

## 淹水条件硝态氮和铵态氮配施对水稻生长与土壤养分的影响<sup>①</sup>

王晓琪<sup>1</sup>, 姚媛媛<sup>1</sup>, 陈宝成<sup>1\*</sup>, 杨越超<sup>1</sup>, 刘之广<sup>1</sup>, 朱家辉<sup>1</sup>, 周华敏<sup>1</sup>, 梁海<sup>1</sup>, 夏秋升<sup>1</sup>, 陈剑秋<sup>2</sup>

(1 山东农业大学资源与环境学院, 土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东泰安 271018; 2 养分资源高效开发与综合利用国家重点实验室, 山东临沭 276000)

**摘要:** 为系统研究硝态氮、铵态氮及二者不同配施比例对土壤养分供应与水稻生长情况的影响, 通过田间小区试验, 在相同施氮量条件下, 研究了单施硝态氮(N), 单施铵态氮(A), 硝态氮、铵态氮按 1:3(N1A3)、2:2(N2A2)、3:1(N3A1)比例配施对水稻产量、田间养分和氮素利用率的影响, 并与农民习惯性施肥方式(U)作比较。研究结果表明: 整个生育期内铵态氮对水稻的生长都起着主要作用, 铵态氮通过提高水稻氮素利用率和促进水稻有效分蘖的方式提高了水稻产量。随着铵态氮的配施比例由 25% 提高到 75%, 水稻的产量提高了 35.18%、氮素利用率提高了 46.67%, 每公顷产生的经济收益增加了 6 820.15 元。A 处理土壤中硝态氮、铵态氮和碱解氮的含量较 N 处理显著增加 36.41%、30.30% 和 8.42%, 水稻产量提高了 60.11%, 氮素利用率提高了 171.31%, 有效穗数增加了 52.31%, 相较农民习惯性施肥, 单施铵态氮处理每公顷还能增收 522.91 元。在 0~180 kg/hm<sup>2</sup> 的施氮量范围内, 水稻产量(y)与铵态氮施用量(x<sub>2</sub>)呈显著正相关, 二者之间关系为  $y = 18.044x_2 + 4943.4 (R^2 = 0.9753)$ 。

**关键词:** 氮素形态; 配施; 土壤养分含量; 水稻; 产量; 氮肥利用率

中图分类号: S146 文献标志码: A

### Effects of Combined Application of Nitrate and Ammonium on Rice Growth and Soil Nutrients Under Flooding Conditions

WANG Xiaoqi<sup>1</sup>, YAO Yuanyuan<sup>1</sup>, CHEN Baocheng<sup>1\*</sup>, YANG Yuechao<sup>1</sup>, LIU Zhiguang<sup>1</sup>, ZHU Jiahui<sup>1</sup>, ZHOU Huamin<sup>1</sup>, LIANG Hai<sup>1</sup>, XIA Qiusheng<sup>1</sup>, CHEN Jianqiu<sup>2</sup>

(1 National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer, College of Resource and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China; 2 State Key Laboratory of Nutrition Resources Integrated Utilization, Shandong Kingenta Ecological Engineering Co., Ltd., Linshu, Shandong 276000, China)

**Abstract:** A field plot experiment at the same nitrogen application rate was carried out to study the effects of different nitrogen forms and ratio (treatment N: nitrate nitrogen only, treatment A: ammonium nitrogen only, nitrate and ammonium nitrogen mixed at the ratio of 1:3, 2:2, 3:1, treatment N1A3, N2A2 and N3A1, respectively) on rice yield, yield factors, soil nutrients and nitrogen use efficiency, with the conventional fertilization (treatment U, farmer habitual fertilization) as CK. Results showed that ammonium nitrogen played a major role in rice growth during the whole growth period of rice, ammonium nitrogen increased nitrogen use efficiency and promoted the effective rice tillering. With the proportion of ammonium nitrogen applied from 25% to 75%, rice yield increased by 35.18%, nitrogen utilization rate increased by 46.67%, and economic benefit per hectare increased by 6 820.15 yuan. After harvesting, compared with treatment N, treatment A increased soil nitrate nitrogen by 36.41%, ammonium nitrogen by 30.30%, hydrolyzable nitrogen by 8.42%, rice yield by 60.11%, nitrogen utilization rate by 171.31% and effective panicles by 52.31%, respectively. Compared with treatment U, treatment A increased economic benefit by 522.91 yuan per hectare. There was a significant positive correlation ( $y = 18.044x_2 + 4943.4, R^2 = 0.9753$ ) between rice yield (y) and ammonium nitrogen application ( $x_2$ ) within the application range of 0~180 kg/hm<sup>2</sup>.

