

# 氮水平对水稻植株氮素损失的影响

王巧兰<sup>1,2</sup>, 吴礼树<sup>1</sup>, 赵竹青<sup>1\*</sup>, 赵林萍<sup>3</sup>

(1 华中农业大学资源与环境学院, 湖北武汉 430070; 2 军事经济学院军需系, 湖北武汉 430035;

3 中国农业科学院农业资源与区划研究所, 北京 100081)

**摘要:** 利用<sup>15</sup>N 差值法, 在溶液培养条件下研究了不同氮肥水平对水稻植株氮损失的影响, 并就影响水稻氮损失的因素进行了分析。结果表明, 对前期正常供氮的水稻幼苗做为期 10 d 的不同氮(N 0、40、80、160 mg/L)处理, 水稻植株生物量未受显著影响, 表明前期吸收氮可维持水稻生长。但是, 随着供氮水平的提高, 叶片及根的含氮量显著增加, 而<sup>15</sup>N 的丰度却显著下降, 叶片<sup>15</sup>N 的丰度显著高于根。说明高氮处理增加了水稻植株吸氮量并稀释了前期吸收的<sup>15</sup>N, 而且根系累积的氮向地上部转移。缺氮(N 0 mg/L)与过量供氮(N 160 mg/L)均显著增加植株氮的损失率, 而适量供氮(N 80 mg/L)则氮肥利用率显著提高。水稻的生长期显著影响植物氮的损失率, 在 N 80 mg/L 的条件下, 随着水稻生长期的延长, 植株氮损失从 11.6% 增加到 22.3%。同时, 随着供氮水平的提高, 叶片中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量和谷草转氨酶(GOT)活性均显著增加, 叶片组织 pH 也随之增加。表明植物体内铵浓度增加而引起的氨挥发是导致植物氮损失增加的原因之一。

**关键词:** 氮; 植株氮损失; 水稻

中图分类号: S511.062

文献标识码: A

文献编号: 1008-505X(2010)01-0014-06

## Effects of nitrogen rate on nitrogen loss from rice plant tissue

WANG Qiao-lan<sup>1,2</sup>, WU Li-shu<sup>1</sup>, ZHAO Zhu-qing<sup>1\*</sup>, ZHAO Lin-ping<sup>3</sup>

(College of Resource and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2 Wuhan Military Economic Academy, Wuhan 430035, China;

3 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In this paper, <sup>15</sup>N differential method was adopted to study the influences of nitrogen fertilizer levels on N loss from rice plant tissue, and the factors of affecting the N loss were analyzed. The N loss from rice tissue was studied by supplying different N rates (N 0, 40, 80 and 160 mg/L) for 10 d under solution culture. Before the treatments, the N was fed with <sup>15</sup>N (abundance 10%), and then the <sup>15</sup>N was substituted by normal N during the 10 d treatments. The results show that there are not significant changes in biomass for the 10 d treatments with application of different N rates, which indicates that the absorbed N at the previous stage is available to maintain the growth of rice plant for a period of time. N contents of leaves and root are increased with the increase of N levels, while the <sup>15</sup>N abundances of leaves and root are decreased noticeably with the increase of N levels, and the <sup>15</sup>N abundance of leaves is noticeably higher than that of root. Obviously, N absorption by plants is increased in the high N treatment, and the absorbed <sup>15</sup>N at early stage is diluted, which indicates N is transferring from root to leaves. N deficiency (N 0 mg/L) and over N supply (N 160 mg/L) both increase N loss from plant noticeably, and appropriate N supply (N 80 mg/L) increases N utilization noticeably. The growth stages of rice affect N loss rates remarkably. Under the condition of N 80 mg/L, N loss from plant is increased from 11.6% to 22.3% with the increase of rice growth period. Meanwhile, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N contents, and GOT activities are increased with the increase of N amount, and pH values of rice leaves are also increased. These results indicate that N use efficiency N is decreased due to the N loss from rice tissue, and ammonia volatilization may be one of the rea-

收稿日期: 2009-02-11      接受日期: 2009-05-25

基金项目: 国家科技支撑计划 2008BADA4B08-02 资助。

作者简介: 王巧兰 (1965—), 女, 湖北仙桃人, 副教授, 博士研究生, 主要从事植物营养方面的研究。E-mail: whqiaolan@263.net

\* 通讯作者 Tel: 027-87288578, E-mail: zzq@mail.hzau.edu.cn

sons for the N loss.

