

淹水种稻条件下化肥氮的硝化—反硝化 损失的初步研究*

廖先苓 徐银华 朱兆良

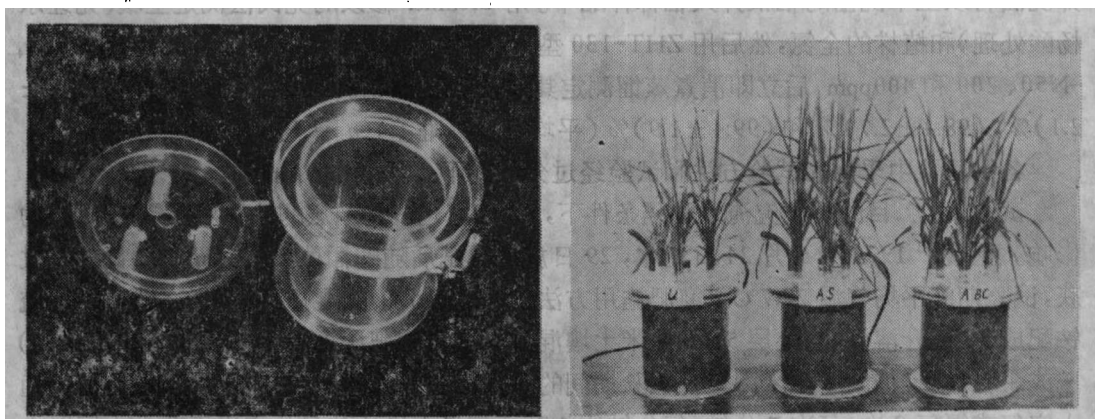
(中国科学院南京土壤研究所)

在中性和微酸性水稻土中施用硫酸铵时,硝化—反硝化作用是化肥氮损失的主要途径,除了淹水后在土表形成的氧化层及其下的还原层中可以分别进行硝化和反硝化作用外,水田中的硝化微生物与具反硝化作用的极毛杆菌相伴生,无论是在土表的氧化层或其下的还原层中,或是在稻根附近的氧化层或根外的还原层中都可进行硝化—反硝化作用^[4]。本工作的主要目的是:用特制盆钵进行盆栽试验,研究在淹水种稻条件下不同机制的硝化—反硝化作用,此外也涉及到水稻的生长、氮肥的施用方法对氮素损失的影响。

一、试验用的特制盆钵和试验方法

(一) 特制密闭盆钵

为了能控制盆钵中水层以上空间的气体组成并使水稻正常生长,我们将 Datta 等 (1971)^[6]设计的盆子略加修改,用有机玻璃制成了密闭盆钵(照片1),其内径20厘米、高25厘米。盆口外沿有一凹槽,宽2.7厘米、深4厘米,加盖后容积约0.6升,内盛水约0.3



照片1 密闭盆钵
Photo. 1 Sealed pot

照片2 密闭盆钵中水稻生长正常
Photo. 2 Healthy growth of rice plants
in sealed pots

* 参加部分工作的有张绍林、徐永福同志。样品的¹⁵N丰度由我所质谱组测定,供试土壤的粘粒含量由徐富安、于德芬同志测定。

升以形成水阀。槽中加水的另一作用,是平衡因气温变化而引起的盆内气体的压力变化,以保证盆内水层以上空间的密闭状态。盆盖上有三只呈三角形对称分布的、内径 2.2 厘米的植稻管,其盆内部分长 7 厘米,植稻期间管口始终淹没在水层中。稻苗移栽于盆内,其茎叶从植稻管向盆外伸展,因而得以正常生长(照片 2),盆盖两侧各有一内径约 6 毫米的进、出气管,供交换盆内水层以上空间的气体之用。盖内有挂钩可悬挂小皿,供在盆内收集氨气之用,硼酸吸收液可从盖中心的管口加入或吸出。氨的吸收亦可用气流将盆内气体交换到盆外进行。凹槽下沿盆壁上有一垂直向上的弯管供指示盆内水层和加水之用,试验期间保持水层厚度在 3 厘米左右。盆壁下侧的小管供收集渗漏液之用。试验期间盆外套以黑白双层布罩。

