

# 石灰性稻田土壤上化肥氮损失的研究\*

朱兆良<sup>1)</sup> J. R. Simpson<sup>2)</sup> 张绍林<sup>1)</sup> 蔡贵信<sup>1)</sup>  
陈德立<sup>1)</sup> J. R. Freney<sup>2)</sup> A. V. Jackson<sup>3)</sup>

## 摘 要

在田间用 <sup>15</sup>N 示踪技术和微气象学的质量平衡法研究了石灰性稻田土壤上化肥氮的损失。结果表明：(1) 碳铵和尿素在有水层下混施作基肥，氮素总损失分别高达 72% 和 63%；其中氨挥发达到 39% 和 30%，分别占总损失的 54% 和 48%；都远高于以往在中性水稻土区酸性土壤上测得的结果。(2) 石灰性稻田土壤氮挥发量大，是造成其氮素总损失远高于酸性稻田土壤的根本原因。两种土壤上，氮肥的反硝化损失量(差减法)似没有明显的差异。(3) 石灰性土壤上氨挥发量大的主要原因是其高的土壤和灌溉水的 pH。石灰性土壤的高 pH 和光照充足，促进了田面水中藻类的生长。由此引起的日间田面水 pH 的上升促进了尿素的氨挥发，而对碳铵的氨挥发的促进则不大。

1984 年我们曾在江苏省丹阳县的酸性水稻土上，进行了碳铵和尿素作水稻基肥有水层混施时，氮素损失和氨挥发的田间研究<sup>[4]</sup>。考虑到土壤性质，特别是土壤反应，以及气候条件对氮素损失具有强烈的影响，1986 年又在河南省封丘县石灰性水稻土上进行了类似的研究。本文除报告这次试验结果外，并对两地的结果作一对比分析。

## 一、试验方法和经过

试验于 1986 年麦收后在河南省封丘县潘店乡周口村进行。总控制面积约 150 亩，系东西宽 263 米、南北长 374 米的平坦稻田。原为旱粮区，1983 年起改种水稻。土壤为小两合土，耕层土壤系砂壤土，pH(水)8.81，全氮含量 0.049%，有机质 0.683%，速效磷 16.5 ppm，<0.001 毫米粘粒 10.7%。在 30—50 厘米处为壤土，其下则为细砂土。供氨挥发观测用的三个半径为 25 米的圆形区的分布是：本片的西南部设对照区，不施氮肥；中部偏东处设尿素区，西北部设碳铵区。四周皆为保护区，在试验开始前 6 天停止施肥，在此之前仅施少量低质堆肥和碳铵。圆形区于 6 月 21 日上午上水耙平后撒施 90 公斤 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/公顷的过磷酸钙后，随即按处理撒施 90 公斤 N/公顷的碳铵或尿素，并与土耙混，开始进行观测和移栽。水稻品种为 6811，栽插密度为 17×17 厘米。灌溉水的 pH 为 8.5。碳铵区于 6 月 5 日结束观测，尿素区延至 7 月 1 日结束。在尿素区中埋入直径 37 厘米、高 40 厘米的无底塑料筒 16 个，

\* 参加工作的还有徐银华同志；本工作得到中国科学院封丘生态试验站和封丘县有关方面的大力支持；澳大利亚国际农业研究中心 (ACIAR) 提供了部分资助，在此谨表谢意。

1) 中国科学院南京土壤研究所

2) Division of Plant Industry, CSIRO, Canberra Australia.

3) Division of Environmental Mechanics, CSIRO, Canberra Australia.

埋入土中 30 厘米。与圆形区的施肥和栽秧条件相同,但施用  $^{15}\text{N}$  标记碳铵和尿素,其  $^{15}\text{N}$  丰度分别为 6.04% 和 6.27%。分别于 6 月 30 日—7 月 1 日和 8 月 11 日,每个处理各采 4 筒的植株和土壤样品。

将两台风速仪分别设置在尿素和碳铵区的中心点,以两者的平均值供计算氨挥发量之用。田面水样的采集采用定点固定高度(土面以上 3 厘米)的方法,每区 5 个点,以混合样供分析用。尿素区每天早晨的水样,加醋酸苯基汞溶液后贮存供尿素态氮的比色测定<sup>[3]</sup>。观测氨挥发的微气象学法和水样分析方法皆见前报<sup>[1]</sup>。样品的  $^{15}\text{N}$  丰度由南京土壤所质谱组承担。