**Key words**: nitrogen; N loss from the plant tissue; rice

氮素通常被认为是作物产量的限制因子。长期以来,为提高农作物的产量,氮肥施用量迅速增加,而氮素利用效率随着氮肥用量的增长明显下降<sup>[1]</sup>。大量研究表明,作物的氮肥利用率大多低于50%<sup>[2-4]</sup>。一般而言,植物体内氮含量随氮肥用量的增加而提高,同时植物体氮含量与植物的阶段营养密切相关。氮肥利用率低是氮肥应用中亟待解决的问题,目前认为,氮肥利用率低的主要原因是因土壤的转化而损失,即通过氨挥发、硝化、反硝化和硝酸盐淋溶等途径损失。朱兆良<sup>[2]</sup>指出,氮肥施入土壤后,水稻能吸收其中的25%~50%,肥料<sup>15</sup>N在土壤中的残留比例为10%~35%,其余的<sup>15</sup>N亏损部分则被认为是由于氨的挥发、地下水渗漏淋失或者反硝化损失。

由于土壤损失不能完全解释氮肥利用率低的原因,近年来植物氮的损失受到广大学者的关注。Farquhar等<sup>[5]</sup>证实,玉米和小麦等禾谷类作物在开花以后可以通过植株组织释放氨而损失氮,而且叶片的衰老影响植株氮损失量。Metselar等<sup>[6]</sup>认为,植株氮素的气态损失与植物组织氮含量相关;环境因素特别是温度、风力可以影响植株组织中氮素的挥发损失。王朝辉等<sup>[7]</sup>研究发现,小麦植株氮素损失受其生育期的影响,成熟期氨挥发速率和数量成倍升高;在小麦灌浆期适度干旱可以减少冬小麦地上部分氨的挥发。黄见良等<sup>[8]</sup>应用<sup>15</sup>N示踪技术研究了水稻不同生育期吸收的<sup>15</sup>N在各器官中的分配,以及后期植物组织中氮损失,结果表明水稻在分蘖期和幼穗分化期吸收的氮素在后期可以通过植株组织挥发损失,至成熟期损失的比例分别达16.7%和13.4%。王福钧等<sup>[4]</sup>报道,水稻前期吸收的氮有6%是通过老叶和死亡器官损失,有13%~16%是通过其他途径损失的,并认为氮素挥发是氮损失的主要途径。可见,植物氮损失途径中植株体内N素损失是普遍存在的事实<sup>[9-13]</sup>。为此,本试验旨在通过研究不同氮素水平对水稻不同生长期氮损失的影响,并探讨影响植物氮损失的因素,为提高水稻氮肥利用效率,指导水稻合理施肥提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 水稻育苗

供试水稻(*Oryza sativa*)品种为珍汕97(ZS97)。

种子经过消毒后,浸种3 d,在25℃催芽2 d,将种子播于含1/10国际水稻所营养液的石英砂中培育秧苗。25 d后,将水稻幼苗转移到含1/2国际水稻所营养液中培养,每穴2株,一周后转入完全营养液,并将氮源改为(<sup>15</sup>NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(N 80 mg/L)。每天用NaOH或HCl溶液调节pH至6.0,营养液每周更换1次。移栽后的21 d进行试验处理。

