

深施氮肥 (^{15}N 标记尿素) 对稻田水层化学性质的影响及水稻对深施氮肥的回收率*

曹志洪

S. K. 迪达塔

(中国科学院南京土壤研究所)

(国际水稻研究所)

碳铵粒肥深施是提高氮素回收率, 增加水稻等多种作物产量的合理施肥方法之一^[1-4, 11]。

国际稻田肥力和肥料评价纲 (INSFFER) 在南亚、东南亚等十余个稻产国家的试验表明尿素粒肥深施是增产增收的经济施肥法^[12]。

施肥后稻田水层的化学性质在很大程度上决定了水稻—水层—水稻土这个生态体系的氮素循环及氮素损失的大小^[6, 16, 17]。

本文就深施氮素 (^{15}N 标记尿素) 对稻田水层化学性质的影响, 及水稻对深施氮素的回收率和肥料增产效率进行了讨论, 并就深施氮肥 (尿素粒肥深施) 的高效率是否是由于深施本身还是由于集中施肥所致的问题提出了数据和结论。

一、试验材料与方法

干、湿两季田间试验是1981年在国际水稻所实验农场完成的。供试土壤为马哈赫斯粘土 (Maahas clay)。其理化性质为: pH 6.5, 有机质(全碳) 1.6%, 全氮 0.19%, 代换量 29 毫克当量/100 克土, 有效锌 0.9 ppm; 质地为粉砂粘壤土(国际制)。供试水稻品种为 IR₃ (*Oryza sativa*, L.)。干季试验是2月5日栽秧, 4月28日收获。而湿季的试验是6月9日栽秧, 9月3日收获。

试验处理共五个: (1) 普通尿素均匀层状深施于10厘米土层深处(下称: “层深施”)。栽秧前, 田面无流动水, 呈泥浆状, 均匀地移出10厘米表土, 贮于若干个大的铁桶中, 把尿素肥料均匀撒施于已移出表土的田面, 然后立即把10厘米表土均匀地复回。(2) 普通尿素条状深施于10厘米深处(下称: “条施”)。插秧后当天, 在每两行水稻中间开一条深约10厘米的施肥沟, 将尿素均匀地施入沟内, 立即覆土。(3) 尿素粒肥深施于10厘米深处(下称: “粒肥深肥”)。插秧后当天, 在每四穴稻株中心塞施粒肥一穴至10厘米深处, 即用泥土把洞封死。(4) 分次施肥, 2/3 做基肥混施, 另外 1/3 做穗肥追施。(5) 不施氮肥的对照。

施肥量以每公顷所需的某营养成分的公斤数来计算, 干、湿两季的 N、P、Zn 分别为: 87, 20, 20 和 54, 9, 10 公斤/公顷。氮肥是普通尿素或重约1克的尿素粒肥(含 N 46%); 磷肥是普通过磷酸钙(含 P 8%); Zn 肥是硫酸锌(含 Zn 23%)。在微区中应用的氮肥是 ^{15}N 标记的尿素, 或尿素粒肥, ^{15}N

* 本文系曹志洪在国际水稻研究所、菲律宾大学进修时完成的硕士论文之一部分。土壤学家, S. K. 迪达塔博士是国际水稻研究所农艺系主任, 本研究工作是在他的指导下完成的。

丰度都为约 5% 原子百分超。

田间试验的设计采用完全随机区组 (CRB)。小区面积为 15.4 平方米。干季为重复三次,湿季重复四次。同位素试验用的微区设置在相应的小区内,由无底铁框构成,面积为 1.44 平方米,铁框埋深 15 厘米,在田面留高也是 15 厘米。

稻田水层水样的采集是在施氮后每天下午 1 时半进行的。多点混合,每小区约取 100 毫升供尿素态氮及铵态氮的分析。植株样品是在微区内和对照区内分别在移栽后 10 天、30 天、幼穗分化期和收获期四次采取的。每次随机选取四穴^[9]。前三次采样后应移栽同龄的稻株四穴,以免影响下次采样。秧苗的植株样品是在插秧后在余秧中随机选择约 40 株秧苗为样品。所有植株样品均供全氮和 ¹⁵N 质谱分析。试验前的土壤样品是在翻耕平整后,同时完成了划区准备工作,在施用磷、锌肥之前采取的。每个区组一个土壤混合样,分为 0—15, 15—30, 30—50 厘米三层。