(二) 试验方法

试验于 1979 和 1980 年分三组进行。供试土壤采自江苏省无锡县的爽水型水稻土(黄泥土)。1979 和 1980 年两次采集的土样其基本性质分别为: $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 6.6 和 7.1, 全氮 0.128% 和 0.163%, <1 微米粘粒含量 23.2% 和 25.0%, 代换量 20.4 和 20.3 毫克当量/100 克土。

三组试验在方法方面的共同之处是: 每盆装风干土 4.75—5.5 公斤,与相当于 P_2O_5 和 K_2O 各 1 克的 KH_2PO_4 和 K_2SO_4 充分混匀,施入含氮约 0.5 克的 ^{15}N 标记硫酸(约相当于 100ppmN),其 ^{15}N 丰度为 10% 左右。淹水(蒸馏水,下同)种稻,每盆 3 穴,每穴 3—5 株,品种为广陆矮四号(试验 1)或吴广早(试验 2, 3),早稻秧龄 46—48 天,晚稻 23 天。试验都在孕穗或始穗期结束。历时 30—44 天。在试验期间向盆内水层以上的空间分别通入空气或氮气。用 2% 硼酸在盆外(试验 2,3)或同时在盆内、外(试验 1)收集氨,在施肥后不同时间用蒸馏法测定吸收液中的氨态氮量和 ^{15}N 丰度。试验期间盆底不渗漏。各处理均重复 4 次。试验结束时将稻株连根拔出,把凹槽内的水倒入土中混匀、取样,然后用筛洗法将从土中洗出的稻根并入稻株样品中。用 Bremner 修改的克氏法测定土壤(先经水杨酸处理)和植株的全氮,然后用 ZHT-130 型质谱计测定 ^{15}N 丰度^[2]。土壤加 $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ -N50、200 和 400ppm 后立即消煮蒸馏测定其 ^{15}N 丰度,测得的回收率分别为 $(94.8 \pm 2.1)\%$, $(98.4 \pm 2.7)\%$ 和 $(99.4 \pm 1.9)\%$ (平均值和标准差, $n = 4$)。

各组试验中采用的试验方法和试验经过分述如下:

试验 1 目的是研究淹水种稻条件下,土表氧化—还原层的分异对硫酸铵氮损失的影响。土壤于 1979 年 5 月 24 日淹水,29 日施入氮肥后随即插秧,7 月 6—12 日分批收获,试验期间平均气温 29.7℃。氮肥施用方法分为:(1)液肥混施,将应施的 ^{15}N 标记硫酸铵配成 50 毫升溶液,与上层 5—6 厘米土壤混合。(2)粒肥深施,将等量硫酸(2.4 克/盆)压成 4 粒,施于株间 6 厘米深处。试验期间的通气方法是,每日向盆内水层以上的空间通入空气或氮气 2 次,每次 5 分钟,每分钟约 1 升,每日交换的气量约相当于盆内水层以上空间容积的 10 倍。

试验 2 目的是进一步验证试验 1 的结果,并且增加不种稻的处理,以观察水稻生长对氮素损失的影响。1980 年 5 月 6 日施肥、移栽,至 6 月 5 日试验结束。试验期间密闭盆内日平均水温 22.4℃。 ^{15}N 标记硫酸铵的施用方法改为:(1)表施,先加水至盆中土壤

达到饱和后,将粉状硫酸铵撒于土表,2 小时后再加水至 3 厘米水层。(2)混施,将粉状硫酸铵与上层1/3的土壤混匀后淹水。为了加大通氮气与通空气的处理之间的差异,将每日通气次数增至 4 次,每次通气时间增至 15 分钟,每分钟约 1 升,每日交换气量约为盆内水层以上空间容积的 60 倍。

试验 3 本试验是在试验 1 和 2 的基础上,研究土体中的氧在铵态氮肥硝化—反硝化损失中的作用。为此,对一部分盆钵进行了用氮气驱除土体中空气的预处理,其方法是在盆底垫一层碎石(装在尼龙网袋中),装风干磨碎土壤后从盆下侧渗漏管通入氮气 15 分钟,然后再从该管向盆内加水至约 3 厘米的水层。试验自 1980 年 8 月 15 日开始,至 9 月 26 日结束,试验期间盆内日平均水温为 24.9℃,向盆内水层以上空间通入空气或氮气的方法改为每日上、下午连续通气共约 7 小时,每分钟约 60 毫升,每日交换气体量约为盆内水层以上空间容积的 25 倍。硫酸铵的施用方法同试验 2。