**Key words:** Nitrogen form; Application ratio; Soil nutrients; Rice; Yield; Nitrogen use efficiency

<sup>①</sup>基金项目: 山东省水稻产业体系创新团队项目(SDAIT-17-04)和国家重点研发计划项目(2017YFD0200706)资助。

\* 通讯作者(bcch108205@163.com)

作者简介: 王晓琪(1991—), 男, 山东青岛人, 博士研究生, 主要从事肥料高效利用研究。E-mail: 18653883828@163.com

在我国粮食生产中,水稻占了极其重要的地位。2015年和2016年,我国水稻年平均播种面积为 $3.02 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ,占粮食播种面积的27%,平均总产为 $2.08 \times 10^8 \text{ t}$ ,占粮食总产的34%。水稻负担了我国60%以上人口的主食,并且这一数字还将呈进一步上升趋势,因此,水稻安全对于维护国家经济发展和社会稳定有着重要的战略意义<sup>[1-2]</sup>。氮是水稻生长和产量形成最重要的营养元素,对产量和品质起着关键作用<sup>[3]</sup>。明确水稻需氮类型、掌握水稻施氮比例,对于氮肥合理施用、水稻提质增量有着重要的现实意义。

水稻利用氮的形态主要有铵态氮和硝态氮,氮素形态很大程度上影响水稻的生长和对氮的吸收,合理施用氮肥对提高水稻产量十分重要<sup>[4-5]</sup>。以往的研究普遍认为水稻为喜铵作物,对于铵态氮的需求高于硝态氮<sup>[6-11]</sup>,但也有研究表明,虽然稻田土体中的无机氮以铵态氮为主,但水稻根系实际上是一直处于一种硝态氮、铵态氮混合营养之中,水稻根系的泌氧作用,使得水稻根际土壤存在较强的硝化作用<sup>[12]</sup>,铵态氮在根表或根际一旦氧化为硝态氮就会被水稻根系吸收进去<sup>[13]</sup>。不仅如此,大量的溶液培养试验表明,水稻在硝态氮、铵态氮1:1的营养液中生长状况最好,增硝营养效果明显<sup>[14-16]</sup>。

前人对水稻氮素形态的研究大多集中于实验室培养,硝态氮、铵态氮掺混比例也多为单一梯度。为进一步研究不同氮素形态在淹水条件下对水稻生长的影响,试验采用大田栽培的方式,通过单独施用硝态氮、铵态氮以及硝态氮、铵态氮按1:3、2:2、3:1比例掺混的方式,探究不同氮素形态配施对水稻生长发育和土壤养分含量的影响,以期探明硝态氮、铵态氮在水稻施肥上的最佳配比,为农民科学施肥、减少

氮素损失提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于2014年在济南市济阳县水稻科技示范基地进行(36°98'N, 117°22'E),属于暖温带大陆性季风气候。水稻种植的5—10月期间平均气温为26℃,平均降雨量为600 mm,试验用地毗邻黄河,灌溉充足,也是“黄河大米”的主要产区。供试土壤类型为黏壤质水稻土,其基本理化性状如下: pH 6.99(水土比5:1),有机质含量11.86 g/kg,全氮含量1.24 g/kg,有效磷含量24.30 mg/kg,速效钾含量80.57 mg/kg。供试水稻品种选用‘圣稻13’,属中晚熟常规粳稻,生育期为156 d。试验中的硝态氮全部由硝酸钙(N 15.5%)提供,铵态氮全部由氯化铵(N 25%)提供,其他供试肥料分别为普通尿素(N 46%)、过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 15.5%)、氯化钾(K<sub>2</sub>O 60%)。所有肥料均来自金正大生态工程集团股份有限公司。

### 1.2 试验设计

试验为大田小区试验,小区长为8 m,宽为2 m,小区内部划分为收产区和取样区两个子区。为保证各试验处理单独排灌,在各试验小区之间筑起宽30 cm、高30 cm的土埂,并在施肥前用塑料薄膜包裹严密,边缘深埋入土壤40 cm。试验共设7个处理(表1),重复3次,总计21个小区,各小区随机排列。6月25日撒施基肥,基肥施用方式为撒施后翻耕15 cm入土。施肥后进行灌溉,平整土地后插秧,水稻行距30 cm,株距16 cm,每墩4株水稻苗。整个生育期内水稻的灌溉、除草、病虫害防治等按常规高产栽培模式进行管理。各小区保持长期淹水状态,在水稻收获前15 d停止灌溉。

表1 试验处理及肥料施用情况  
Table 1 Fertilization under different treatments

处理	氮肥类型及配比	N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O(kg/hm <sup>2</sup> )	施肥方式
CK	不施氮肥	0-90-150	U处理氮肥基施60%,苗期、开花期各追施20%;其他处理
U	普通尿素	180-90-150	氮肥作为基肥一次性施入;所有处理磷钾肥都作基肥一次性施入
N	100% 硝态氮	180-90-150	
A	100% 铵态氮	180-90-150	
N1A3	25% 硝态氮, 75% 铵态氮	180-90-150	
N2A2	50% 硝态氮, 50% 铵态氮	180-90-150	
N3A1	75% 硝态氮, 25% 铵态氮	180-90-150	

