

## 根区一次施氮提高水稻氮肥利用效率的效果和原理<sup>①</sup>

刘晓伟<sup>1,2</sup>, 陈小琴<sup>1</sup>, 王火焰<sup>1\*</sup>, 卢殿君<sup>1</sup>, 周健民<sup>1</sup>, 陈照明<sup>1,2</sup>, 朱德进<sup>3</sup>

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049;

3 江苏省泰州市姜堰区耕地质量保护站, 江苏泰州 225300)

**摘要:** 我国水稻氮肥施用量大, 农民习惯氮肥表面撒施, 氮肥通过氨挥发以及径流等途径损失严重, 造成经济损失和环境污染。农村劳动力缺乏, 土地流转迅速, 省时省力、节肥高效的施肥方式亟待探索和推广。大田条件下, 在环太湖水稻高施氮区, 比较常规氮肥用量下( $225 \text{ kg}/\text{hm}^2$ )的农民习惯分次施用(40% : 30% : 30% 分次施用)与根区一次施用(偏根系 5 cm, 土表下 10 cm 穴施)两种施肥方式对水稻产量及氮肥利用率的影响。结果表明不种植水稻的前提下, 习惯施氮处理表层土壤  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  最高, 自表层向下逐渐降低, 各层养分均随时间推移而下降。根区一次施氮可显著提高施肥点周围土壤中的  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  含量及其贮存时间, 施肥后 30, 60 和 90 d, 根区施氮处理  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  最高值分别达到 542.6, 412.1 和 39.8 mg/kg。且根区一次施氮处理施肥点周围土壤高  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  含量至少可保持 60 d。种植水稻后, 相对习惯分次施氮而言, 根区一次施氮显著提高水稻分蘖数、各器官的氮含量、氮积累量及氮肥利用效率。根区一次施氮处理水稻氮积累量高达  $196.7 \text{ kg}/\text{hm}^2$ , 相对习惯施氮增加 34.9%。氮肥表观利用率分别达到 59.8%(差值法)和 42.5%( $^{15}\text{N}$  标记法), 相对习惯施肥分别增加 22.6 和 30.6 个百分点。肥料氮损失由分次施用的 73.0% 下降到 29.7%。根区一次施氮显著增加肥料养分在土壤中的贮存时间, 降低肥料养分损失的风险, 提高水稻氮肥利用效率, 是一种节肥高效的施肥方式, 值得进一步研发施肥机械和推广应用。

**关键词:** 尿素; 水稻; 根区施肥; 氮肥利用率

中图分类号: S511.071.01

文献标识码: A

水稻是我国主要的粮食作物, 全国 50% 以上的人口将其作为主食。氮肥的施用对于水稻产量的贡献高达 40%<sup>[1]</sup>。所以为获得高产, 农民常常过量施用氮肥。当前我国水稻的农民习惯施肥方式仍然以基肥加后期追肥为主。城镇化的发展导致我国农村劳动力多以老年人为主, 施肥方式显得更为粗放。而农民习惯施肥方式下过量的氮肥追施在土壤表面, 会导致氮肥通过氨挥发和径流等途径损失, 降低了氮肥的利用效率<sup>[2]</sup>。故发展和推广节肥、高效的施肥方式迫在眉睫。为节省后期追肥的劳动力投入, 部分学者建议施用包膜肥料, 以达到降低氮肥损失和提高肥料利用率的目的<sup>[3]</sup>。符建荣<sup>[4]</sup>研究表明控释尿素相对尿素和硫酸铵可使得水稻增产 4% ~ 23%, 氮素利用效率也显著提高。但是控释氮肥的施用效果受到水分和光热等因素影响较大, 而且价格高于传统氮肥, 农民接受度不高。

前氮后移等措施虽然可有效提高氮肥利用效率, 但是追肥需要人工的投入, 在农村劳动力缺乏的前提下显得推广优势不足<sup>[5]</sup>。贺帆等<sup>[6]</sup>通过实时监测水稻叶片 SPAD 值而确定水稻氮肥用量的精准施肥, 可显著提高水稻产量和降低氮肥用量, 然而其操作需要具备一定的专业知识和设备, 对于我国小农户经营的现状推广又略有难度。常规施肥方式下, 撒在土壤表面的基肥或追肥, 其溶解后的肥料养分相对于扩散进入深层的土壤而言, 其更易在田面水层通过氨挥发和径流等途径损失掉。嘉兴地区稻田的氮肥表面撒施后, 有 14% ~ 50% 的氮肥通过不同途径损失掉, 其中氨挥发损失的比例约占 14%<sup>[7]</sup>。其他学者的研究也表明我国稻田氮肥损失高达 30%<sup>[8]</sup>。另一方面水稻根系所吸收的氮素主要靠截获途径, 水稻对于氮养分的吸收受制于根系与土壤的接触面积。研究表明在水稻旺长期,

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200108)、江苏省自然科学青年基金(BK20161093)、南京土壤研究所一三五计划重点项目培育方向四(ISSASIP1649)项目和国家自然科学基金项目(41271309)资助。

\* 通讯作者(hywang@issas.ac.cn)