### 1.2 试验处理

**1.2.1 氮水平对植物氮损失试验** 选择培养的生长一致水稻幼苗,移栽到以(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>为氮源的5 L营养液中,设4个供氮(N)水平,即:N1(0 mg/L),N2(40 mg/L),N3(80 mg/L),N4(160 mg/L),各处理4次重复,每盆4株,营养液管理同1.1,培养10 d。在试验处理前后分别取植株样,测定植株地上部和根系生物量、全氮及<sup>15</sup>N丰度,通过计算处理期间<sup>15</sup>N的损失量来估算植物氮损失率。

**1.2.2 不同生长期对植株氮损失的影响** 将培养的水稻幼苗移栽到5 L营养液,每盆4株,于以(<sup>15</sup>NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>为氮源的完全营养液中分别培养2、5、7、9周后,改用(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>为氮源的完全营养液培养,继续培养10 d。在试验处理前后分别取植株样,测定植株地上部和根系生物量、全氮及<sup>15</sup>N丰度,通过计算处理期间<sup>15</sup>N的损失量来估算植物氮损失率。

植株<sup>15</sup>N量 = 植株地上部含氮量 × 地上部干重 × <sup>15</sup>N丰度 + 处理前植株根氮含量 × 根干重 × <sup>15</sup>N丰度;

植株<sup>15</sup>N损失量 = 处理前植株<sup>15</sup>N量 - 处理后植株<sup>15</sup>N量;

植株氮损失率(%) = 植株<sup>15</sup>N损失量 / 处理前植株<sup>15</sup>N量 × 100。

### 1.3 测定方法

全氮的测定:植物全氮采用硫酸消化,流动注射分析仪测定,质谱仪分析<sup>15</sup>N丰度。

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N测定:植株中铵态氮含量参照Searle<sup>[14]</sup>的方法并加以改进。取新鲜水稻植株,称重后剪碎,于研钵中加水研磨,移至干燥的三角烧瓶中,加水定容至20 mL,振荡1~3 min,放置澄清后取上清液2 mL,注入20 mL刻度试管,加入1 mL pH 5.0柠檬酸缓冲液,摇匀后加入1 mL水合茚三酮乙醇溶液,充分摇匀,置于温水浴中,在80℃下保持30 min,取出冷却,用pH 5.0柠檬酸缓冲液稀释至10 mL摇匀,

与系列标准一起测定吸光度。

GOT(谷草转氨酶活性)测定:取处理 10 d 的水稻叶片 1.0 g 放入 0.05 mol/L Tris-HCl 缓冲液中(pH 7.2),冰浴匀浆,0℃下 26100 × g 离心 20 min,取上清液 0.2 mL 与 2.8 mL GOT 反应液混合,其中包括 0.2 mL NADH (3 mg/mL),0.5 mL dl-天冬氨酸盐(0.2 ml/L),0.1 mL 苹果酸脱氢酶(2000 U),0.2 mL α-酮戊二酸(0.05 mol/L),1.8 mL 去离子水。混合均匀后 15min 于波长 340 nm 测定吸光值,同时以不加天冬氨酸盐的反应液为对照。

水稻叶片 pH 测定:取水稻新鲜叶片 1 g,剪碎,加 0.5 mol/L KCl 溶液 20 mL,震荡 30 min,测定溶液 pH 值。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同氮水平对水稻生物量的影响

在前期供 N 80 mg/L 的情况下,转入不同的氮水平处理 10 d,各处理地上部与根的生物量干重比处理前都有显著增加,但不同供氮水平间生物量的差异不显著(图 1)。相比之下,供 N 80 mg/L 处理水稻的生物量增加最大,不供氮(N 0 mg/L)和过量供氮(N 160 mg/L)处理的水稻地上部和根系生物量均低于 N 80 mg/L 处理。表明植物体内累积的氮能够维持水稻一段时间的生长,过量供氮会抑制水稻的生长。