全氮及 ¹⁵N 质谱分析采用 R. J. Bursh 等的方法^[9], ¹⁵N 质谱分析是在国际水稻所土壤化学系分析中心的 MM 622 型微型质谱仪上完成的。尿素氮和铵态氮的分析分别采用 Keeney 和 Brenner^[13] 以及 Douglas 和 Brenner^[14] 的方法。

二、结果和讨论

(一) 施肥后稻田水层化学性质之动态变化及水生生物之消长

稻田水层是水稻—水层—水稻土这个特殊的小生态体系中的纽带,因此水层的化学性质、生物学特性均给体系内能量的、营养元素的、生物与非生物的循环以重要的影响。施氮后稻田水层化学性质的动态变化及水生生物之消长对于监测氮肥之去向,评价施肥方法之优劣,甚至对环境保护的研究都有重要的意义^[6,16,17]。

1. 稻田水层含氮量的动态变化 一般情况下稻田水层只含有极低的氮量^[6],但就其氮素形态来说则有有机氮,如可溶性蛋白质、氨基酸;无机氮,如 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$; 还有溶解的气态氮。水层中氮素的来源可来自大气、降水、灌水,以及与土壤溶液之间的相互渗透、扩散和交换。可是在短期内使稻田水层含氮量发生显著变化的主要给源当推施用氮肥所带来的氮。

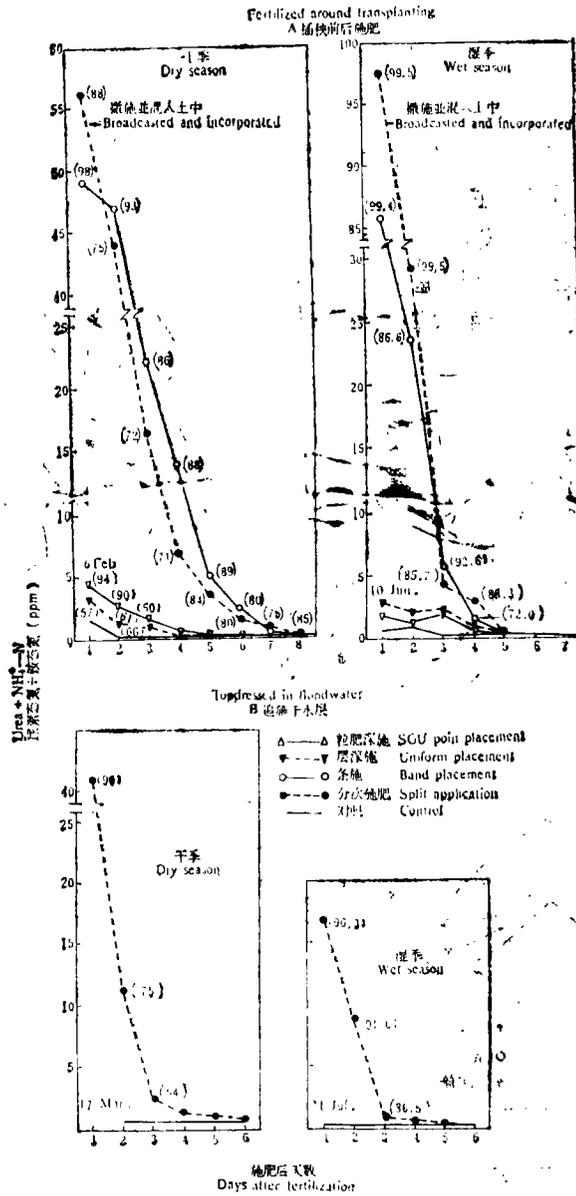
干、湿两季施氮肥后 9 天内稻田水层含氮量(尿素氮+铵态氮)的动态变化见图 1。