## 二、试验结果和讨论

### (一) 氮肥的氮素总损失

本次试验结果与以往相同<sup>[1,2,4]</sup>,氮素损失主要发生在施肥后 9—10 天之内(表 1),而

表 1  $^{15}\text{N}$  标记氮肥的氮素平衡(石灰性稻田土壤,占施入 N 的%)

Table 1 Nitrogen balances of  $^{15}\text{N}$ -labelled fertilizers (Calcareous soil) (% of N applied)

| 采样时间(日/月)<br>Date of sampling | $^{15}\text{N}$ 回收和损失<br>Recovery and loss | 碳铵<br>$\text{NH}_4\text{HCO}_3$ | 尿素<br>$(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ |
|-------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 30/6—1/7                      | 水稻全株回收                                     | 6.2                             | 6.8                              |
|                               | 土壤中残留: 0—15 cm                             | 15.9                            | 27.6                             |
|                               | 15—30 cm                                   | 0.64                            | 0.65                             |
|                               | 30—45 cm                                   | 0.57                            | 0.31                             |
|                               | 0—45 cm                                    | 17.1                            | 28.6                             |
|                               | 总回收                                        | 23.3                            | 35.4                             |
|                               | 损失                                         | 76.7±3.0                        | 64.6±3.1                         |
| 11/8                          | 水稻全株回收                                     | 20.9                            | 27.5                             |
|                               | 土壤中残留: 0—15 cm                             | 9.5                             | 10.8                             |
|                               | 15—30 cm                                   | 0.15                            | 0.47                             |
|                               | 30—45 cm                                   | 0.52                            | 0.17                             |
|                               | 45—60 cm                                   | 1.1                             | 0.11                             |
|                               | 0—60 cm                                    | 11.2                            | 11.6                             |
|                               | 总回收<br>损失                                  | 32.1<br>67.9±2.5                | 39.1<br>60.9±3.2                 |

且,标记氮在土壤中的残留部分主要集中在耕层,因此,当季的淋失极少,氮素损失的途径应为气态逸失。从两次采样测得的氮素损失的平均值来看(表 2),碳铵的损失高达 72%,尿素也达到 63%,都远高于前次丹阳试验中的结果。表 2 还列出了氨挥发及由差减法得出的反硝化损失量<sup>[4]</sup>。在本次试验中,碳铵和尿素的反硝化损失都约为 33%,与丹阳试验的结果相近。但是,两区的氨挥发却分别高达 39% 和 30%,远高于丹阳试验的结果。这表明,两个试验中氨挥发量的不同是造成其氮素总损失相差很大的主要原因。这显然与封丘试验中土壤和灌溉水的 pH 很高有密切的关系。

在许多热带水稻田进行的观测中,氨挥发常是尿素的氮素损失的主要途径<sup>[6-8]</sup>。但是在我们的两次试验中,反硝化是主要的(酸性土壤上)或重要的(石灰性土壤上)氮素损失途径。即使是在后一种土壤上,氨挥发也只占总损失的一半左右(表 2)。这表明,稻田中

表 2 有水层混施作水稻基肥时碳铵和尿素的氮素损失(占施入N的%)

Table 2 N losses from ammonium bicarbonate and urea applied to flooded rice at transplanting by surface broadcast and incorporation (% of N applied)

| 试验地点<br>Location | 土壤 pH<br>Soil pH | 氮肥<br>N fertilizer                 | 总损失<br>Total loss<br>A | 氨挥发<br>Ammonia<br>loss B | 反硝化<br>Denitrifica-<br>tion A-B | 氨挥发/总损失:(%)<br>Ammonia loss(%)<br>Total loss, B/A | 文献<br>Reference |
|------------------|------------------|------------------------------------|------------------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------|
| 丹阳               | 5.2-5.4          | NH <sub>4</sub> HCO <sub>3</sub>   | 53.7                   | 19.5                     | 39.2                            | 33                                                | [4]             |
|                  |                  | (NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CO | 45.4                   | 8.8                      | 36.6                            | 19                                                |                 |
| 封丘               | 8.8              | NH <sub>4</sub> HCO <sub>3</sub>   | 72.3                   | 39.1                     | 33.2                            | 54                                                | 本次试验            |
|                  |                  | (NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CO | 62.9                   | 30.1                     | 32.8                            | 48                                                |                 |