### 1.3 样品采集及测定

分别于7月11日(苗期)、8月12日(拔节期)、9月7日(灌浆期)和10月6日(完熟期)进行样品的采集,土样和植株样的取样方法为三点取样法,并在

完熟期进行产量的测定。11月、12月对土壤和植株各项指标进行分析化验。

测定指标和方法为:土壤pH:5:1水土比, pH计测定;土壤硝态氮与铵态氮:0.01 mol/L氯化钙浸

提, AA3 流动注射分析仪测定; 土壤有机质: 重铬酸钾-硫酸加热氧化, 硫酸亚铁滴定; 土壤全氮: 浓硫酸消煮, Smartchem 200 连续流动注射分析仪测定; 土壤有效磷: 0.5 mol/L 碳酸氢钠(pH 8.5)浸提, Smartchem 200 连续流动注射分析仪测定; 土壤速效钾: 1 mol/L 醋酸铵(pH 7)浸提, 火焰光度计测定; 植株全氮:  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$  联合消化, 凯氏定氮法测定; 植株叶片 SPAD 值: SPAD-502 叶绿素仪(由日本 Minolta 公司生产)测定; 株高: 直尺测量; 产量: 实打实收、称重测产。

氮肥农学效率( $\text{kg}/\text{kg}$ )=(施氮区作物籽粒产量-对照区作物籽粒产量)/施氮量; 氮肥生理效率( $\text{kg}/\text{kg}$ )=(施氮区作物籽粒产量-对照区作物籽粒产量)/(施氮区地上部分吸氮量-对照区地上部分吸氮量); 氮肥利用率(%)=(施氮区地上部分吸氮量-对照区地上部分吸氮量)/施氮量  $\times 100$ ; 增产幅度(%)=(施氮区作物籽粒产量-对照区作物籽粒产量)/对照区作物籽粒产量<sup>[17-18]</sup>。

#### 1.4 数据分析

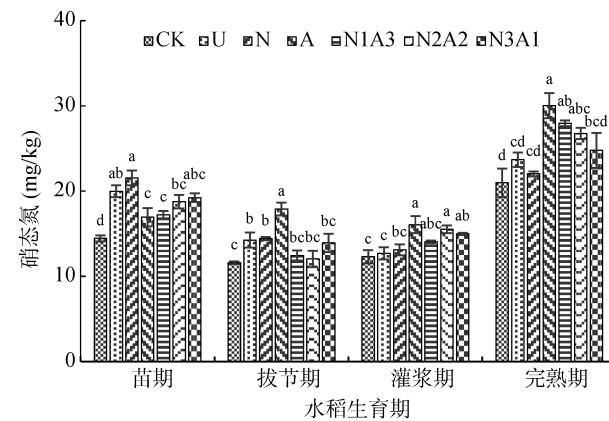
相关数据处理采用 Excel 2016 和 SAS 8.0 软件进行处理和统计分析, 通过 ANOVA 进行方差分析, 不同处理之间采用 Duncan's Multiple Range Test 方法检验各处理平均数在  $P<0.05$  水平的差异显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥处理对土壤硝态氮含量的影响

水稻整个生育期内土壤中的硝态氮含量呈现先降低后升高的趋势(图 1)。苗期各处理土壤中硝态氮含量与肥料中的硝态氮添加比例呈正相关, 其含量高低为处理 N > U > N3A1 > N2A2 > N1A3 > A > CK。水稻幼苗根系缺少硝酸还原酶<sup>[19]</sup>, 生育初期吸收硝态氮的速率较低, 土壤中大量硝态氮并不能很好地被水稻吸收, 容易造成氮素的浪费; 拔节期, A 处理有较高的硝态氮供应水平, 但其他施肥处理差异不显著; 待完熟期, 土壤中硝态氮含量为处理 A > N1A3 > N2A2 > N3A1 > U > N > CK, 能够发现, 硝态氮、铵态氮配施后随着铵态氮添加比例的增加, 土壤中硝态氮含量却逐渐增加, 说明前期施用的大量铵态氮会导致水稻中后期土壤硝态氮含量升高; 而前期硝态氮施用量的增加并不会导致后期土壤中硝态氮水平的提高。随着水稻的生长发育, 水稻体内硝酸还原酶活性会提高, 水稻对硝态氮的吸收速率也会逐渐加快<sup>[19]</sup>, 对硝态氮的需求也会增加, 由于施用铵态氮比硝态氮更能提高中后期土壤硝态氮含量, 因此, 铵态氮肥比硝态氮肥更能满足水稻对硝态氮的需求。整个生育期

A 处理的硝态氮供应水平都高于 U 处理。



(图柱上方小写字母不同表示同一生育期不同处理间差异达到  $P<0.05$  显著水平, 下图同)

图 1 水稻不同生育期土壤硝态氮含量  
Fig. 1 Soil  $\text{NO}_3^{\text{-}}\text{-N}$  contents in different growth stages of rice