作者简介: 刘晓伟(1986—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士研究生, 研究方向为作物营养与水稻根区施肥技术。E-mail: xwliu@issas.ac.cn

根际 1~3 mm 的土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 含量会出现亏缺<sup>[9]</sup>。氮肥水解后形成的  $\text{NH}_4^+$ -N 在土壤中扩散速度和距离也会受到土壤理化性状以及施肥深度等条件的影响<sup>[10]</sup>。所以不当的施肥措施会导致肥料养分无法快速到达水稻根系活跃吸收区，使得肥料养分的扩散与水稻养分的吸收不匹配，造成肥料的损失和低效利用。水稻吸收的大部分养分来自于与根系接触的土体，即水稻根区。通过改变施肥方式，将肥料一次性施用在水稻根系的活跃生长区域，使得肥料养分的缓慢释放与水稻的养分吸收相互匹配，则可以达到降低养分损失、提高肥料利用率的目的<sup>[10]</sup>。本文以环太湖高氮肥投入区的单季稻为例，探索稻田根区一次施氮方式下肥料养分的扩散规律，以及不同施氮方式下水稻产量和养分吸收利用的反应，以期对水稻根区一次施氮技术的推广以及配套的施肥机械的研制提供理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验在安徽省宣城市广德县邱村镇进行 ( $114^{\circ}47'0168'E$ ,  $31^{\circ}02'6614'N$ )，土壤理化性状为：pH 6.5，有机质 17.4 g/kg，全氮 2.08 g/kg，有效磷 5.77 mg/kg，速效钾 88 mg/kg。土壤质地为中壤，颗粒组成为 2~0.05 mm 比例为 23%、0.05~0.002 mm 的比例为 64%、<0.002 mm 的比例为 13%，试验包括不同施氮方式的养分扩散规律和不同施氮方式对水稻生长的影响两部分。

### 1.2 试验设计

不同施氮方式下的养分扩散规律：试验于 2013 年开展，共设 3 种施氮方式：不施氮肥对照(CK)；

氮肥表面一次撒施(FFP)；根区施肥模式，即氮肥深 10 cm 穴施(RZF)。采用 PVC 板材的微区框(长 28 cm、宽 25 cm、高 35 cm，无上下面的长方体桶状)，在田间原位定期监测肥料养分的释放和扩散规律。具体操作过程为：在试验田中部挖 28 cm 长、25 cm 宽、20 cm 深的方形坑，底面挖平，放入微区框。将取出的土壤粉碎，混入磷、钾肥后倒回微区框内，此时微区框有 15 cm 高于土表，起到防串水的作用。随后施氮肥，FFP 处理为尿素均匀撒于土壤表面。RZF 处理为在微区框正中间用直径 1.5 cm 的金属棍钻 10 cm 深的洞，将尿素施于洞底，后覆土填平孔洞。施肥处理完成后试验田统一灌水。微区框内不种水稻，其他灌水及除草等农田管理措施与正常水稻一致。

施氮方式对水稻生长及氮肥利用率的影响：试验

于 2014 年同一试验区开展，设与上述试验对应的 3 种施氮方式：不施氮肥对照(CK)；农民习惯分次施氮(FFP)，即 40% 用作基肥，30% 用作分蘖肥(移栽后 20 d)，30% 用作拔节肥(移栽后 50 d)；在水稻株间，偏根系 5 cm、深 10 cm 处根区一次施氮肥(RZF)。处理小区之间作 25 cm 宽、15 cm 高的田埂，埂上覆塑料膜防止串肥。农民习惯施肥的处理先撒入基肥，而后灌水耙田插秧。根区一次施肥的小区先少量灌水，使得小区内土壤为泥浆状且田面无流动水层，施用磷、钾肥并用耙子耙匀，而后按照既定的密度插秧，最后施氮肥：在水稻株距之间，距离一稻株 5 cm 处，用直径 1.5 cm 铁管钻 10 cm 深的洞，通过铁管内壁施入氮肥，待肥料落入底部后快速抽出铁管并压实孔洞。施肥结束后所有小区统一灌水。其后的农药喷洒等农事操作均站在小区外执行，以避免小区内的踩踏扰乱施肥位点。此外，除对照处理外，在施氮处理的小区中部选取 4 株水稻，用试验一中提到的无底 PVC 框围住，以  $^{15}\text{N}$  标记的尿素(丰度 10.15%，上海化工研究院制造)替代常规尿素来研究不同施肥方式下的肥料氮去向。小区面积 20  $\text{m}^2$ ，4 次重复，随机区组排列。水稻品种为武运粳 24 号，水稻行间距 25 cm × 18 cm，种植密度为 222 210 株/ $\text{hm}^2$ 。2014 年 5 月 10 日育苗，6 月 10 日移栽，每穴 2 株，7 月 1 日追施分蘖肥。8 月 2 日追拔节肥。10 月 10 日收获。

以上两个试验的施肥量统一为 N 225 kg/ $\text{hm}^2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  90 kg/ $\text{hm}^2$  和  $\text{K}_2\text{O}$  120 kg/ $\text{hm}^2$ ，肥源分别为尿素(N 46%)、过磷酸钙( $\text{P}_2\text{O}_5$  12%)和氯化钾( $\text{K}_2\text{O}$  60%)。