氮肥的氮素损失中不同途径的相对重要性与土壤反应、灌溉水的硷度以及气候条件等有密切的关系。从趋势上看,酸性水稻土上氮素损失以反硝化为主;在石灰性水稻土上氨挥发的重要性显著增大而成为重要的损失途径;碳铵的氨挥发又高于尿素。所有这些都与我们在水稻盆栽试验中得到的总趋势相一致<sup>[3]</sup>。

## (二) 氨挥发速率和影响氨挥发的因素

两地的试验虽然都是在 6 月下旬进行的,但是,在丹阳试验期间天气大多为多云和阴,光照少,而在封丘试验期间则天气多晴朗。因此,封丘试验中田面水在日间的最高温度,除施肥的当天外,大多高于丹阳试验(图 1)。封丘试验中的平均风速,在施肥的当天和第 2 天低于丹阳试验,如图 1,但此后则互有高低。总的来看,两地试验间这些差别都不大。

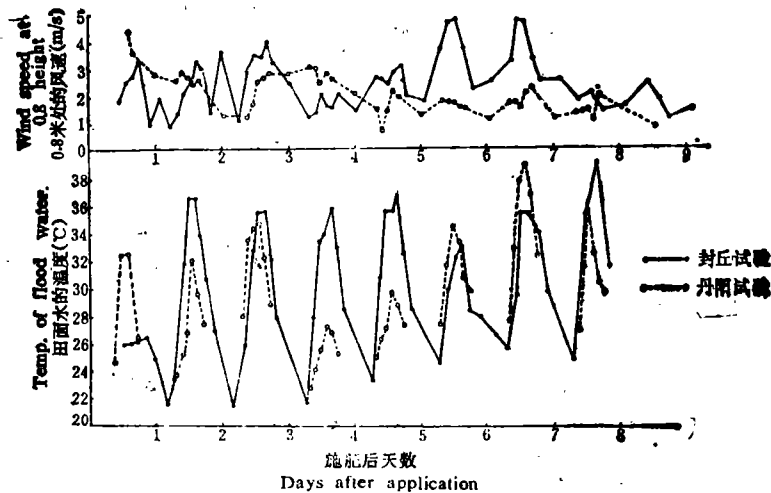


图 1 试验期间平均风速和平均水温的变化

Fig. 1 Mean wind speeds and mean temperature of floodwater in field experiments

两地试验中田面水的 pH 有很大的差异,如图 2。在丹阳试验中,无论是碳铵区或尿素区,田面水的 pH 始终都低于 8。而在封丘试验中则都高于 8,日间的最高值多在 9—10.6 之间。这是两地氨挥发量相差很大的重要原因。造成两地田面水 pH 相差很大的主要原因是土壤和灌溉水的 pH 的不同。据测定,封丘试验中的相应数值是 8.8 和 8.5,而