### 2.2 不同施肥处理对土壤铵态氮含量的影响

水稻整个生育期内土壤中的铵态氮呈现先降低、后升高、再降低的趋势(图 2), 苗期土壤铵态氮含量为处理 U > A > N1A3 > N2A2 > N3A1 > N > CK, 随着铵态氮肥施用量的增加, 苗期土壤中铵态氮含量也逐渐增加。水稻苗期根部细胞色素氧化酶占优势, 对铵态氮的需求较多<sup>[20]</sup>, 铵态氮的吸收效率也高于硝态氮, 因此, 铵态氮是水稻苗期最需要的氮素类型<sup>[21]</sup>。U 处理和 A 处理能够为水稻幼苗提供更充足的氮素供应, 为水稻后期的生长打下基础。至水稻灌浆期, 土壤铵态氮含量为处理 A > N1A3 > N2A2 > N3A1 > U > CK > N, 说明前期铵态氮肥施用量的增加会提高中后期土壤铵态氮的含量, 并维持整个水稻生育期土壤中铵态氮含量在较高水平; 而肥料配施后硝态氮肥添加比例的增加自始至终没有提高土壤中铵态氮的含量。除苗期外, A 处理的铵态氮供应水平都高于 U

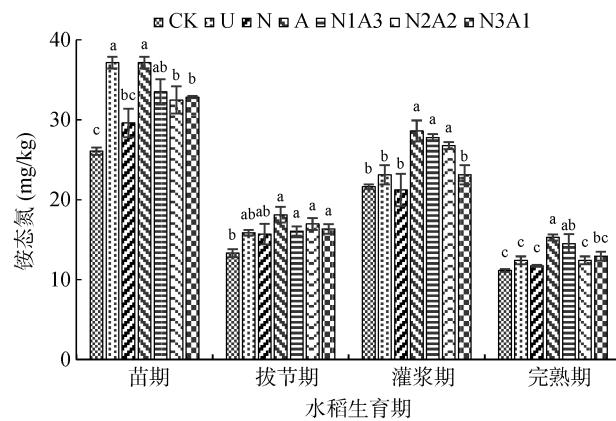


图 2 水稻不同生育期土壤铵态氮含量  
Fig. 2 Soil  $\text{NH}_4^{\text{+}}\text{-N}$  contents in different growth stages

处理。综合水稻整个生育期铵态氮供用情况, A 处理效果最好。

### 2.3 不同施肥处理对土壤碱解氮含量的影响

碱解氮包括硝态氮、铵态氮及易水解的有机态氮, 它能够反映土壤近期的氮素总体供应情况, 也是作物氮素营养的主要来源<sup>[22-23]</sup>。整个水稻生育期土壤中的碱解氮含量呈现先降低后趋于稳定的趋势(图 3)。苗期 U 处理碱解氮含量最高, 显著高于其他处理, 其次为 A 处理, 在施氮量相同的条件下 A 处理较 N 处理土壤碱解氮显著增加了 22.22%, 因此, 施用普通尿素和单施铵态氮较单施硝态氮都能减少施肥后氮素的损失。灌浆期是水稻需肥的关键时期, 充足的肥料供应是提高水稻产量的重要保证。至灌浆期和完熟期, A 处理土壤碱解氮含量显著高于 CK 处理、U 处理、N 处理和 N3A1 处理, 且两种肥料配施后, 随着铵态氮添加比例的增加, 土壤中碱解氮含量也逐渐增加。综合水稻的整个生育期, 铵态氮施用量大的处理, 在水稻中后期土壤碱解氮都能维持在一个较高且相对稳定的水平, 比 U 处理、N 处理更有利于满足水稻中后期生长对土壤氮素的需求。

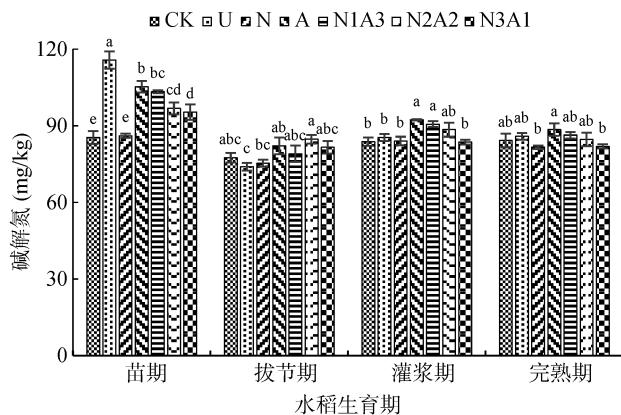


图 3 水稻不同生育期土壤碱解氮含量

Fig. 3 Soil alkali-hydrolyzable nitrogen contents in different growth stages

### 2.4 不同施肥处理对灌浆期水稻功能叶 SPAD 值的影响

SPAD 值是反映叶片光合能力的重要指标, 水稻灌浆期所需的物质中有 60% ~ 80% 来自光合作用, 此时功能叶光合作用的强弱对水稻产量等影响极大<sup>[24]</sup>。对灌浆期水稻功能叶 SPAD 值进行测定(图 4), N 处理功能叶 SPAD 值最低, A 处理较 N 处理功能叶 SPAD 值显著提高了 6.76%, 且两种肥料配施后随着铵态氮施用比例的增加, 功能叶 SPAD 值也逐渐升高。A 处理、N1A3 处理和 U 处理功能叶 SPAD 值