### 1.3 取样及测定方法

不同施氮方式下的养分扩散规律试验：分别于施肥后的 30、60 和 90 d，在微区框中心，用直径 2 cm 的土钻分层取土壤样品，每 2 cm 一个样品。取样前排干微区框内的水分，所取土壤鲜样经 2 mol/L 的 KCl 浸提后测定  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N<sup>[11]</sup>。

施氮方式对水稻生长及氮肥利用率的影响试验：只采集成熟期样品，水稻分为根系、秸秆和籽粒 3 部分。 $^{15}\text{N}$  标记水稻植株单独处理，收获后 PVC 框内 0~20 cm 的耕层土壤全部取出，风干混匀后测定肥料氮残留。植物全氮经  $\text{H}_2\text{SO}_4$ - $\text{H}_2\text{O}_2$  消煮后测定。土壤样品的  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N 以及植物样品的全氮均采用流动注射分析仪(瑞典 FIAstar5000)测定。植物以及土壤样品的  $^{15}\text{N}$  丰度采用 Flash-2000 Delta V Advantage 联用仪测定。

氮肥利用率的计算如下：

$$\text{氮肥利用率(差值法, \%)} = (\text{施肥区吸氮量} - \text{对照区吸氮量}) / \text{对照区吸氮量} \times 100\%$$

吸氮量)/施氮量  $\times 100$

氮肥利用率( $^{15}\text{N}$  标记法, %) = 氮标记植株的  $^{15}\text{N}$  吸收量/ $^{15}\text{N}$  投入量  $\times 100$

氮肥生理利用效率 = (施氮区产量 - 对照区产量)/(施氮区吸氮量 - 对照区吸氮量)

氮肥真实利用率(%) = 施肥区水稻吸收肥料的氮量/(施氮量 - 土壤残留氮量)  $\times 100$ <sup>[12]</sup>

氮肥来自肥料的比例(Ndff, %) = (植物  $^{15}\text{N}$  丰度 - 0.366%)/(肥料  $^{15}\text{N}$  丰度 - 0.366%)  $\times 100$

氮肥来自肥料的量(Ndff, kg/hm<sup>2</sup>) = 氮肥来自肥料的比例  $\times$  植物氮积累量/100

## 2 结果与分析

### 2.1 施氮方式对铵态氮扩散动态的影响

稻田淹水条件下土壤中的肥料养分主要以  $\text{NH}_4^+$ -N 的形态存在, 土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量很低且处理间差异不显著, 故数据未列出。尿素不同施用方式对于土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 含量影响显著(图 1)。不同施肥方式下土

壤的  $\text{NH}_4^+$ -N 含量均随着时间的推迟逐渐下降。施肥后 30 d 时, 表面撒施处理的  $\text{NH}_4^+$ -N 随着深度的增加逐渐降低, 最高值出现在 0 ~ 4 cm 的土壤表层, 为 186.9 mg/kg, 而后随着土壤深度的增加  $\text{NH}_4^+$ -N 含量在 15 ~ 16 cm 处降低至 81.5 mg/kg。然而根区施肥模式下的土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 却随深度增加而增加, 土壤表层  $\text{NH}_4^+$ -N 含量最低, 0 ~ 2 cm 仅为 56.7 mg/kg, 至土壤 15 cm 深度时达到最高 542.6 mg/kg, 比表面撒施处理的最高值高 221.4%, 比同深度撒施处理  $\text{NH}_4^+$ -N 含量高 569.1%。施肥后 60 d, 各处理  $\text{NH}_4^+$ -N 含量均有所降低, 表面撒施处理表层土壤的  $\text{NH}_4^+$ -N 降低到 88.3 mg/kg, 且土层越深  $\text{NH}_4^+$ -N 含量越低。然而根区施肥处理在 10 cm 施肥点处的  $\text{NH}_4^+$ -N 含量仍然高达 412.1 mg/kg, 是同期表面撒施处理最高值的 4.7 倍, 比同深度撒施处理的  $\text{NH}_4^+$ -N 含量高 578.0%。施肥后 90 d, 同一土层不同处理间的  $\text{NH}_4^+$ -N 含量差异缩小, 但是 6 cm 土层以下根区施肥处理的  $\text{NH}_4^+$ -N 含量仍然显著高于同深度的撒施处理。