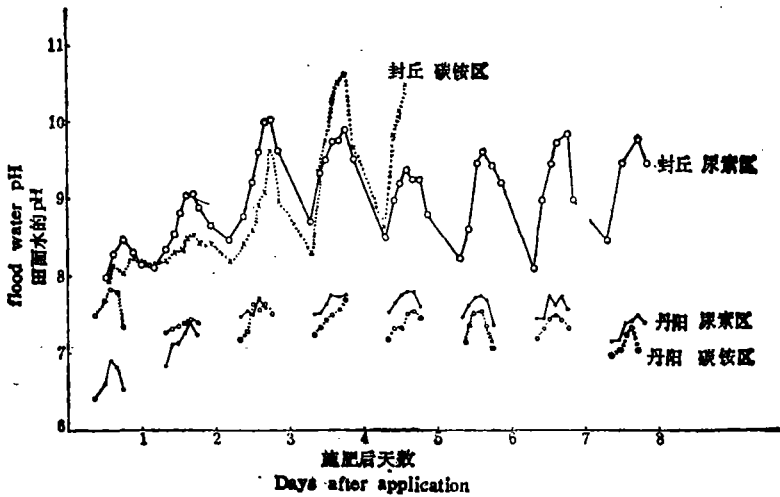


图2 试验期间田面水 pH 的变化

Fig. 2 Variation of floodwater pH in field experiments

丹阳试验中则分别为 5.2—5.4 和 6.8—6.9。至于藻类生长对田面水日间 pH 上升的影响, 只在封丘试验中表现比较明显, 而且, 这种影响在施肥后最初 3 天有逐渐增大的趋势。这与肉眼观察到的水中藻类的生物量的增长相符。由于碳酸区氨挥发速率的高峰出现在施肥后的最初 2 天(图 5), 因此, 田面水 pH 因藻类生长在日间的显著升高, 对碳酸的氨挥发

的影响就不大。与此相反, 尿素水解形成  $(\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3)\text{-N}$  的高峰正好出现在施肥后的第 3 至第 5 天(图 4), 因此, 藻类生长对田面水 pH 的影响显著地促进了尿素的氨挥发(图 6)。由此看来, 田面水中藻类生长所引起的 pH 在日间的显著升高对氨挥发的影响程度与氮肥的形态有关。应当指出, 土壤 pH 和光照条件是影响藻类生长的两个重要生态因子<sup>[10]</sup>。在丹阳试验中, 用肉眼未能观察到藻类的生长, 这可能与土壤 pH 较低、光照又弱有关。在封丘试验中, 土壤的硷性反应和强烈的光照则促进了藻类的生长。由此看来, 稻田田面水中藻类生长对田面水的日间 pH 和氨挥发有强烈影响<sup>[9]</sup>, 这一观点并不具普遍意义。

田面水中  $(\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3)\text{-N}$  的含量受到施肥方法的强烈影响。在田面有水层下混施作基肥时, 施肥后存留于田面水中的氮量是很高的(图 3 和图 4)。在丹阳和封丘试验的碳酸区中, 在施肥后立即取样测定时, 其

$(\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3)\text{-N}$

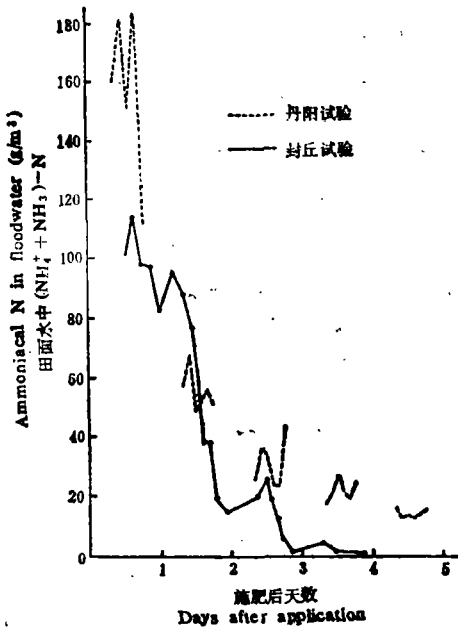


图3 田面水中  $(\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3)\text{-N}$  含量的变化(碳酸区)

Fig. 3 Ammoniacal N content in floodwater (ammonium bicarbonate plot).

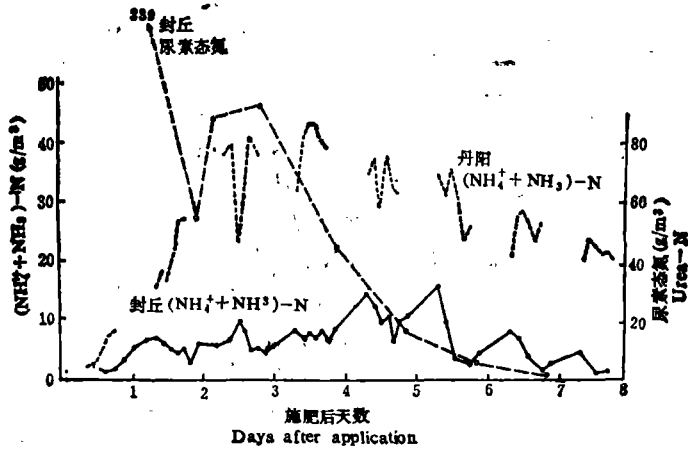


图 4 田面水中氮的含量(尿素区)