二、结果和讨论

(一) 氨的挥发

在供试的中性水稻土上混施硫酸铵时,氨的挥发量是很少的(在 1.1% 以下),表施时可达 1.7—1.9%。以占肥料氮总损失量的比例计,除表施者可达 10% 以上外,皆不超过 4%。由于凹槽中的水吸收了少量的氨,上述结果比实际挥发量要低一些。我们曾在试验 2 施肥 14 天后测定了凹槽中水的含氮量,不同处理之间变动于痕迹—0.70 毫克 N/盆,其中属于肥料氮的量为痕迹—0.55 毫克 N/盆,只相当于上述的肥料氮呈氨挥发损失总量的 2% 以下(混施)和 6—10% (表施)。因此,即使加上这一部分氮量,氨的挥发损失总量仍然很低。这表明,除表施者外,平衡账中的亏缺量几乎可以直接视为硝化—反硝化损失量。

(二) 硝化—反硝化作用

我们把氮素平衡账中的亏缺量扣除氨的挥发损失量后计为硝化—反硝化损失量,这种间接计算的方法当然是不够严格的,因为还存在着氮素通过地上部分而损失的可能性^[6],但估计其量可能不大,因为表 2 和表 3 中氮肥混施种稻的各处理其氮素亏缺也只有 6.5—8.9%。

从表 1 和表 2 中各对处理,可以看出,通氮气与通空气的处理之间的氮素亏缺量没有明显的差异。造成这一现象的原因之一可能是通气速率不够高,通气时间不够长,使得通空气的处理,其土表的氧化层—还原层的分异还不够充分,因而这一部位进行的硝化—反硝化作用还不强。但是,从另一方面来说,稻田土壤在淹水后需要经过一定时间才能使土表的氧化层—还原层的分异达到充分的程度,而作基肥施用的硫酸铵,其氮素损失的主要时间却大多是在施肥后的初期阶段,在土壤中肥料来源铵态氮量降至较低水平后,肥料氮的进一步损失就比较少了^[1,3,5]。由此看来,水稻田土表氧化层—还原层的分异可能不是作基肥施用的铵态氮肥氮素损失的主要机制,至少不是唯一的硝化—反硝化损失机制。

那么还可能存在哪些硝化—反硝化机制呢?看来还有两种可能的机制,其一是水稻

对反硝化作用有正的根本效应^[7]；其二是在耕层的还原层中，也可以进行硝化—反硝化作用^[4]。从试验 2-2 和 2-4，2-3 和 2-5，3-2 和 3-3 各组对比来看，种稻都显著地降低了硝化—反硝化损失量。铵态氮肥施入土壤后，其氮素损失决定于(1)铵的硝化—反硝化速率和(2)微生物和粘土矿物的固定作用以及(3)水稻对肥料氮素的吸收速率。这三个作用之间存在着相互竞争的关系。当后两种作用增强时，第(1)个作用就可能受到削弱，在种稻条件下其削弱的程度看来要大于水稻根系对反硝化作用可能存在的正根本效应。Broadbent 等^[8]的试验结果也表明水稻生长过程中降低肥料氮的损失。

再者，即使是在通氮气不种稻的处理中，虽然既无土表氧化层—还原层的分异所引起的硝化—反硝化作用，也不存在水稻根际可能产生的反硝化损失，同时也没有通过水稻地上部分产生氮素损失的可能性，但却仍然有约 15% 的肥料氮未能回收(处理 2-2)。这意味着土壤中存在一些可能是通过微生物机制能够氧化铵成为亚硝态氮和硝态氮的物质。我们设想，其中除了土体孔隙中可能含有的氧气或其他含氧气体外，土体中的高价金属氧化物，特别是无定形氧化铁和锰也可能具有氧化铵时的电子受体的作用。为了区分这两种可能的作用，我们在试验 3 中设置了用氮气预先驱除土体中空气的处理。从试验结果来看，经过氮气驱除土壤空气后淹水种稻通氮气的处理(3-3)，并不比不用氮气驱除土壤空气的处理(3-4)的氮素损失减少，同样，即使是先经氮气驱除土壤空气后淹水不种稻者，