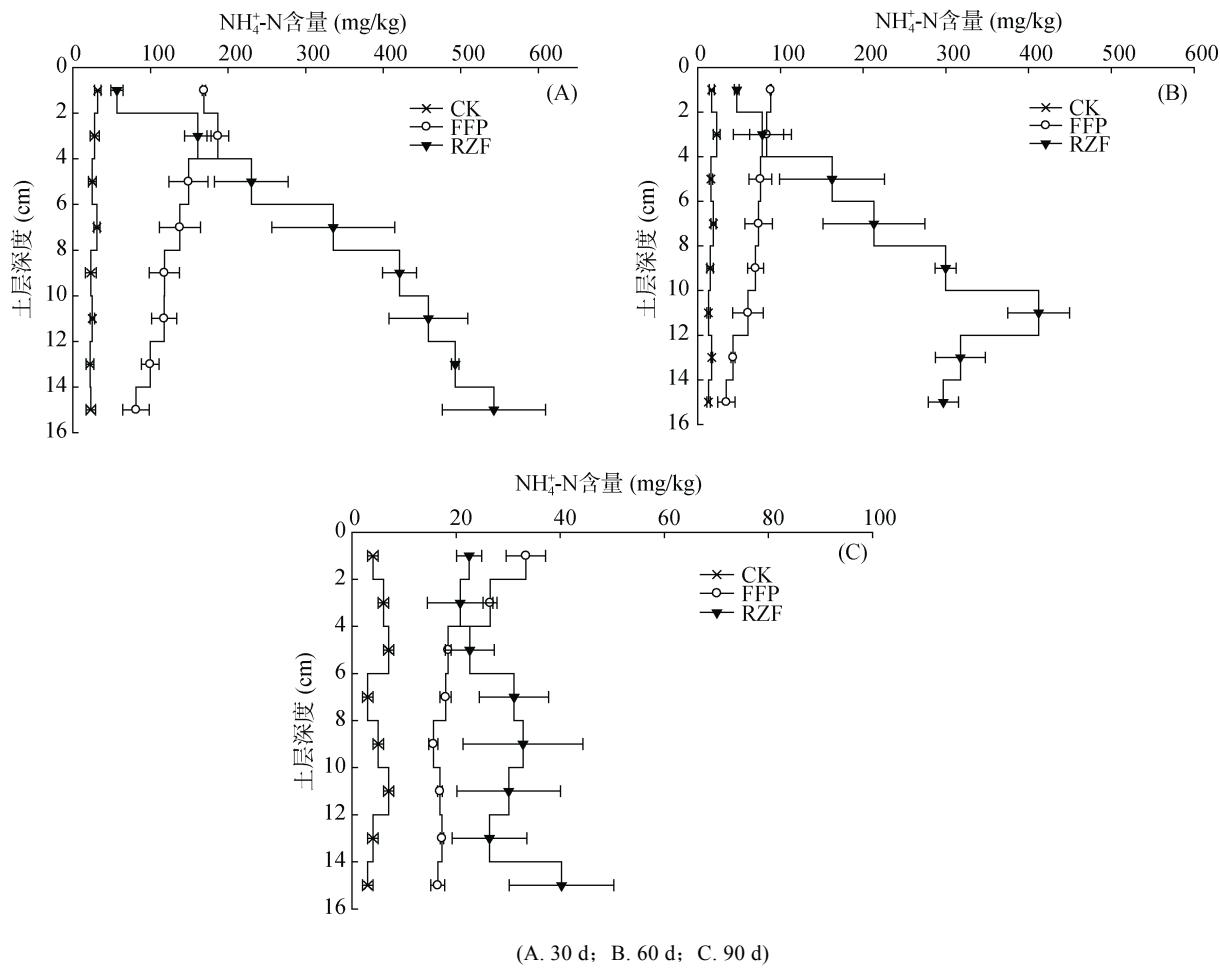


图 1 不同施肥方式下  $\text{NH}_4^+$ -N 扩散动态(不种水稻)

Fig.1 Dynamics of  $\text{NH}_4^+$ -N under different N fertilization methods (without rice)

## 2.2 施氮方式对水稻农学性状和干物质积累的影响

由表1结果可知，根区一次施氮显著增加水稻有效分蘖数，其相对常规分次施氮处理增加了25%。每穗粒数略有增加，但是相对常规施肥增加不显著。根

区一次施氮处理的千粒重则相对于常规分次施用，由27.4 g降低到24.3 g，降低了11.3%，差异显著。不同施氮方式对水稻产量的影响不显著，常规分次施氮与根区一次施氮处理的产量相差无几，但是根区一次施氮的秸秆干重相对常规的施氮方式显著增加6.5%。

表1 施氮方式对水稻农学性状及干物质的影响

Table 1 Effects of different N fertilization methods on agronomic characters and dry matter accumulation of rice

处理	有效分蘖(株)	每穗粒数	结实率(%)	千粒重(g)	籽粒干重(t/hm <sup>2</sup> )	秸秆干重(t/hm <sup>2</sup> )
CK	7 b	104 b	94.4 a	28.6 a	4.8 b	3.2 c
FFP	12 b	175 a	75.5 b	27.4 a	8.7 a	6.2 b
RZF	16 a	185 a	72.0 b	24.3 b	8.9 a	6.6 a

注：表中同列数据小写字母不同表示处理间差异显著( $P<0.05$ )，下表同。

## 2.3 施氮方式对水稻氮吸收的影响

根区一次施氮处理水稻各器官的氮含量均显著高于常规分次施氮处理(表2)。收获期根区一次施氮处理的根、秸秆和籽粒的氮含量分别为13.8、9.1和12.1 g/kg，相对分次施肥分别提高53.3%、40.6%和18.6%。不同器官的氮积累量与氮含量的变化一致，根区一次施氮处理的根、秸秆和籽粒的氮积累量相对分次施肥分别提高了63.9%、54.7%和20.5%。根区一次施氮处理的氮素总积累量高达196.7 kg/hm<sup>2</sup>，相对常规施