### 2.2 不同氮水平对水稻植株氮含量及氮损失的影响

水稻地上部及根的含氮量与供氮水平密切相关。表 1 看出,随着氮水平的提高,叶片及根中氮含

量显著增加。与处理前比较,叶片与根中氮含量均有所下降,特别是停止供氮(0 mg/L)的处理。这可能是由于水稻的快速生长产生稀释效应的结果。<sup>15</sup>N测定结果表明,在不供氮(N 0)的条件下,叶片与根中<sup>15</sup>N 丰度没有改变,但随着供氮水平的增加,叶片及根中<sup>15</sup>N 丰度显著下降,表明水稻在处理期间吸收的氮使植物组织中的<sup>15</sup>N 得到稀释,吸收氮越多,稀释强度越大。表 1 还看出,在供氮的条件下,叶片<sup>15</sup>N 丰度高于根,这也说明氮在植物体内具有较大的移动性,根中保持的<sup>15</sup>N 随培养时间的延长逐步向地上部转移。处理 10 d 后,不同处理<sup>15</sup>N 均有不同程度的损失,供氮水平越高,<sup>15</sup>N 损失量也越大,其中过量供氮(N 160 mg/L)<sup>15</sup>N 损失达 42.6 mg/pot,比 N 40 mg/L 处理约多 1 倍。因此,过量施用氮肥导致氮的损失增加,从而降低肥料利用率。<sup>15</sup>N 损失率表明,缺氮及过量供氮,都能增加氮的损失。

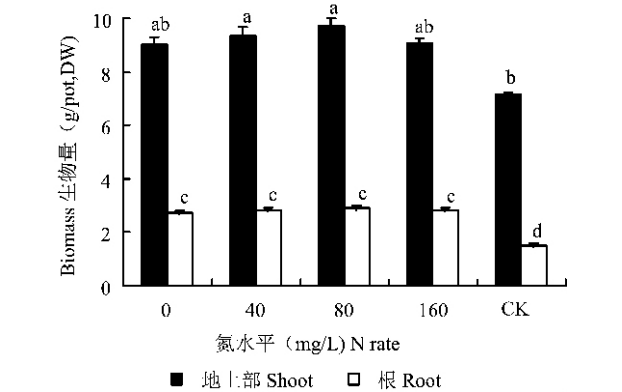


图 1 不同氮水平对水稻生物量的影响  
Fig.1 Effect of different N rate on rice biomass

表 1 不同氮水平对水稻植株氮含量的影响						
Table 1 Effects of different N rates on N content of rice plant						
氮水平 N rate (N mg/L)	地上部 Shoot		根 Root		<sup>15</sup> N 损失量 <sup>15</sup> N loss amount (mg/pot)	<sup>15</sup> N 损失率 <sup>15</sup> N loss ratio (%)
	氮含量(%) N content	<sup>15</sup> N 丰度(%) <sup>15</sup> N atom abundance	氮含量(%) N content	<sup>15</sup> N 丰度(%) <sup>15</sup> N atom abundance		
0	2.20 c	6.35 a	1.30 c	6.37 a	29.1 b	15.2 b
40	3.21 b	4.60 b	2.20 b	3.90 b	22.2 c	11.6 c
80	3.35 ab	4.45 b	2.50 ab	3.30 c	39.3 a	20.5 a
160	3.52 a	4.10 c	2.58 ab	2.86 c	42.6 a	22.3 a
CK <sup>1)</sup>	3.60 a	6.40 a	2.80 a	6.38 a		

注 (Note): 1) 为处理前 Before treatment; 表中不同字母表示处理间差异达到 5% 显著水平 Different letters indicated significant difference among treatments at 5% level.