分次施肥和条施二个处理的水层中两季都测得了最高、很高的含氮量。但分别在 5—6 天(干季)和 3—4 天(湿季)内迅速递降至 5 ppm 以下。另一方面,粒肥深施和层深施二个处理的水层中始终只测得接近无氮对照水层中的极低含氮量 (<5 ppm)。

从尿素态氮的百分比逐渐下降,铵态氮的比例逐渐上升的趋势,表明尿酶作用下尿素的水解是迅速进行的。

上述结果表明粒肥深施和层深施都是成功地将氮肥完全深施于土壤深层了,而分次施肥中的混施及条施则只是部分地实现了深施。这是因为把肥料撒施于田面用犁耙翻入土内的办法只是将少部分混入土层深处,大部分仍留在表土层和水层中。而条施的,开沟后田面水(即使很少)迅速汇集沟内,把施入的尿素溶解;覆土时,高浓度的尿素溶液向外溢出,因此大多数尿素仍滞留于水层中。

大家知道,氨是易溶于水的。在溶解有氨气的溶液中 $[\text{H}]^+$ 质子迅速地在非离子化的 (NH_3) 和 $[\text{OH}]^-$ 基因之间来回振动,要区分 $(\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O})$ 与 (NH_4OH) 是很困



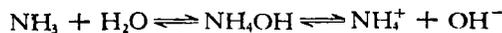
注：图中括弧内的数字表明尿素态氮占全氮的百分比

The figure in parentheses shows the percentage of urea-N in total N (urea + NH₄⁺-N).

图 1 施肥后(每天中午 1:30)稻田水层全氮量(尿素态氮+铵态氮)的变化(1981 年)。

Fig. 1 Total nitrogen in the water of paddy fields (at 13:30) as affected by application methods of urea, 1981.

难的。因此含氨溶液的基本特征常常用下式表示^[16]：



其反应常数为 $K = 1.8 \times 10^{-5}$ 。显然，这个平衡体系是受 pH 控制的。在低 pH 条件下主要以 NH₄⁺ 离子为主；在高 pH 条件下，则以非离子化的 (NH₃) 为主。当水层中氨的分

压高于大气中的氨分压时 NH₃ 便逸出水面而挥发损失。

插秧后十天内当然没有庞大的水稻根系形成, 水层内高浓度的氮在几天内迅速下降至与无氮对照相似的水平, 从一个方面说明氮的损失(估计以氨挥发为主)之大。

诚然氨的挥发损失不是稻田水层中氮肥损失的唯一途径, 例如硝化-反硝化, 流¹及生物固定等也都是存在的。从实际上证明在什么条件下以氨的挥发损失为主, 什么情况下以硝化-反硝化损失为主应该进一步地研究的。但毫无疑问的是当在水层中有高浓度的(NH₃) 存在时, 氨的挥发损失是决不能轻视的。

图 1 中的“B” 是表示穗肥追施以后稻田水层中含氮量的变化。由于此时水稻根系已充分发育形成, 能吸收大量的 N 素营养; 另一方面所施的肥料量也较少(只有 1/3 剂量), 因此水层含氮量迅速下降到无氮对照的水平。再由于此时水稻已经封行, 接近于一个密闭的生态系, 因此氨的挥发、溶解、吸收的循环过程可在体系内完成, 逃逸至体系外的氨是极微的^[13,16]。

2. 稻田水层 pH 图 2 是干、湿两季施肥后 9 天内稻田水层 pH 变化的记录。分次施肥和条施的水层 pH 都比较高, 最高记录为 pH 9.5 左右。粒肥深施和层深施的水层 pH 则始终较低, 与无氮对照的水层 pH 接近。

水层的高 pH 值与水层中的含氮量(特别是铵态氮)呈现密切相关性。反过来, 稻田水层的高 pH 则促进了 NH₃ 的挥发损失。以前的研究^[16]表明稻田水层 pH 因水生生物光合作用而呈昼夜规律性变化。本试验中水层 pH 是在中午 1:30—2:30 在田间就地测定的, 因此所测得各处理间之 pH 差显然