表 1 试验 1(¹⁵NH₄)₂SO₄ 的氮素平衡Table 1 N balance sheet of (¹⁵NH₄)₂SO₄ in experiment 1

代号 Exp. No.	处 理 Treatment	植物吸收 (%) Recovered by aerial parts and roots	土壤中残留 (%) Retained in soil	亏缺(%) Deficit	氮的挥发损失 ¹⁵ NH ₃ -N volatilized	
					占施入氮量 (%) % of N applied	占亏缺(%) % of deficit
1-1	液肥混施, 不加盖 Incorporation of N solution with soil. Rice plants grow in unsealed pot without cover	55.1	11.4	33.5		
1-2	液肥混施, 通氮气 Incorporation of N solution with soil. Transmitting N ₂ gas through the upper-space in sealed pot	49.7	21.1	29.2	1.1	3.9
1-3	液肥混施, 通空气 Incorporation of N solution with soil. Transmitting air through the upper- space in sealed pot	51.2	22.5	26.3	1.0	3.8
1-4	粒肥深施, 通氮气 Deep placement of pelleted N Transmitting N ₂ gas through the upper-space in sealed pot	61.1	25.3	13.6	0.01	0.07
1-5	粒肥深施, 通空气 Deep placement of pelleted N Transmitting air through the upper-space in sealed pot	62.2	25.0	12.8	<0.01	0.03
	L. S. D.					
	5%			3.4		
	1%			4.7		

表 2 试验 2 ($^{15}\text{NH}_4$) $_2\text{SO}_4$ 的氮素平衡
Table 2 N balance sheet of ($^{15}\text{NH}_4$) $_2\text{SO}_4$ in experiment 2

代号 Exp. No.	处 理 Treatment	植物吸收 (%) Recovered by aerial parts and roots	土壤中残留 (%) Retained in soil	亏缺(%) Deficit	氨的挥发损失 $^{15}\text{NH}_3\text{-N}$ volatilized	
					占施入氮量 (%) % of N applied	占亏缺(%) % of deficit
2-1	粉肥混施, 不加盖 Incorporation of N Rice plants grow in unsealed pot without cover	31.9	54.1	14.0		
2-2	粉肥混施, 通氮气, 不种稻 Incorporation of N Transmitting N_2 gas through the upper-space in sealed pot without rice plants		84.7	15.3	0.50	3.3
2-3	粉肥混施, 通空气, 不种稻 Incorporation of N Transmitting air through the upper-space in sealed pot without rice plants		84.1	15.9	0.53	3.3
2-4	粉肥混施, 通氮气 Incorporation of N Transmitting N_2 gas through the upper-space in sealed pot with rice plants	41.1	50.3	8.6	0.20	2.4
2-5	粉肥混施, 通空气 Incorporation of N Transmitting air through the upper-space in sealed pot with rice plants	43.2	47.9	8.9	0.24	2.7
2-6	粉肥表施, 通氮气 Surface-broadcast of N Transmitting N_2 gas through the upper-space in sealed pot with rice plants	51.3	33.2	15.5	1.9	12.8
2-7	粉肥表施, 通空气 Surface-broadcast of N Transmitting air through the upper-space in sealed pot with rice plants	54.6	34.0	11.4	1.7	16.9
	L. S. D. 5%			5.3		
	1%			6.0		

仍有 13.5% 的肥料氮未能回收(处理 3-2)。当然, 所用的方法可能并未能彻底地驱除土壤中的空气, 但是所残留的少量空气似乎不可能造成如此显著的氮素亏缺。看来, 除了土壤空气中的氧和其他含氧气体以外, 土壤中的高价金属氧化物可能也是铵氧化中的电子受体。当然, 有必要对这一推论作进一步的验证。

三、结 论

从以上试验结果可得到的初步结论是:

1. 在硫酸铵作基肥混施时, 氮素损失的主要途径是硝化—反硝化作用。
2. 水稻的生长显著地降低了铵态氮肥的氮素损失。
3. 试验表明, 对于作基肥施用的硫酸铵来说, 在土表氧化层及其下的还原层中进行的硝化和反硝化作用, 可能不是稻田反硝化损失的唯一机制。关于这一点值得进一步研究。

表3 试验3($^{15}\text{NH}_4$) $_2\text{SO}_4$ 的氮素平衡
Table 3 N balance sheet of ($^{15}\text{NH}_4$) $_2\text{SO}_4$ in experiment 3

