrogen loss from flooded soils. *J. Soil Sci. Soc. Amer.*, 40: 528—533.

THE EFFECT OF FORMS AND METHODS OF PLACEMENT OF NITROGEN FERTILIZER ON THE CHARACTERISTICS OF THE NITROGEN SUPPLY IN PADDY SOILS

Zhu Zhao-liang, Chen Rong-ye, Xu Yong-fu,
Xu Yin-hua and Zhang Shao-lin
(*Nanjing Institute of Soil Science, Academia Sinica*)

Summary

The present article deals with the patterns of soil N supply, the uptake of soil and fertilizer N by rice plant and the fate of fertilizer N in relation to the forms and methods of placement of N fertilizer in the paddy soils of Suchow District, Jiangsu Province. Field experiment was carried out with ¹⁵N-tracer technique. The soils used for the experiment are developed from the alluvial-lacustrine deposits with a texture of clay loam. The results obtained are summarized as follows:

1. The characteristic of N supply of a paddy soil depends on both the mineralization of soil N and the uptake of the mineralized soil N by rice plant. The mineralization rate in well-structured soil was much higher than that in poor-structured soil during the growing period of early rice, though the difference between their total N contents was insignificant. In addition, it was shown by auxiliary experiment of ³²P that the rice roots extended much faster in the well-structured soil than in the poor-structured soil. Therefore, the total uptake of soil N by rice plant as well as the growth rate of rice plant grown in the well-structured soil during tillering stage were much greater than that in the poor-structured soil. However, in the reproductive stage, the uptake of soil N by rice plant grown on both soils was so effective that the mineralization rate of soil N might become a factor limiting the uptake of soil N by the rice plant.

2. The fate of fertilizer N was affected significantly by the forms and methods of placement of the N-fertilizers. The results obtained in full-heading stage revealed that when ammonium sulfate, urea and ammonium bicarbonate were broadcasted on the surface of a neutral soil before transplantation, the N recovery by rice plant amounted to 50.1, 27.5 and 24.0% and the N loss amounted to 28.5, 53.9 and 57.4% respectively. Both the placement of urea at a depth of 6 cm and the application mixed with the top soil of 6 cm in depth increased the N recovery to 37—38%, whereas the N loss was decreased to 40—43.5%. A much higher percentage of plant-recovery (64.7%) was obtained when urea was top-dressed in the reproductive stage, but the amount remained in soil was much less, and the amount of loss was no less than 30%. The amount of plant recovery obtained by the application of prilled urea at a depth of 6 cm was as high as 74.5%, while that of loss was only 13.1%. No obvious difference in N recoveries by plants was found between the well-structured and poor-structured soils, whether urea was broadcasted on soil surface or prilled and deeply applied.

3. Loss and immobilization of fertilizer N occurred quickly after its surface application. Eleven days after dressing, both processes attained or approximated to the maximum. At that time, about 37—47% of applied N was lost and 29—45% was immobilized. 14—22% of the immobilized N was remineralized during the growing period of early rice.

4. At the tillering stage of rice plant, the absorption rate of fertilizer N either applied on soil surface or mixed with top soil as basal dressing was much higher than that of soil N. This shows that fertilizer N contributed more to N supplying intensity and the promotion of plant growth than soil N in the early growing stage of rice plant. In addition, the absorption rates varied considerably with methods of application. For example, most part of fertilizer N applied on the soil surface or mixed with the top soil before transplanting was absorbed by rice plant within the first 20 days after dressing, whereas the peak of N uptake of prilled urea by rice plant was delayed to the period of 11—21 days (well-structured soil) or 11—41 days (poor-structured soil) after dressing. The differences mentioned above may perhaps be due to the differences in distribution patterns between soil-derived $\text{NH}_4\text{-N}$ and fertilizer $\text{NH}_4\text{-N}$, and that among various methods of application. Moreover, there was no difference between the rates of fertilizer N absorbed by rice plant grown in the well-structured and the poor-structured soils when urea was surface applied, whereas the apparent delay was found

in the absorption of fertilizer N from prilled urea deeply applied in the poor-structured soil. This may be interpreted by the much higher rates of root growth and hydrolysis of prilled urea in the well-structured soil.

5. It is concluded that good soil structure is favorable to the uptake of N by rice plant and hence its growth in the early growing stage, which may benefit the high yield of early rice. In order to promote the uptake of N and the growth of rice plant in its early stage, N fertilizer should be placed near the root system of rice seedlings at the time of transplanting, and this is of most importance for the poor-structured soil.