Fig. 4 N content in floodwater (urea plot)

的浓度分别达到183克 N/立方米和114克 N/立方米,如果以水层平均厚 4 厘米计,则存留于田面水中的氮量占施入氮量的 81% 和 51%。

可见,这种施肥方法难以达到将氮肥充分混入土中的目的。封丘试验的尿素区在施肥后立即测定时,水中尿素氮的含量更高达 239 克 N/立方米,为施入氮量的 106%,也进一步证明了这一论断。碳铵区田面水中  $(\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3)\text{-N}$  含量,随着氨挥发的进行而迅速降低,至施肥后第 4 天已降至很低水平(图 3)。至于尿素区,如图 4,田面水中  $(\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3)\text{-N}$  含量主要决定于尿素水解形成  $(\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3)\text{-N}$  和氨挥发的消耗这两个因素的控制,其高峰出现在第 3 天至第 5 天。应当指出,在丹阳试验中,氨挥发停止时田面水中  $(\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3)\text{-N}$  的含量约为 10—20 克 N/立方米,而在封丘试验中,相应的数值却低于 1 克 N/立方米。造成这一重大差异的主要原因是,高的田面水 pH 值显著地提高了氨的分压,使得即使水中  $(\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3)\text{-N}$  含量很低时也能继续进行氨挥发。

碳铵区的氨挥发速率示于图 5。两个试验的共同点是施肥后氨挥发立即发生并达到高峰,丹阳与封丘两试验中的峰值分别为 2.3 公斤 N/公顷·小时和 1.6 公斤 N/公顷·小时。此后迅速降低,至施肥后第 4 天已基本停止挥发。在封丘试验中,施肥当天的峰值低于丹阳试验,但第 2 天则仍保持较高的挥发速率,这除与施肥当天两地的风速、水温的差异有关外,水中  $(\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3)\text{-N}$  含量的显著差异可能是其主要原因。两地尿素区氨挥

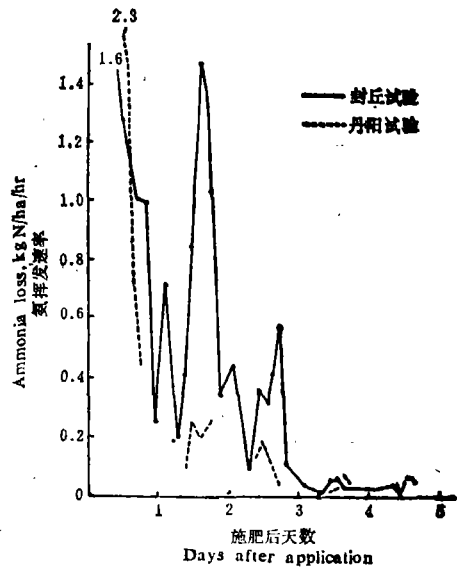


图 5 稻田中碳铵的氨挥发速率

Fig. 5 Rate of ammonia volatilization from ammonium bicarbonate applied to flooded rice fields

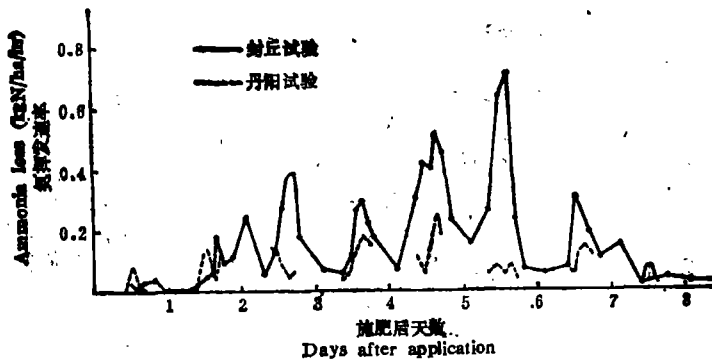


图6 稻田中尿素的氨挥发速率

Fig. 6 Rate of ammonia volatilization from urea applied to flooded rice fields

发的发生都较慢,峰值低,持续时间则较长,这显然是尿素逐渐水解所产生的结果。此外,如上所述,封丘试验的尿素区,由于受土壤和灌溉水 pH、特别是藻类生长引起的日间田面水 pH 显著升高的强烈影响,其氨挥发速率显著高于丹阳试验的尿素区。