都显著高于 N 处理, 说明硝态氮施用量过高会导致叶片光合性能下降, 降低功能叶光合能力, 不利于水稻后期干物质积累。

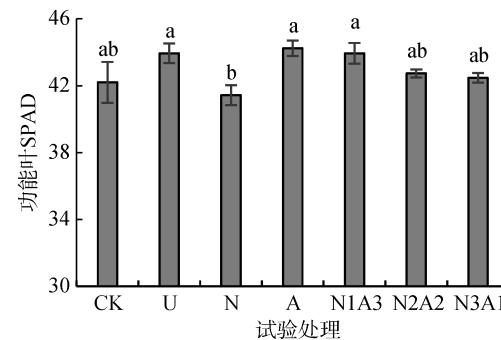


图 4 灌浆期水稻功能叶 SPAD 值

Fig. 4 SPAD values of functional leaves in filling stage

### 2.5 不同施肥处理对水稻产量及产量因子的影响

收获后对水稻产量和产量构成因素进行分析(表 2)。结果显示 U 处理和 A 处理水稻产量效果最好。随着铵态氮施用比例的增加、硝态氮施用比例的减少, 水稻产量呈现逐渐升高的趋势。水稻产量提高的原因主要为铵态氮提高了水稻的有效分蘖, 从而提高了水稻的有效穗数。当铵态氮添加比例由 25% 提高至 100% 的过程中, N3A1 处理、N2A2 处理、N1A3 处理和 A 处理较 N 处理水稻每公顷有效穗数分别增加了 3.28%, 16.15%, 38.09% 和 52.31%; 水稻产量分别提高了 10.38%, 23.50%, 49.21% 和 60.11%。A 处理与 U 处理水稻有效穗数和水稻产量没有显著差异, 施肥后各处理之间穗粒数差异不显著, 但都显著高于 CK 处理。A 处理和 N1A3 处理水稻千粒重显著高于其他处理, 这说明充足的铵态氮供应还能使水稻籽粒饱满。

### 2.6 不同施肥处理对水稻农学效率、氮肥生理效率及氮素利用率影响

通过计算得出不同施肥处理水稻农学效率、氮肥生理效率和氮素利用率(表 3), 结果显示氮肥农学效率和生理效率的高低都为处理 U > A > N1A3 > N2A2 > N3A1 > N, 农民习惯性施肥情况下氮肥农学效率和氮肥生理效率都最高。氮肥利用率方面, 处理 A > U > N1A3 > N2A2 > N3A1 > N, 肥料配施后随着铵态氮施用比例的增加, 氮肥利用率也逐渐增加。N 处理氮素利用率为 16.14%, 远低于我国水稻平均氮素利用率(28% ~ 41%), 超过 80% 的氮素未被水稻吸收而损失; 在铵态氮添加比例由 25% 提高至 100% 的过程中, N3A1 处理、N2A2 处理、N1A3 处理和 A 处理较 N 处理水稻氮素利用率分别提高了 54.55%, 70.83%,

表 2 水稻产量及产量构成因素  
Table 2 Rice yields and yield components

处理	千粒重(g)	有效穗数(万/hm <sup>2</sup> )	穗粒数	稻谷产量(kg/hm <sup>2</sup> )	较 CK 增加(%)
CK	23.29 c	207.35 c	113.33 b	5 466.44 c	-
U	24.55 b	272.37 a	122.67 a	8 201.82 a	50.04
N	23.57 b	176.57 d	122.67 a	5 105.21 c	-6.61
A	25.25 a	268.94 a	120.33 a	8 173.92 a	49.53
N1A3	25.48 a	243.83 b	122.67 a	7 617.65 ab	39.35
N2A2	24.75 b	205.08 c	124.33 a	6 304.80 b	15.34
N3A1	24.86 b	182.37 cd	124.33 a	5 635.26 c	3.09

注: 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。

表 3 不同施肥处理氮素利用率  
Table 3 Nitrogen utilization rates of different treatments

处理	吸氮量(kg/hm <sup>2</sup> )	氮肥农学效率(kg/kg)	氮肥生理效率(kg/kg)	氮肥利用率(%)	较 N 处理氮肥利用率提高(%)
CK	151.80	-	0.00	-	-
U	225.55	15.20	37.09	40.97	153.86
N	180.86	-2.01	-12.43	16.14	-
A	230.62	15.04	34.35	43.79	171.31
N1A3	217.65	11.95	32.67	36.58	126.66
N2A2	201.43	4.66	16.89	27.57	70.83
N3A1	196.70	0.94	3.76	24.94	54.55

126.66% 和 171.31%。因此得出, 相较于硝态氮, 水田中单独施用铵态氮或采用基施+追施的方式施用尿素都能够减少氮素损失, 降低对环境的污染。

## 2.7 不同施肥处理经济效益

试验所用肥料的当年价格为: 硝酸钙 2 000 元/t、氯化铵 800 元/t、普通尿素 2 000 元/t。按照该价格计算了各处理产生的经济效益(表 4), 每公顷纯收入为处理 A > U > N1A3 > N2A2 > CK > N3A1 > N。