肥的145.8 kg/hm<sup>2</sup>提高了34.9%，差异显著。从<sup>15</sup>N标记的试验结果看，常规分次施氮处理不同器官仅有15.9%~18.7%的氮素来源于肥料，其大部分来自于土壤原有氮；而根区一次施氮处理各个器官来自肥料氮的比例高达45.0%~49.7%，相对常规分次施氮平均高了29.8个百分点。根区一次施氮处理水稻根、秸秆、籽粒和总氮积累中来自肥料的氮量分别达11.7、30.2、53.5和95.5 kg/hm<sup>2</sup>，分别是常规分次施肥的4.7、3.9、3.2和3.6倍，不同施氮方式间的差异达到显著水平。

表2 施氮方式对水稻氮吸收的影响

Table 2 Effects of different N fertilization method on N uptake of rice

处理	氮含量(g/kg)			氮积累量(kg/hm <sup>2</sup> )				来自肥料氮的比例(%)				来自肥料氮的量(kg/hm <sup>2</sup> )			
	根	秸秆	籽粒	根	秸秆	籽粒	总量	根	秸秆	籽粒	总量	根	秸秆	籽粒	总量
CK	6.4 c	4.9 c	8.3 c	7.3 c	15.3 c	39.5 c	62.1 c	—	—	—	—	—	—	—	—
FFP	9.1 b	6.5 b	10.2 b	15.8 b	40.8 b	89.2 b	145.8 b	15.9 b	18.7 b	18.6 b	18.4 b	2.5 b	7.7 b	16.7 b	26.9 b
RZF	13.8 a	9.1 a	12.1 a	25.9 a	63.1 a	107.5 a	196.7 a	45.0 a	47.9 a	49.7 a	48.6 a	11.7 a	30.2 a	53.5 a	95.5 a

## 2.4 不同施氮方式的氮去向及氮肥利用率

从氮肥施入土壤后的养分去向看(表3)，不同的施氮方式显著改变了肥料氮的分配规律。根区一次施氮处理的水稻吸收和耕层土壤残留相对常规分次施氮处理分别高68.6 kg/hm<sup>2</sup>和28.7 kg/hm<sup>2</sup>，本试验并未测得的其他部分(主要有氨挥发、地表流失和亚耕层的渗漏)的肥料氮量比常规分次施氮低97.4 kg/hm<sup>2</sup>，差异显著。常规分次施氮处理有73.0%的肥料氮通过氨挥发、径流等途径损失，而根区施氮处理这一部分的比例仅为29.7%。根区一次施氮处理通过差值法计算的氮肥利用率相对常规分次施氮处理，由37.2%增加到了59.8%，增加了22.6个百分点。通过<sup>15</sup>N标记法计算的氮肥利用率增幅更大，相对常规分次施氮处理的11.9%增加了30.6个百分点。根区一次施氮处理施入的肥料氮有62.5 kg/hm<sup>2</sup>残留耕层土壤，因为其还未被利用，我

们认为这部分是潜在的有效态氮素，故当季肥料利用率的计算应扣除本部分，即肥料真实利用率。根区一次施氮处理的肥料真实利用率高达58.8%，相对常规施肥的14.1%提高了44.7个百分点，差异极显著。根区一次施氮处理的氮肥生理利用率仅为30.6 kg/kg，相对常规分次施氮下降了35.3%，差异显著。

## 3 讨论

肥料释放的养分在土壤中的迁移特性直接关系到作物对其吸收和利用。当前对于肥料种类、土壤类型以及不同的环境条件对肥料养分迁移转化的影响等研究已见一些报道<sup>[13-15]</sup>。无论NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N还是NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N，其在土壤中运移都会受到土壤质地或温度、水分等外界条件的影响<sup>[9,17-18]</sup>。除了肥料种类对养分迁移的影响外，施肥方式的改变对养分扩散也起着至关重要的

表 3 肥料养分去向及氮肥利用率  
Table 3 N distribution and N use efficiency of fertilizer

处理	肥料氮去向 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )				比例 (%)			氮肥利用率(%)		氮肥真实利 用率(%)	氮肥生理利用 率( $\text{kg}/\text{kg}$ )
	总投入	水稻吸收	耕层土壤残留	其他	水稻吸收	耕层土壤残留	其他	差值法	$^{15}\text{N}$ 标记法		
FFP	225	26.9 b	33.8 b	164.3 a	12.0 b	15.0 b	73.0 a	37.2 b	11.9 b	14.1 b	47.3 a
RZF	225	95.5 a	62.5 a	66.9 b	42.4 a	27.8 a	29.7 b	59.8 a	42.5 a	58.8 a	30.6 b