### 2.3 不同生长期对水稻植株氮损失的影响

植物营养具有阶段性,植物各组织也具有生命

周期,其生理衰老直接影响植物体内养分的代谢过程。为了研究水稻营养阶段性对植株氮损失的影响

响,将在 $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (N 80 mg/L)营养液中分别培养 3、5、7、9 周的水稻植株转入 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (N 80 mg/L)溶液中培养 10 d,计算各生长阶段 $^{15}\text{N}$ 的损失率。图 2 看出, $^{15}\text{N}$ 损失率随着生长阶段的推移显著增加,植物氮损失与植物的生长阶段有关,这一结果与王朝辉等<sup>[7]</sup>、黄见良等<sup>[8]</sup>研究结果一致,生理衰老促进水稻植株氮的损失。

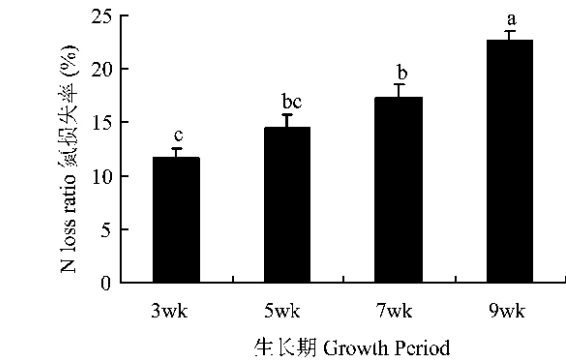


图 2 不同生长期的水稻植株氮损失率

Fig.2 N loss ratio of rice plant in the different growth periods

### 2.4 不同氮水平对水稻叶片铵态氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )含量的影响

水稻通过植株损失的氮为 10%~22%。铵态氮的挥发是植物氮损失的重要途径,植物组织中氮的形态直接与氮的挥发有关<sup>[10-13]</sup>。为了探讨影响植株氮损失的因素,对不同氮水平下水稻植株中铵态氮进行了测定。结果表明(图 3),随着供氮水平的增加,叶片及根中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著增加,而且叶片中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量高于根中。供氮水平与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量呈显著正相关( $R_{\text{叶}}^2 = 0.9719^{**}$ ,  $R_{\text{根}}^2 = 0.9711^{**}$ )。因此,植株叶片中铵浓度的增加为氮通过气孔溢出而导致氮损失的增加提供了可能。

### 2.5 不同氮水平对叶片转氨酶活性的影响

植物吸收氮的形态包括 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,吸收的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 通过同化为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 被植物组织所利用。过量 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在植物体内的累积会伤害植物生长, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的同化有利于减少 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的累积。植物通过转氨酶将 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 合成为蛋白质而有效利用。谷草转氨酶(GOT)是植物体内重要的转氨酶,它能促进铵的同化,减少游离氨及其毒害。图 4 结果表明,随着供氮水平的提高,水稻叶片谷草转氨酶活性增加,从而促进铵的同化。但过量供氮(N 160 mg/L),谷草转氨酶活性比适量供氮(N 80 mg/L)

下降。

### 2.6 不同氮水平对水稻叶片汁液 pH 的影响

氮挥发是植物氮损失的重要途径,而氮挥发直接受环境 pH 影响,较高的 pH 加速氮的挥发。同时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量又直接影响 pH。图 5 表明,随着供氮水平的增加,叶片 pH 从 6.25 增加到 6.64。叶片

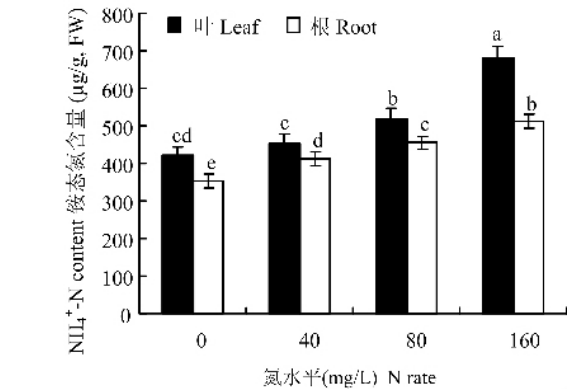


图 3 不同氮水平对水稻 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的影响

Fig.3 Effect of different N rates on  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  content of rice