A 处理纯收入最高, 为 19 745.76 元/hm<sup>2</sup>, 每公顷较 CK 处理增收 7 546.43 元, 较 N 处理增收 10 952.12 元。因为氯化铵肥料价格较低, A 处理在产量低于 U 处理情况下, 减少了肥料成本, 从而提高每公顷水稻的纯收入, 最终比 U 处理还增收 522.91 元。N 处理和 N3A1 处理不仅没有显著提高水稻产量, 反而增加了肥料成本, 因此经济效益都低于 CK 处理。

表 4 不同施肥处理经济效益  
Table 4 Economic benefits of different treatments

处理	氮肥折价(元/hm <sup>2</sup> )	其他费用(元/hm <sup>2</sup> )	产量(元/hm <sup>2</sup> )	产值(元/hm <sup>2</sup> )	纯收入(元/hm <sup>2</sup> )	较 CK 增收(元/hm <sup>2</sup> )
CK	0.00	4 200	5 466.44	16 399.33	12 199.33	0.00
U	782.60	4 600	8 201.82	24 605.45	19 222.85	7 023.52
N	2322.00	4 200	5 105.21	15 315.64	8 793.64	-3 405.69
A	576.00	4 200	8 173.92	24 521.76	19 745.76	7 546.43
N1A3	1 012.50	4 200	7 617.65	22 852.94	17 640.44	5 441.11
N2A2	1 449.00	4 200	6 304.80	18 914.40	13 265.40	1 066.07
N3A1	1 885.50	4 200	5 635.26	16 905.79	10 820.29	-1 379.04

## 2.8 水稻产量与硝态氮、铵态氮施用量的关系

通过产量的响应, 发现氮素形态在很大程度上影响水稻对氮的吸收和水稻的生长。在 0 ~ 180 kg/hm<sup>2</sup>

的氮肥施用量范围内, 将水稻产量、硝态氮施用量、铵态氮施用量通过方程进行拟合(表 5), 发现水稻产量(y)与硝态氮施用量( $x_1$ )无显著关系, 而与铵态氮施

用量( $x_2$ )呈极显著线性关系, 水稻产量与铵态氮施用量的相互关系为  $y = 18.044x_2 + 4943.4 (R^2 = 0.9753)$ 。这说明随着铵态氮施用量的增加, 水稻产量也随之增加。

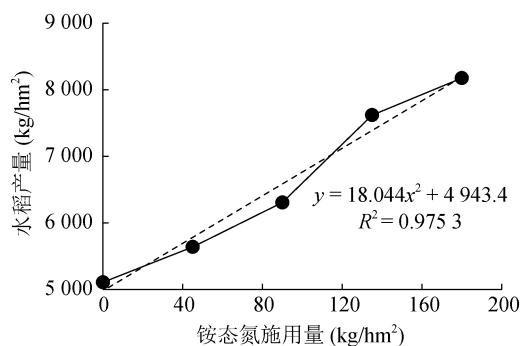


图 5 水稻产量与铵态氮施用量的关系  
Fig.5 Relationship between rice yield and  $\text{NH}_4^+$ -N amount

### 3 讨论

为研究肥料配施后在土壤中的运移、损失和利用程度。我们模拟了3种供试肥料施入稻田后主要的转化过程(图6)。硝态氮施入土壤后, 由于 $\text{NO}_3^-$ 带有负电荷, 无法被同样带有负电荷的土壤胶粒吸附<sup>[25]</sup>, 因此大多存在于土壤溶液中, 并随土壤水分运动而移动。在长期淹水的环境下, 极易被淋洗冲刷到土壤深层, 无法被作物吸收利用。除此之外, 淹水条件下反硝化作用也经常发生<sup>[26]</sup>, 引起 $\text{NO}_3^-$ 形成各种不能被作物利用的氮气或氮氧化物气体而脱氮损失, 从而造成肥料的严重浪费, 最终导致水稻因缺氮而减产。试验中单施硝态氮处理中极低的硝态氮、铵态氮含量和水稻产量也证实了这两方面的原因。

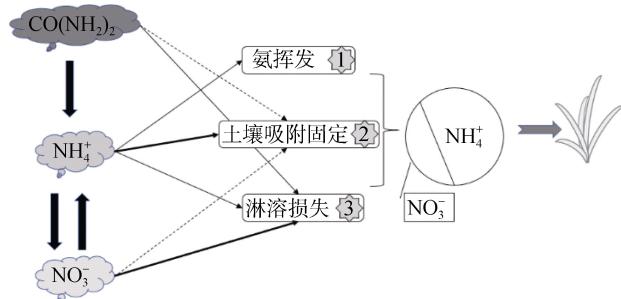


图 6 淹水条件下3种氮肥在土壤中的主要转化及损失过程  
Fig. 6 Main transformation and loss process of three nitrogen fertilizers in soil under flooding condition