注：其他即总量扣除水稻吸收及土壤残留后无法得知具体去向的部分。

作用。本文氮肥养分扩散试验设置在田间原位，除了不种水稻外，其他的光照和水热条件与大田一致，这种情况下得到的养分扩散结果相对更能体现肥料在特定土壤条件下的真实扩散规律，得到的数据更有代表性，可信度高。结果表明相对农民习惯的表面撒施，普通尿素集中深施大大降低了肥料养分在稻田的溶解和释放速度，施肥 30 d 后，根区施肥模式下，施肥位点周围土壤的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度高达 542.6 mg/kg(图 1)，显著高于表面撒施的处理。而其 0~4 cm 土层的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量却比较低，可知其养分并未向上扩散到土表，这样会大大降低肥料经过土表损失的风险。施肥 60 d 后，施肥点周围的土壤仍然存有大量的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ (图 1)，可知在该试验条件下，尿素集中深施可将更多的肥料养分长时间地保存在施肥点周围的土壤中，能有效地降低肥料养分经地表径流和氨挥发损失的风险。而从  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的迁移方向上看，无论表面撒施还是深层集中施用，其受田间的水分运动影响均呈现向下层迁移的趋势，尤其是 10 cm 深施处理在 30 d 时  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的含量在 14~16 cm 深处最高。本文结果与张朝等<sup>[19]</sup>研究基本一致，其在水稻土的室内培养试验中发现，高施氮量情况下肥料释放的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  迁移主要发生在 0~5 cm 土层内。普通尿素集中施用显著增加了施肥点周围土壤的养分浓度和养分残留的时间。本文尿素集中深施 60 d 后，其下层土壤的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量仍然很高，最高值达到 412.1 mg/kg，而常规表面撒施的处理仅为 60.8 mg/kg。然而到 90 d 时，不同施氮处理间的差异却变得很小，这主要是由于该年 8—10 月南方地区遭遇严重的旱情，本试验微区框内的水分蒸发殆尽、土层干裂，这可能会导致深层残留的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  挥发损失掉。故推测若没遇到干旱的情况，集中施用处理的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  存留时间应该会更长一些。虽然本试验最初填入了 20 cm 厚度的土壤，但是灌水后土壤逐渐淀积，施肥后 30 d 时耕层土壤仅 16 cm 左右的厚度，下面形成了坚硬的犁底层，所以养分扩散的土壤取样只取到了 16 cm 的深度。30 d 时根区施肥处理在 16 cm 深处  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的含量最高，虽然这有效地降低了肥料通过表层挥发和径流的损

失，但是在耕层-亚耕层交界处保持较高的肥料氮，也可能面临淋洗损失的风险，这方面的数据值得进一步深入挖掘。

前人研究表明水稻前期供应充足的氮肥有助于提高分蘖数<sup>[20]</sup>，本文根区施肥处理水稻有效分蘖显著高于常规的分次施用，结合养分扩散试验的结果(图 1)，可知这种施肥方式在水稻生长前期的供氮能力要好于常规的分次施肥。水稻分蘖通常与千粒重呈负相关关系<sup>[21]</sup>，根区一次施氮虽然增加了水稻的有效分蘖数，但是其千粒重相对有所降低，所以其产量与常规分次施氮相比并无明显的差异(表 1)。水稻分蘖期的吸氮量较小，拔节期吸氮量大<sup>[7]</sup>。根区一次施氮可在水稻需氮量较小的生长期将更多的养分保存在土壤中不损失(图 1)，进而在水稻需氮高峰期能及时满足水稻对氮素的吸收，从而能增加水稻各器官的氮吸收(表 2)。根区施氮处理水稻的氮积累量是常规分次施氮的 1.35 倍。 $^{15}\text{N}$  标记的结果显示根区施氮处理水稻吸收的氮素几乎一半来自于肥料氮，平均是常规分次施氮处理(仅有 15%~19% 来自于肥料，表 2)的 2.6 倍，更直接地证明了该施肥方式可显著促进水稻对当季氮肥的吸收。此外，从肥料在土壤-作物系统的分配结果看，根区一次施肥的优势还在于提高肥料氮在耕层土壤的残留(相对常规分次施肥提高了 92.9%，表 3)和降低肥料氮的损失(相对常规分次施肥降低了 59.3%，表 3)，全面阐明了施肥方式对于调控肥料养分吸收利用的重要作用。也正是因为根区施肥显著促进了水稻对肥料氮的吸收以及降低了肥料氮损失，所以无论是差值法、 $^{15}\text{N}$  标记法计算的氮肥利用率，还是氮肥真实利用率，根区一次施氮处理均显著高于常规的分次施氮(表 3)。关于如何提高水稻的氮肥利用率的研究较多，现有研究结果表明，前氮后移、分次施氮以及以 SPAD 值来确定施氮量等养分管理措施对于提高氮肥利用率有一定的效果<sup>[4-6]</sup>。但是如果改变氮肥表面撒施的施用方式，肥料养分仍然面临较大损失的风险，所以这些措施提高肥料利用率的空间还是有限的<sup>[10]</sup>。本文表 3 结果显示在水稻收获后，根区施氮相对常规施氮处理仍有大量的肥料氮