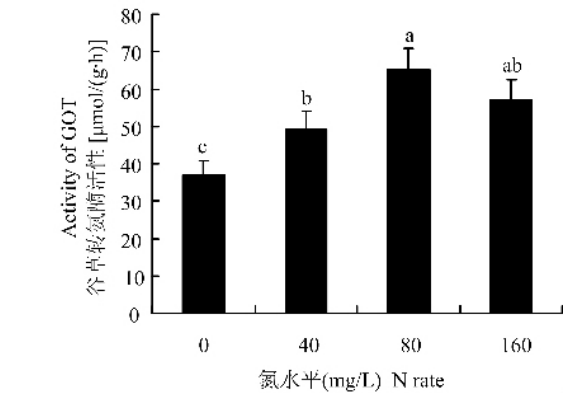


图 4 不同氮水平对水稻叶片谷草转氨酶活性的影响

Fig.4 Effect of different N rates on activity of GOT of rice

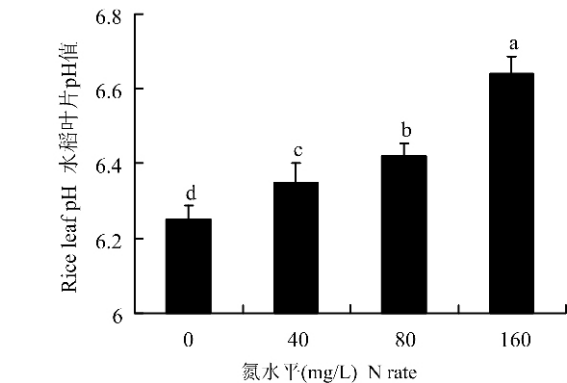


图 5 不同氮水平对水稻叶片 pH 值的影响

Fig.5 Effect of different N rates on rice leaf pH

pH 与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量呈显著正相关(  $R^2 = 0.9785^{**}$  ),说明叶片组织 pH 的增加进一步促进了植物氮的损失过程。

### 3 讨论

#### 3.1 $^{15}\text{N}$ 估计植物氮损失

植物氮损失是植物生长过程中的普遍现象。气态损失是植物氮损失的基本途径,主要通过氨挥发及  $\text{NO}_x$  化合物损失<sup>[15-18]</sup>。在植物氮损失研究中,通常需要采取特殊措施对植物生长环境进行处理,同时也很难同时准确计算  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  及  $\text{NO}_x$  损失量。本研究采用 $^{15}\text{N}$  标记的方法,通过计算 $^{15}\text{N}$  的损失估计植物氮损失量及损失率,可以克服水稻生长环境对植物生长的影响,同时避免了对不同形态氮损失的估计。此外,在对水稻进行一定时间的 $^{15}\text{N}$  供应后转入正常氮溶液,以 $^{15}\text{N}$  计算植物氮的净损失率,能较好地反映植物氮损失量。

#### 3.2 氮水平与水稻氮损失量

植物吸收氮的多少与氮的供应密切相关。不同生长阶段的植株由于生理年龄的差异,植物组织结构的完整性也存在差异<sup>[19-20]</sup>。肥料利用率的高低与氮肥用量密切相关,过量供氮是降低氮肥利用率的重要因素之一,而氮损失可能是导致氮肥利用率降低的主要原因。通过研究在溶液培养条件下不同供氮水平对水稻植株氮损失及水稻不同生长阶段植株氮损失,发现水稻植株氮的损失与水稻的生长时期是密切关联的(表 1,图 2)。本试验研究看出,通过水稻植株损失的氮占植株吸收氮的 11%~22%,这与黄见良等<sup>[8]</sup>的研究结果一致。植物氮损失的量可以通过适当的技术措施减少,如调节供氮量是减少植物氮损失、提高氮肥利用率的有效措施(表 1);调节作物生长环境,选择恰当栽培方式,促进植物生长,延缓植株衰老也可以提高氮肥利用效率。由于植物氮的损失是普遍存在的现象,在计算氮肥利用效率时应该考虑植物损失的氮,因为这部分氮实际上已被植物吸收利用,而在现有的肥料利用率计算中没有包括植物损失的这部分氮。