总结两地的试验结果似乎可以推论,稻田中氮肥的氨挥发,与反硝化损失相比,受土壤反应和环境条件的影响更为强烈。考虑到下述事实,这一点似乎更为明显。即同一氮肥在两种土壤上,或同一土壤上两种氮肥之间,氨的挥发都有相当大的差异,但是,它们的反硝化损失却都没有明显的不同。为了进一步验证这一推论,除了扩大试验点外,反硝化损失的原位直接测定具有重要的意义。

## 参 考 文 献

- [1] 朱兆良、蔡贵信、俞金洲, 1977: 稻田中  $^{15}\text{N}$  标记硫酸铵的氮素平衡的研究初报。科学通报, 第 22 卷 11 期, 503 页。
- [2] 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—233 页。
- [3] 朱兆良、蔡贵信、徐银华、张绍林, 1985: 种稻下氮肥的氨挥发及其在氮素损失中的重要性的研究。土壤学报, 第 22 卷 4 期, 320—328 页。
- [4] 蔡贵信、朱兆良、朱宗武, A. C. F. Trevitt, J. R. Freney, and J. R. Simpson, 1985: 水稻田中碳铵和尿素的氮素损失的研究。土壤, 第 17 卷 5 期, 225—229 页。
- [5] Douglas, L. A., and Bremner, J. M. 1970: Extraction and colorimetric determination of urea in soils. Soil Sci. Soc. Amer. J., 34: 859—862.
- [6] Fillery, J. R. P., and De Datta, S. K. 1986: Ammonia volatilization from nitrogen sources applied to rice fields. 1. Methodology. Soil Sci. Soc. Amer. J., 50: 80—86.
- [7] Fillery, J. R. P., Simpson, J. R. and De Datta, S. K. 1984: Influence of field environment and fertilizer management on ammonia loss from flooded rice. Soil Sci. Soc. Amer. J., 48: 914—920.
- [8] Fillery, J. R. P., Simpson, J. R. and De Datta, S. K. 1986: Contribution of ammonia volatilization to total nitrogen loss after applications of urea to wetland rice fields. Fert. Res., 8: 193—202.
- [9] Mikkelsen, D. S., De Datta, S. K. and Obcemea, W. N. 1978: Ammonia volatilization losses from flooded rice soils. Soil Sci. Soc. Amer. J., 42: 725—730.
- [10] Roger, P. A., and Kulasooriya, S. A. 1980: Blue-green Algae and Rice. pp. 112. International Rice Research Institute, Philippines.

## INVESTIGATIONS ON NITROGEN LOSSES FROM FERTILIZERS APPLIED TO FLOODED CALCAREOUS PADDY SOIL

Zhu Zhaoliang<sup>1)</sup> J.R. Simpson<sup>2)</sup> Zhang Shaolin<sup>1)</sup> Cai Guixin<sup>1)</sup>

Chen Deli<sup>1)</sup> J.R. Freney<sup>2)</sup> and A. V. Jackson<sup>3)</sup>

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

(2) *Division of Plant Industry, CSIRO, Canberra Australia*

(3) *Division of Environmental Mechanics, CSIRO, Canberra Australia*

### Summary

N losses were investigated in the field of calcareous paddy soil by <sup>15</sup>N-tracer and micrometeorological mass balance techniques. Results revealed that:

1. Total N loss from ammonium bicarbonate and urea broadcast into floodwater and incorporated just before transplanting was 72% and 63%, of which 39% and 30% was of ammonia loss which accounted for 54% and 48% of total N loss, respectively.

2. The higher N loss from calcareous soil, as compared with acidic one, is primarily due to the higher ammonia loss, because the difference in denitrification loss between the two soils investigated in this series of research was insignificant.

3. The higher ammonia loss from ammonium bicarbonate applied to calcareous soil can be mainly attributed to the high pH values of the soil and irrigation water. However, the elevation of floodwater pH in day time resulted from the vigorous growth of algae also contribute partly the higher ammonia loss from urea applied to the calcareous soil.