残留在耕层土壤中,这部分养分可能会有利于后季作物的吸收利用。当然,由于水稻之后为小麦旱作,耕层土壤残留的养分在小麦季的贡献如何,其在两季作物间隔期间会有多大的损失值得进一步研究。因为考虑到稻田有坚硬的犁底层,本试验只测定了稻田0~20 cm 耕层土壤的<sup>15</sup>N 含量,并未涉及更深的土层,所以本文的氮肥土壤残留量要低于真实残留量,应该还有少部分的肥料氮素随水迁移到更深层土壤中,这部分养分的比例在后续的研究中也值得关注<sup>[17]</sup>。前人研究结果显示,氮肥深施可以显著降低肥料氨挥发的损失,尤其在水田中深施氮肥效果更是显著。Rochette 等<sup>[22]</sup>研究表明,施肥深度大于 7.5 cm 后基本没有氨挥发产生。结合本文扩散试验的结果(图 1),我们推测根区一次施氮处理的氨挥发损失量应该也很低。但是<sup>15</sup>N 示踪的结果表明该处理的“其他”部分所占比例占 29.7%(表 3)。因为水稻根系分泌的氧气可在根际创造有氧环境,利于硝化-反硝化过程的发生<sup>[23]</sup>。本文氮肥根区集中施用后水稻根系周围的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度很高,这可能更有利肥料氮通过硝化-反硝化途径损失掉。所以水稻根区施肥下肥料的损失途径和比例值得进一步研究。结合张朝等<sup>[19]</sup>对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 迁移距离(5 cm 左右)的研究结果,我们前期以 5 cm 为间隔做了一些预备试验。从预备试验结果看,根区施肥的位点对于水稻的生长有显著的影响。该土壤类型下氮肥偏 5 cm、深 10 cm 根区一次施用的效果较好。而施肥位点离水稻根系太近,高浓度的养分会导致烧苗,严重影响水稻后期的生长。所以针对具有不同吸附能力的土壤,应先通过筛选来确定最佳的施肥距离和深度。

王火焰和周健民<sup>[10,12]</sup>认为施肥残留在土壤中的肥料态氮既未损失也未被利用,其利用率只能在以后被消耗时进行测算,在计算肥料当季真实利用率时应该将其扣除,根据其提出的肥料真实利用率的计算方法,本文比较了不同方法下氮肥利用率的计算值。结果显示差值法计算的值要高于<sup>15</sup>N 标记法,可见该土壤条件下施氮肥具有正激发效应。而真实利用率只考虑当季被消耗的肥料养分的利用率,其计算结果与施肥方式造成的损失(即本文中的无法获得的“其他”部分养分)息息相关,所以对于肥料当季的养分利用率而言,这种计算方法更能直接反映肥料养分损失的情况。根区一次施氮虽然显著提高了水稻对于肥料氮的吸收,但是其生理利用率却很低(表 3),即其多吸收的氮素多积累于营养器官中,而并未高效地提高籽粒产量(表 1),可能改变施肥方式对于提高当地水稻

产量的潜力还是有限的。然而从水稻高氮素积累量以及高肥料氮残留量的数据看(表 1, 表 3),根区一次施氮的施肥方式有进一步降低氮肥用量的空间,这值得进一步试验验证。由于试验涉及的根区一次施肥方式均为人工操作完成,考虑到工作量(每穴水稻都单株施肥)和田间操作的复杂性(泥浆状土壤、精确的施肥位点),试验小区的面积布置得相对较小,故虽然是在大田条件下得到的试验数据,但是该施肥方式若要推广和应用,还有待进一步进行多年、多点、多品种的验证。目前肥料市场在售的氮肥以小颗粒尿素为主,其根区一次施肥过程中定量施用困难(如水解快、易粘在施肥器械的管壁上等),不利于机械操作。故稻田根区施肥方式的推广还要依靠水稻插秧施肥一体机的创新来实现。

## 4 结论

对水稻而言,将常规的分次施氮改为根下偏 5 cm、深 10 cm 根区一次施氮模式,可以延长肥料养分在土壤中的贮存时间,提高耕层土壤速效氮的养分含量,增加水稻对肥料氮的吸收,显著提高水稻的氮肥利用效率,降低了氮肥当季损失量。而针对水稻水田环境,仅靠人工来执行根区施肥,虽然一次施用降低追肥劳动力的投入,但是在施肥过程中比较耗时耗力,这种施肥方式的推广要依赖相关施肥机械的研发和应用。

## 参考文献 :

- [1] 朱德峰, 程式华, 张玉屏, 等. 全球水稻生产现状与制约因素分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(3): 474-479
- [2] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095-1103
- [3] 杜昌文, 周健民. 控释肥料的研制现状及其进展[J]. 土壤, 2002, 34(3): 127-133
- [4] 符建荣. 控释氮肥对水稻的增产效应及提高肥料利用率的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(2): 145-152
- [5] 李广宇, 彭显龙, 刘元英, 等. 前氮后移对寒地水稻产量和稻米品质的影响[J]. 东北农业大学学报, 2009, 40(3): 7-11
- [6] 贺帆, 黄见良, 崔克辉, 等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和稻米品质的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(1): 123-132
- [7] 李艳, 唐良梁, 陈义, 等. 施氮量对水稻氮素吸收、利用及损失的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(2): 392-397
- [8] 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