#### 3.3 影响植物氮损失的因素

现有研究证明,植物氮损失普遍存在,主要通过气态损失,包括氨及  $\text{NO}_x$  的扩散,其中氨的挥发是植物氮主要的损失途径。因此,植物组织中氮的存在形态直接影响氮的损失。植物组织中氮的形态与供氮量密切相关,供氮水平与组织中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量呈正相关(  $R^2 = 0.971^{**}$  ),而  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量与其同化速

率有关。转氨酶可以促进  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  向蛋白质等的转化,减少  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  在植株组织中的累积;而  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的挥发与 pH 密切相关,增加 pH 会促进  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  挥发,提高植物氮的损失。本研究结果表明,水稻叶片 pH 与供氮水平呈显著正相关(  $R^2 = 0.9939^{**}$  ),增加叶片  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量及 pH 都能促进水稻氮损失率(表 1,图 3,图 5)。表明植物组织中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的累积及 pH 升高是增加水稻植物氮损失的重要原因。适当调节氮肥用量,减少组织中铵的含量有利于提高氮的利用效率。通过适当技术,增加植物组织的缓冲能力,稳定组织中的 pH 在一定程度上也能降低植物组织氮的损失。

总之,水稻植株氮损失是不可避免的,但氮损失量可以调节与控制。试验证明,氮肥用量、水稻的生长阶段、水稻植株组织中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量与 pH 都会影响水稻植株的氮损失量。

### 参 考 文 献:

- [1] Fischer K S. Toward increasing nutrient use efficiency in rice cropping systems: the next generation of technology [J]. Field Crops Res., 1998, 56: 1-6.
- [2] 朱兆良,文启孝. 中国土壤氮素 [M]. 南京:江苏科学技术出版社,1992.  
Zhu Z L, Wen Q X. Chinese soil nitrogen [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992.
- [3] Hauck R D. Slow release and bioinhibitor amended nitrogen fertilizers [A]. Engelstad O R (ed.). Fertilizer technology and use (3rd ed.) [M]. Madison WI: SSSA., 1985. 293-322.
- [4] 王福钧,彭根元,兰林旺,等.应用 $^{15}\text{N}$  示踪技术研究水稻吸收肥料氮的动态及不同时期追施氮肥的作用 [J]. 中国农业科学, 1981, 14(4): 66-71.  
Wang F J, Peng G Y, Lan L W *et al.* Studies on the process of fertilizer-N absorption in rice plant by using isotope  $^{15}\text{N}$  and on the effect of the application of N-fertilizer [J]. Sci. Agric. Sin., 1981, 14(4): 66-71.
- [5] Farquhar G D, Wetselaar R, Firth P M. Ammonia volatilization from senescing leaves of maize [J]. Science, 1979, 203: 1257-1258.
- [6] Metstelar R L, Farquhar G D. Losses of nitrogen from the tops of plants [J]. Agron. J., 1980, 33: 263-302.
- [7] 王朝辉,田霄鸿,李生秀. 冬小麦生长后期地上部分氮素的氮挥发损失 [J]. 作物学报, 2001, 27(1): 1-6.  
Wang Z H, Tian X H, Li S X. Nitrogen losses from winter wheat plant by  $\text{NH}_3$  volatilization in late growing stage [J]. Acta Agron. Sin., 2001, 27(1): 1-6.
- [8] 黄见良,邵应斌,彭少兵, Buresh R J. 水稻对氮素的吸收、分配及其在组织中的挥发损失 [J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(6): 579-583.  
Huang J L, Zou Y B, Peng S B, Buresh R J. Nitrogen uptake, distri-

bution by rice and its losses from plant tissues[ J ]. Plant Nutr. Fert. Sci. , 2004 , 10( 6 ) : 579-583.