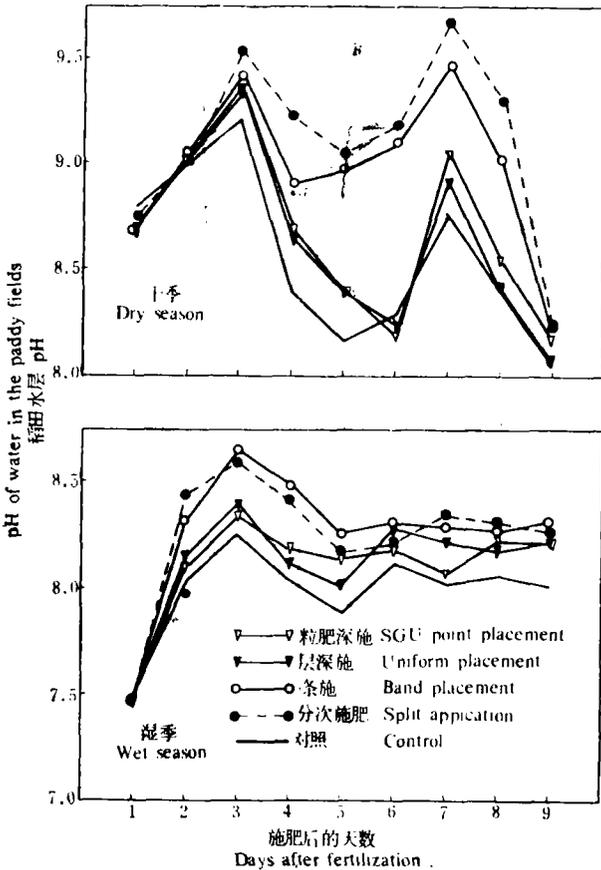


图 2 施肥后(每天中午 1:30)稻田水层 pH 的变化 (1981 年)。

Fig. 2 The pH of the water in paddy fields (at 13:30) as affected by application methods of urea, 1981

是在最明显时的数据。

稻田水层 pH 的变化幅度是干季大于湿季。pH 值的平均值也是干季大于湿季(图 2)。这可能与干季的施氮量高、水层相对较浅、太阳光充足、水生生物(主要是绿藻)的光合作用强等因素有关。反之, 在湿季不仅施肥量低, 太阳光辐射能弱, 田面水层常常因大

雨而充满,水生藻类活动量弱等导致 pH 值低且变化幅度不大。

3. 稻田水层藻类之消长 水层中水生藻类的种类,繁殖生长的速度与水层深浅、阳光、水温有关,但主要是与氮素营养条件有关。处于本试验的同一田块内的各小区,除了营养条件不同外,其余条件应大致一样的。所以水生藻类的繁殖程度反过来可资判断水层中含氮量的多少。

在干季的试验中,施肥后三天,就可用眼睛来区别水藻生长之优劣。5 天时,分次施肥和条施的各小区全部铺满绿色,气泡很多,水藻生长极为旺盛;粒肥深施,层深施和无氮对照的各小区中则几乎观察不到有水藻的生长。由于水藻的光合作用消耗了水中的 CO₂,降低了水中游离 CO₂ 的浓度,同时碳酸的克分子份数也就按比例下降,导致较高的稻田水层 pH 值,并呈昼夜规律性变化。Roger 等^[17] (1980) 认为粒肥深施还有一个好处是由于水层含氮量极低,抑制了无固氮能力的藻类的生长,有利于有固氮能力的兰绿藻的生长,使稻田有较多的大气氮的补给。

(二) 水稻对深施氮肥的回收率和肥料增产效率

1. 回收率 同位素试验的结果(表 1) 表明,干、湿两季水稻(收获期)对深施氮素的

表 1 深施方法对水稻收获期的氮(¹⁵N 标记的尿素)回收率的影响(1981 年)

Table 1 Recovery of applied N (¹⁵N labelled urea) by the rice plant at harvest as affected by application methods of urea, 1981.