淹水条件抑制了硝化细菌的活动, 因此, 当铵态

氮施入土壤后, 只有极少部分会转化为硝态氮。 $\text{NH}_4^+$ 可以被水稻直接吸收, 而剩余的 $\text{NH}_4^+$ 一部分会被带负电荷的土壤胶体吸附, 另外少部分会在2:1型黏粒矿物的膨胀性晶格中取代层间的阳离子(如 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 等), 从而固定在土壤中, 并随着时间的推移缓慢地释放。两者共同作用减少了氮素的损失与肥料的浪费, 因此, 铵态氮在氮素供应方面较硝态氮更有长效性, 这也与土壤中的硝态氮、铵态氮结果相一致。除此之外, 土壤中的铵( $\text{NH}_4^+$ )与氨( $\text{NH}_3$ )也存在一个不断相互转化的过程, 二者之间保持着以下平衡:  $\text{NH}_4^+ \rightleftharpoons \text{NH}_3 + \text{H}^+$ , 土壤的pH决定了反应的平衡方向, 在pH=7时,  $\text{NH}_3$ 约占6%<sup>[27]</sup>。供试土壤的pH为6.99, 可以推断不会有大量的 $\text{NH}_3$ 挥发从而造成环境污染。

尿素很难被水稻根系直接吸收利用。尿素施入土壤后, 小部分尿素以分子形态溶于土壤溶液中, 并通过氢键的作用被土壤吸附, 而大部分的尿素都在脲酶的作用下水解成为 $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ 和 $\text{NH}_4\text{OH}$ <sup>[28]</sup>, 进而以 $\text{NH}_4^+$ 的形式被水稻吸收或被土壤胶体吸附固定。尿素在20℃的条件下, 只需4~5 d便能完全转化为铵态氮<sup>[29]</sup>。施肥后至苗期土壤样品采集之间15 d的当地平均气温为23℃, 施用于土壤中的尿素在该温度和淹水条件下转化速度极快, 几乎全部转化成为铵态氮。这也揭示了试验中苗期U处理和A处理土壤中铵态氮含量无明显差异的原因。

张亚丽等<sup>[16]</sup>研究发现不同形态氮素对水稻生长影响差异显著, 水稻在 $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ 为50:50的营养液中生长状况最好, 植株总干重、分蘖数、N素积累量均最高。段英华等<sup>[15]</sup>通过液培试验, 研究了增硝营养对常规籼稻、常规粳稻、杂交籼稻、杂交粳稻4种不同基因型的水稻苗期生长和氮素吸收同化的影响。结果表明, 增硝态氮营养可以增加水稻叶片的光合速率, 促进水稻对氮素的吸收, 提高氮素利用率, 进而促进水稻生长。大田试验中, 铵态氮在水稻整个生育期内对水稻的生长都起着主要作用, 试验结果存在的差异可能由以下原因造成: 大田试验与液培试验水稻所处的生长条件不同, 且大田中复杂的养分固定机制与微生物活动也与营养液环境存在差异, 因此试验结果也存在差别。

追肥能够为水稻需氮关键时期提供及时的氮素供应。虽然不同类型的水稻品种对氮素的吸收与利用存在差异, 但研究者大都认为分蘖期与孕穗期是水稻需氮的最关键时期<sup>[30]</sup>。试验为系统研究硝态氮、铵态氮及二者按不同比例配施后对水稻整个生育期

土壤养分含量变化的影响,除农民习惯性施肥处理外,其他配施处理的肥料施用方式均设置为一次性基施且不再追肥,但这与实际生产中水稻的需肥规律不完全相符,在水稻需肥的关键时期可能存在氮素供应紧张、水稻后劲不足的情况。本试验条件下,在无需追肥的情况下,单独施用铵态氮的处理水稻产量就与农民习惯性施肥处理持平,并因为其肥料价格低廉、减少追肥次数从而提高了纯收入。可以推断,如果与农民习惯性施肥方式一致,铵态氮也采用基施+追施的施肥方式,产量与经济效益还会有进一步的提升,但仍需要进一步试验来确定该推断增产潜力如何。

#### 4 结论

铵态氮对整个生育期内水稻的生长起着主要作用,单施铵态氮土壤氮素供应状况好于其他施肥处理,在整个水稻生育期特别是中后期能为水稻提供充足的氮素来源,使土壤硝态氮、铵态氮和碱解氮含量都维持在较高水平。当铵态氮的配施比例由 25% 增加到 75% 的过程中,水稻的产量提高了 35.18%,氮素利用率提高了 46.67%,每公顷产生的经济收益增加了 6 820.15 元。单施铵态氮处理较单施硝态氮处理每公顷增产 3 068.71 kg,增收 10 952.12 元,并因肥料价格低,减少了追肥次数,较农民习惯性施肥处理每公顷还能额外增收 522.91 元。

水稻产量( $y$ )与硝态氮的施用量无相关性,与铵态氮施用量( $x_2$ )呈显著正相关,二者之间函数关系为  $y = 18.044x_2 + 4943.4 (R^2 = 0.9753)$ ,铵态氮提高水稻产量的方式主要是提高了水稻有效分蘖和氮素利用率。本试验条件下,综合水稻长势、产量、氮素利用率和纯收入各项指标,淹水条件下建议单独施用氯化铵肥料,但同时也须兼顾肥料施用与肥料运输、氨挥发损失以及碱性土壤盐渍化加剧之间的平衡。