代号 Exp. No.	处理 Treatment	植物吸收 (%) Recovered by aerial parts and roots	土壤中残留 (%) Retained in soil	亏缺(%) Deficit	氨的挥发损失 $^{15}\text{NH}_3\text{-N}$ volatilized	
					占施入氮量 (%) % of N applied	占亏缺(%) % of deficit
3-1	粉肥混施—不加盖 Incorporation of N Rice plants grow in unsealed pot without cover	50.8	33.4	15.8		
3-2	驱除土体中空气,粉肥混施,通氮气,不种稻 Soil air expelled by N_2 gas. Incorporation of N Transmitting N_2 gas through the upper- space in sealed pot without rice plants		86.5	13.5	0.15	1.1
3-3	驱除土体中空气,粉肥混施,通氮气 Soil air expelled by N_2 gas. Incorporation of N Transmitting N_2 gas through the upper-space in sealed pot with rice plants	63.8	28.6	7.6	0.06	0.8
3-4	粉肥混施,通氮气 Incorporation of N Transmitting N_2 gas through the upper-space in sealed pot with rice plants	61.7	31.9	6.5	0.07	1.1
3-5	驱除土体中空气,粉肥混施,通空气 Soil air expelled by N_2 gas. Incorporation of N Transmitting air through the upper-space in sealed pot with rice plants	58.5	33.6	7.9	0.04	0.5
3-6	粉肥表施,不加盖 Surface-broadcast of N Rice plants grow in unsealed pot without cover	55.6	19.1	25.4		
	L.S.D. 5%			2.1		
	1%			2.9		

参 考 文 献

- [1] 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—223页。
- [2] 邢光燕、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。
- [3] 吉野 霏、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。
- [4] 陈华癸、周启, 1961: 水稻土壤中的硝化作用和硝化微生物的研究。I. 水稻田土壤中的硝化作用。土壤学报, 第9卷1—2期, 56—64页。
- [5] Broadbent, F. E. and Tusneem, M. E., 1971. Losses of nitrogen from some flooded soils in tracer experiments. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 35: 922—926.
- [6] Datta, N. P., Banerjee, N. K. and Prasada Rao, D. M. V., 1971: A new technique for study of nitrogen balance sheet and evaluation of nitrophosphate using ^{15}N under submerged conditions of growing paddy. Inter. Symp. on Soil Fertility Evaluation Proc., Vol. 1: 631—638. New Delhi.
- [7] Garcia, J. L., 1975: Effet rhizosphere du riz sur la denitrification. Soil Biol. Biochem., 7: 139—141.
- [8] Wetselaar, R. and Farquhar, G. D., 1980: Nitrogen losses from tops of plants. Adv. in Agron., 33: 263—302.

INVESTIGATION ON NITRIFICATION-DENITRIFICATION LOSS OF FERTILIZER NITROGEN IN SUBMERGED PADDY SOIL

Liao Xian-lin, Xu Yin-hua and Zhu Zhao-liang

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

Summary

The loss of fertilizer-N in submerged paddy soil was investigated with ^{15}N -labelled ammonium sulfate in special designed pots. The gaseous composition of the atmosphere in the upper-space above the water in the sealed pot was controlled by transmitting air or N_2 gas during the experiment period (4—6 weeks after transplanting). The N loss through nitrification-denitrification was estimated by deducting the $^{15}\text{NH}_3$ volatilized from the deficit in the balance sheet of ^{15}N -labelled fertilizer-N. The results obtained are described as follows:

1. In the neutral paddy soil investigated, nitrification-denitrification was the most important pathway of the losses of fertilizer-N.

2. The loss of fertilizer-N in the treatment of transmitting N_2 gas through the upper-space in the sealed pots approximated to that of transmitting air, implying that nitrification-denitrification taken place in the oxidized layer on the soil surface and the reduced layer under it may not be the sole mechanism of nitrification-denitrification losses of fertilizer-N applied as basal dressing in soil.

3. The losses of fertilizer-N in the pots with rice were markedly lower than that without rice. The competition of the absorption of ammonium by rice plant with nitrification may be the reason of the decrease of N losses.

4. In the treatment of transmitting N_2 gas through the upper-space in the pots without rice, there was still a significant loss of fertilizer-N expelling the soil air by transmitting N_2 gas through the solum before flooding had little effect on the reduction of N losses. Therefore, it is necessary to further investigate whether any other oxides might be able to act as an electron acceptor in the oxidation of ammonium in submerged paddy soil, resulting in a subsequent denitrification loss.