施肥方法 Application method	回收率(%) Recovery of applied ¹⁵ N					
	干季 Dry season			湿季 Wet season		
	稻草 Straw	稻谷 Grain	合计 Total	稻草 Straw	稻谷 Grain	合计 Total
层深施 Placed uniformly	20a	68a	88a	19ab	31b	50b
条施 Placed in band at 10cm depth	13c	48c	61c	9c	18d	27c
粒肥深施 Placed in point with SGU	19ab	54b	73b	23a	42a	65a
分次施肥 Split application 2/3 basal + 1/3DBPI	9d	24d	33d	9c	23c	32c

注: 1. 在每一列中, 平均数伴随着相同的字母表明没有显著的差异(新复全距检验法, 5% 水准)。

In a column, figures followed by a same letter indicate no significant difference at the 5% level by DMRT

2. SGU 尿素粒肥。 supergranule urea.

3. DBPI = 幼穗分化前的天数。 days before panicle initiation.

回收率因深施方法而有很大的差异。层深施和粒肥深施的回收率高。条施和分次施肥的低,在一般情况下(干季)层深施的略高于粒肥深施的,这是由于层深施的早期供氮情况优越,有利于水稻的早期发育,分蘖早分蘖多,最后导致高的回收率。粒肥深施的氮素供应特征是缓、稳、长^[5],水稻前期的发育并不理想,但由于在中、后期能急起直追,氮素源源供应——后劲足而始能与层深施的回收率相接近。本试验报告的回收率,粒肥深施的与二个温带的报告相吻合^[5,10]。分次施肥的与奚振邦等^[7] (1978) 报告的全耕层深施法的结果

表 2 水稻 (IR₈) 对深施尿素的产量效应及氮肥增产效率 (1981 年)
Table 2 Grain yield response and nitrogen use efficiency of IR₈ to application methods of urea. 1981.

深施方法 Application method	干季 Dry season		湿季 Wet season	
	稻谷产量 (t/ha) Grain yield	增产效率 (kg rough rice /kgN) Efficiency	稻谷产量 (t/ha) Grain yield	增产效率 (kg rough rice /kg N) Efficiency
无氮对照 No fertilizer nitrogen	1.9c		2.3c	
层深施 Placed uniformly	6.4a	52	3.5b	23
条施 Placed in band at 10cm depth	5.0b	35	3.5b	23
粒肥深施 Placed in point with SGU	6.4a	51	4.4a	40
分次施肥 Split application 2/3basal + 1/3 DBPI	4.5b	29	3.2b	17

- 注: 1. 在每一列中, 平均数伴随着相同的字母表明没有显著的差异(新复极距检验法 5% 水准)。
In a column, figures followed by a same letter indicate no significant difference at the (5%) level by DMRT.
2. SGU = 尿素粒肥。 supergranule urea.
3. DBPI = 幼穗分化前的天数。 days before panicle initiation.

相近。说明施肥方法对于回收率具有重要的影响。水稻对氮素的吸收当然要受环境、水稻品种诸因子的制约, 但土壤中有否可供吸收的肥料氮则是根本的问题。大致说来相同的施肥方法有大致一样的氮损失量, 因而也就决定了可供吸收的肥料氮的多寡。

2. 肥料增产效率 水稻所吸收的氮并不都用于稻谷生产。所以回收率高并不等于产量高, 也就不等于施肥的经济效益高。水稻的氮肥增产效率可定义为每单位(公斤)施加的氮所能增加的稻谷产量(公斤)。其计算公式为:

$$\text{增产效率(公斤稻谷/公斤氮)} = \frac{\text{施氮肥的稻谷产量} - \text{不施氮对照的产量(公斤)}}{\text{施氮量(公斤)}}$$

干、湿两季水稻的各种深施氮的增产效率见表 2。数据表明, 粒肥深施和层深施的增产效率最高, 约为分次施肥的增产效率的二倍, 充分显示了粒肥深施的保氮增产的潜力。

表 2 数据还指出, 氮肥增产效率是干季高于湿季, 与施肥方法无关。这是由于在热带季风气候下, 干季阳光充足, 湿季则多云雨天为主的缘故, 氮肥效应是与水稻生殖生长期和成熟期所受的光照强度成正相关的。因此水稻的氮肥效应是干季大于湿季。在施肥建议中以干季多施氮肥, 湿季低些为宜。