[ 9 ] 李生秀 , 李宗让 , 田霄鸿 , 王朝辉 . 植物地上部分氮素的挥发损失[ J ]. 植物营养与肥料学报 , 1995 , 1( 2 ) : 18-25.

Li S X , Li Z R , Tian X H , Wang Z H . Nitrogen loss from above-ground plants by volatilization[ J ]. Plant Nutr. Fert. Sci. , 1995 , 1( 2 ) : 18-25.

[ 10 ] 李生秀 . 植物体氮素的挥发损失 I. 小麦生长后期地上部分氮素的损失[ J ]. 西北农业大学学报 , 1992 , 20( 增刊 ) : 1-6.

Li S X . Nitrogen loss from plants by volatilization I. Nitrogen loss from aboveground parts of wheat during later period of growth[ J ]. J. Northwest Agric. Univ. , 1992 , 20( Suppl. ) : 1-6.

[ 11 ] 李生秀 , 常青 , 何琳 . 植物体氮素的挥发损失 II. 植物收获期地上部分氮素减少与土壤、作物和肥料供应的关系[ J ]. 西北农业大学学报 , 1992 , 20( 增刊 ) : 7-11.

Li S X , Chang Q , He L . Nitrogen loss from plants by volatilization I. The relationships among nitrogen reduction from above-ground plants at maturity and soils , crops as well fertilization[ J ]. J. Northwest Agric. Univ. , 1992 , 20( Suppl. ) : 7-11.

[ 12 ] 李宗让 , 李生秀 . 植物体氮素的挥发损失 III. 大豆生长过程中氨的挥发[ J ]. 西北农业大学学报 , 1992 , 20( 增刊 ) : 12-17.

Li Z R , Li S X . Nitrogen loss from plants by volatilization III. Ammonia loss from soybean during its growth[ J ]. J. Northwest Agric. Univ. , 1992 , 20( Suppl. ) : 12-17.

[ 13 ] 田霄鸿 , 李生秀 . 植物体氮素的挥发损失 IV. 玉米生长过程中挥发损失的氮素[ J ]. 西北农业大学学报 , 1992 , 20( 增刊 ) : 18-24.

Tian X H , Li S X . Nitrogen loss from plants by volatilization IV. Nitrogen loss from maize during growth[ J ]. J. Northwest Agric. Univ. , 1992 , 20( Suppl. ) : 18-24.

[ 14 ] Searle P L . The berthelot or indophenol reaction and its use in the analytical chemistry of nitrogen[ J ]. Analyst , 1984 , 109 : 549-568.

[ 15 ] Hutchinson G L , Mosier A R . Nitrous oxide emissions from an irrigated cornfield[ J ]. Science , 1979 , 205 : 1125-1127.

[ 16 ] Tanaka A , Navasero S A . Loss of nitrogen from the rice plant through rain or dew[ J ]. Soil Sci. Plant Nutr. , 1964 , 10( 1 ) : 36-39.

[ 17 ] Weiland R T , Stutte C A . Oxygen influence on foliar nitrogen loss from soybean and sorghum plants[ J ]. Ann Bot. , 1985 , 55 : 279-282.

[ 18 ] Silva P K E da , Stutte C A . Loss of gaseous N from rice leaves with transpiration[ J ]. Ark. Farm Res. , 1979 , 28 : 3.

[ 19 ] Lon S , Chen N C , Chishaki N , Inanaga S . Behavior of nitrogen absorbed at different growth stages of rice plants[ J ]. Ecol. Environ. , 2005 , 14( 4 ) : 567-573.

[ 20 ] 朱兆良 . 农田中氮肥的损失与对策[ J ]. 土壤与环境 , 2000 , 9( 1 ) : 1-6.

Zhu Z L . Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[ J ]. Soil Environ. Sci. , 2000 , 9( 1 ) : 1-6.