- [9] 钦绳武, 刘芷宇. 土壤 - 根系微区养分状况的研究 . 不同形态肥料氮素在根际的迁移规律[J]. 土壤学报, 1989, 26(2): 117–123
- [10] 王火焰, 周健民. 根区施肥——提高肥料养分利用效率和减少面源污染的关键和必需措施[J]. 土壤, 2013, 45(5): 785–790
- [11] 朱强, 马丽, 马强, 等. 不同浸提剂以及保存方法对土壤矿质氮测定的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(2): 138–143
- [12] 王火焰, 周健民. 肥料养分真实利用率计算与施肥策略 [J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 216–225
- [13] Maeda M, Zhao B Z, Ozaki Y, et al. Nitrate leaching in an andisol treated with different types of fertilizers[J]. Environmental Pollution, 2003, 121: 477–487
- [14] Wang C H, Wan S Q, Xing X R, et al. Temperature and soil moisture interactively affected soil net N mineralization in temperate grassland in Northern China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38: 1101–1110
- [15] Kim J H, Guo X J, Park H S. Comparison study of the effects of temperature and free ammonia concentration on nitrification and nitrite accumulation[J]. Process Biochemistry, 2008, 43: 154–160
- [16] Spalding R F, Watts D G, Schepers J S, et al. Controlling nitrate leaching in irrigated agriculture[J]. Journal of Environmental Quality, 2001, 30(4): 1184–1194
- [17] 周顺利, 张福锁, 王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈亏 . 夏玉米[J]. 生态学报, 2002, 22(1): 48–53
- [18] 施卫明, 徐梦熊, 刘芷宇. 土壤 - 植物根系微区养分状况的研究 . 电子探针制样方法的比较及其应用[J]. 土壤学报, 1987, 24(3): 286–290
- [19] 张朝, 车玉萍, 李忠佩. 水稻土模拟土柱中肥料氮素的迁移转化特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3236–3242
- [20] 李启红, 贺双明, 刘琼峰, 等. 氮肥不同基追比例对水稻产量和氮素吸收利用的影响[J]. 湖南农业科学, 2012 (13): 56–61
- [21] 陈周前, 李霞红, 陈翻身, 等. 氮肥对水稻分蘖及产量结构的影响[J]. 安徽农学通报, 2009, 15(6): 87–89
- [22] Rochette P, Angers D A, Chantigny M H, et al. Ammonia volatilization and nitrogen retention: How deep to incorporate urea? [J]. Journal of Environmental Quality, 2013, 42(6): 1635–1642
- [23] Zhou S, Sugawara S, Riya S, et al. Effect of infiltration rate on nitrogen dynamics in paddy soil after high-load nitrogen application containing  $^{15}\text{N}$  tracer[J]. Ecological Engineering, 2011, 37(5): 685–692

## Effects and Principle of Root-zone One-time N Fertilization on Enhancing Rice (*Oryza sativa* L.) N Use Efficiency

LIU Xiaowei<sup>1,2</sup>, CHEN Xiaoqin<sup>1</sup>, WANG Huoyan<sup>1\*</sup>, LU Dianjun<sup>1</sup>, ZHOU Jianmin<sup>1</sup>,  
CHEN Zhaoming<sup>1,2</sup>, ZHU Dejin<sup>3</sup>

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Quality of Cultivated Land Protection Station of Jiangyan District, Taizhou City, Taizhou, Jiangsu 225300, China)

**Abstract:** Large amount of N fertilizer is applied for rice production and most of it is broadcasted in soil surface under traditional farmer practice, resulting in severe N loss via ammonia volatilization and running off, causing economic losses and serious pollution threat to environment. Meanwhile labor shortage is increasingly prominent in rural area of China under the trend of the rapid land transfer, thus, an economic and efficient fertilization method is urgent to be explored and popularized. A 2-year field experiment was conducted in the high N input area around the Taihu lake to compare the effect farmer fertilizer practice (FFP, N fertilizer is broadcasted on soil surface and in 3 times evenly) and root-zone one-time fertilization (RZF, N fertilizer was once applied at 5 cm away and 10 cm depth from rice root) on the rice yield and N use efficiency under the traditional N rate (225 kg/hm<sup>2</sup>). The results showed that on the condition of without planting rice, the highest content of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N was appeared at soil surface of FFP. The NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N content decreased both with soil depth increased and with time delayed. While for RZF, the highest NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N content was appeared at the fertilization point, and the remained period of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N content of RZF was longer than that of FFP. The highest content of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N of RZF were 542.6, 412.1 and 39.8 mg/kg at 30, 60 and 90 d, respectively. The relative higher NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N concentration of RZF in fertilization site persisted at least 60 days. On the condition of planting rice, RZF significantly increased rice productive tiller number, N content of each organs, N accumulation and N use efficiency comparing with FFP. The highest N accumulation of RZF was 196.7 kg/hm<sup>2</sup>, which increased by 34.9% comparing with FFP. N use efficiency of RZFs were 59.8% (difference method) and 42.5% (<sup>15</sup>N labeled method), which increased by 22.6 and 30.6 percent points compared with FFP, respectively. RZF significantly reduced fertilizer N loss from 73.0% (FFP) to 29.7%. Root-zone fertilization can not only prolong the N duration in soil, decrease fertilizer-N losses, but also enhance rice uptake and N use efficiency. In general, RZF is a fertilizer-saved and high-efficient fertilization method, but it is worth developing and applying the special root-zone fertilization machinery.

**Key words:** Urea; Rice (*Oryza sativa* L.); Root-zone fertilization; N use efficiency