(三) 水稻对深施氮肥的产量效应

按 14% 含水量计的稻谷产量列于表 2。结果指出: 在干季, 粒肥深施和层深施的产量同列为最高, 是分次施肥的产量的 142%。在湿季, 粒肥深施的产量为最高, 是分次施肥产量的 137%。湿季的层深施的产量偏低是由于 8 月 3—5 日的台风干扰, 当时该处理的水稻正值盛花期, 而粒肥深施的水稻因为其前期氮素供应不足, 中后期旺盛生长, 使生育期相应地推迟 2—3 天, 因而避免了台风的危害。

至于条施和分次施肥的 2 个处理的稻谷产量干、湿两季都显著地低于上述的二个处理, 这与其氮肥的大量损失, 使水稻中后期生育呈现缺氮症状有关。

结 论

试验结果指出: 干、湿两季粒肥深施的水稻产量最高 (6.4, 4.4 吨/公顷); 肥料增产效率也高 (51, 40 公斤稻谷/公斤氮)。几乎是分次施肥的肥料增产效率的二倍。

施肥后测定的稻田水层的化学性质结果表明, 粒肥深施的水层全氮量极低 (<5 ppm)、pH 值低、且无可见的水藻生长等, 都与无氮对照的水平接近。反之, 分次施肥的和条施的则水层全氮量高 (达 60 和 90 ppm), pH 值高 (>9.0), 水藻活动极为繁茂。说明粒肥深施是做到了氮肥的完全深施, 使 NH₃ 的挥发损失及氮的反硝化损失的量降到极低。而分次施肥, 条施都只有部分深施, 滞留于水层中的肥料氮 3—5 天内迅速地降低至无氮对照水平, 说明 NH₃ 的挥发损失和氮的反硝化损失仍然是很大的。

¹⁵N 的资料揭示出水稻对粒肥深施的氮素回收率高达 73% (干季) 和 65% (湿季), 而分次施肥的则分别为 33% (干季) 和 32% (湿季)。充分显示了粒肥深施在提高氮肥回收率上的潜力。

可是, 粒肥深施与层深施二个处理具有极其接近的各项测定结果。而且从前期的作物长相、分蘖动态及生育期进程来看, 层深施的还优于粒肥深施的, 显然是因为粒肥深施的“集中施肥”造成前期的供氮不足所引起的。但粒肥深施处理的后期供氮充足, 维持时间长而得到了补偿。应该指出, 这里所提的前期供氮不足问题, 只是因为本实验的特定条件: 栽插较稀 (20 × 20 厘米) 和粒肥施得深 (10 厘米) 所造成的。所以, 水稻对粒肥深施氮素的高回收率及肥料的高增产效率不是由于“集中施肥”所导致的, 而只是“深施”本身所带来的好处。

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] 中国农业科学院山东土壤肥料研究所, 1977: 碳酸粒肥、复合粒肥的施用效果。土壤肥料, 第 4 期, 21—26 页。
- [3] 曹志洪、孙秀廷、蒋佩弦、李阿荣、李庆选, 1980: 长效碳酸氢铵的研究。土壤学报, 第 17 卷 2 期, 132—144 页。
- [4] 朱兆良、陈荣业、徐永福、徐银华、张绍林, 1979: 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。土壤学报, 第 16 卷 3 期, 218—234 页。
- [5] 陈荣业、范钦楨, 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, 第 15 卷 1 期, 75—82 页。

- [6] 利卓桑、陈德富、祖守先、沈冬莲、俞林火, 1980: 稻田养殖水生绿肥对水层中氮素循环的影响。土壤学报, 第17卷3期, 247—254页。
- [7] 奚振邦、卞以洁、邝安琪、刘德本、刘明英, 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, 第15卷2期, 113—125页。
- [8] Bursh, R. J., E. R. Austin and E. T. Craswell 1982: Analytical methods in ^{15}N research. *Fert. Res.*, 3(1): 37—62.
- [9] Cao Zhi-hong, 1982: Effects of placement methods on recovery of applied N (^{15}N labelled urea) in lowland rice. Thesis: Master of science, 1982, March. University of the Philippines at Los Banos.
- [10] Cao Zhi-hong, S. K. DeDatta, and I. R. P. Fillery, 1982: Effects of placement methods on recovery of applied N (^{15}N labelled urea) in lowland rice. Paper presented at 13th Annual Scientific Meeting of the Crop Science Soc. of the Philippines. Apr. 28—30, 1982. Ecotech, Center, Cebu city.
- [11] C. K. Li, and R. Y. Chen, 1980: Ammonium bicarbonate as a nitrogen fertilizer in China. *Fert. Res.* 1(3): 125—136.
- [12] DeDatta, S. K. and E. T. Craswell, 1980: Nitrogen fertilizer and fertilizer management in wetland rice soils. Paper presented at the special Int. Symposium. 21—25, Apr. 1980 on rice research strategies for the future, celebrating the 20th anniversary of the Int. Rice Res. Inst., Los Banos, Philippines.
- [13] Demead, O. T., J. R. Frency and J. R. Simpson, 1976: A closed ammonia cycle within a plant canopy. *Soil Biol. Biochem.* 8: 161—164.
- [14] Douglas, L. A. and J. M. Bremner, 1970: Extraction and colorimetric determination of urea in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 34: 859—863.
- [15] Keeney, L. A. and J. M. Bremner, 1967: Determination and isotopé-ratio analysis of different forms of nitrogen in soils. 7: urea. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 31: 317—321.
- [16] Mikkelesen, D. S. and S. K. DeDatta, 1979: Ammonia volatilization from wetland rice soils. In *Int. Rice Res. Inst. Nitrogen and Rice*. Los Banos, Philippines.
- [17] Roger, P. A., S. A. Kulasooriya, A. O. Tirol and E. T. Craswell, 1980: Deep placement: a method of nitrogen fertilizer application compatible with algal nitrogen fixation in wetland rice soils. *Plant Soil*, 57(1): 137—142.
- [18] Vlek, P. D. G. and E. T. Craswell, 1979: Effect of nitrogen sources and management on ammonia volatilization losses from flooded soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 43: 352—358.

EFFECTS OF FERTILIZATION METHODS ON PROPERTIES OF THE WATER IN RICE FIELDS AND RECOVERY OF APPLIED N (¹⁵N LABELLED UREA) BY LOWLAND RICE

Cao Zhihong

S. K. DeDatta

(*Institute of Soil Science, Academia Sinica*) · (*International Rice Research Institute*)

Summary

Studies were conducted on the effects of application methods on the recovery of fertilizer N by rice plant (*Oryza sativa* L.) using ¹⁵N labeled urea in microplots at the International Rice Research Institute (IRRI) in 1981.

Uniform placement with prilled urea and point placement with urea supergranule (SGU) gave the highest yields (6.4t/ha) with the efficiency of 51 kg rough rice/kg N in dry season. In wet season, point placement with SGU produced the highest yield (4.4t/ha) with the efficiency of 40 kg rough rice/kg N.

Higher pH and total N (urea+NH₄⁺-N) concentration of the water in the paddy field after fertilization with split application and band placement indicates the greater N losses from NH₃ volatilization and denitrification with these two methods. Lower pH and total N concentration of the water in the paddy field (5ppm) after fertilization with uniform placement of prilled urea and point placement of SGU demonstrates the ability to reduce N losses of these two methods in lowland rice fields.

Vigorous growth of algae in the water of paddy field were observed after fertilization with split application and band placement of prilled urea. However, there were hardly any algae observed in the plots where no fertilizer N was applied and in the plots where the uniform placement of prilled urea and the point placement of SGU were used.

As high as 73% in the dry season and 65% in the wet season of fertilizer ¹⁵N were recovered by the rice plant at harvest (grain+straw) with point placement of SGU. However, higher recovery and efficiency of fertilizer N with point placement of SGU was not induced by higher N concentration at certain points but by deep placement itself.