#### 参考文献:

- [1] 刘珍环,李正国,唐鹏钦,等.近 30 年中国水稻种植区域与产量时空变化分析[J].地理学报,2013,68(5): 680-693.
- [2] 程勇翔,王秀珍,郭建平,等.中国水稻生产的时空动态分析[J].中国农业科学,2012,45(17): 3473-3485.
- [3] 巨晓棠,谷保静.我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J].植物营养与肥料学报,2014,20(4): 783-795.
- [4] 郭瑞华,罗玲,张腾昊,等.地上和地下植食者互作对水稻氮分配及土壤活性氮的影响[J].土壤学报,2017(2): 493-502.
- [5] 杨静,聂三安,杨文浩,等.不同施肥水稻土可溶性有机氮组分差异及影响因素[J].土壤学报,2018,55(4): 968-979.
- [6] Courtois B, Ahmadi N, Khowaja F, et al. Rice root genetic architecture: Meta-analysis from a drought QTL database[J]. Rice, 2009, 2(2/3): 115-128.
- [7] Galkovskyi T, Mileyko Y, Bucksch A, et al. GiA roots: Software for the high throughput analysis of plant root system architecture[J]. Bmc. Plant Biology, 2012, 12(1): 1-12.
- [8] Kirk G J D, Le van D U. Changes in rice root architecture, porosity, and oxygen and proton release under phosphorus deficiency[J]. New Phytologist, 1997, 135(2): 191-200.
- [9] Pang W, Crow W T, Luc J E, et al. Comparison of water displacement and WinRHIZO software for plant root parameter assessment[J]. Plant Disease, 2011, 95(10): 1308-1310.
- [10] Ogawa S, Valencia M O, Ishitani M, et al. Root system architecture variation in response to different  $\text{NH}_4^+$  concentrations and its association with nitrogen-deficient tolerance traits in rice[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2014, 36(9): 2361-2372.
- [11] Dai J L, Duan L S, Dong H Z. Improved nutrient uptake enhances cotton growth and salinity tolerance in saline media[J]. Journal of Plant Nutrition, 2014, 37(8): 1269-1286.
- [12] 段英华,张亚丽,沈其荣.水稻根际的硝化作用与水稻的硝态氮营养[J].土壤学报,2004,41(5): 803-809.
- [13] 张亚丽,段英华,沈其荣.水稻对硝态氮响应的生理指标筛选[J].土壤学报,2004,41(4): 571-576.
- [14] 段英华,张亚丽,沈其荣.增硝营养对不同基因型水稻苗期吸铵和生长的影响[J].土壤学报,2005,42(2): 260-265.
- [15] 段英华,张亚丽,沈其荣,等.增硝营养对不同基因型水稻苗期氮素吸收同化的影响[J].植物营养与肥料学报,2005,11(2): 160-165.
- [16] 张亚丽,董园园,沈其荣,等.不同水稻品种对铵态氮和硝态氮吸收特性的研究[J].土壤学报,2004,41(6): 918-923.
- [17] 李伟,李絮花,李海燕,等.控释尿素与普通尿素混施对夏玉米产量和氮肥效率的影响[J].作物学报,2012,38(4): 699-706.
- [18] Devkota M, Martius C, Lamers J P A, et al. Tillage and nitrogen fertilization effects on yield and nitrogen use efficiency of irrigated cotton[J]. Soil & Tillage Research, 2013, 134(8): 72-82.
- [19] 李勇,周毅,郭世伟,等.铵态氮和硝态氮营养对水、旱稻根系形态及水分吸收的影响[J].中国水稻科学,2007,21(3): 294-298.

- [20] 肖娟, 严欢欢, 杨永清, 等. 不同品种水稻苗期硝态氮吸收与利用效率差异的筛选及研究[J]. 植物生理学报, 2016(12): 1941–1949.
- [21] Darrah P R, Jones D L, Gjd K, et al. Modelling the rhizosphere: A review of methods for ‘upscaling’ to the whole-plant scale[J]. European Journal of Soil Science, 2006, 57(1): 13–25.
- [22] 罗华, 杨洪. 浅谈对碱解氮的认识[J]. 石河子科技, 1999(2): 42–44.
- [23] 张木, 唐拴虎, 逢玉万, 等. 不同氮肥及施用方式对水稻养分吸收特征及产量形成的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(2): 69–75.
- [24] 李杰, 冯跃华, 王旭, 等. 不同地力和施氮水平下水稻叶片 SPAD 值及产量的分析[J]. 中国稻米, 2017, 23(1): 26–30.
- [25] 王贺贺, 吴普特, 赵西宁, 等. 不同施肥方式对垄沟灌溉水氮分布的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(2): 157–163.
- [26] 刘燕, 王海飞, 朱高荻, 等. 水稻土和菜田添加碳氮后的气态产物排放动态[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2): 326–336.
- [27] 黄昌勇. 土壤学[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [28] 曹银珠, 赵同科, 刘树庆, 等. 脲酶/硝化抑制剂双控过程中硝化抑制尿素分解效应[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 143–147.
- [29] 逢玉万, 胡正义, 谷思玉, 等. 硫磺和双氰胺配施对尿素在滇池北岸菜地土壤中转化的影响研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(6): 1154–1157.
- [30] 王森, 莫菁华, 汪洋, 等. 水稻-再生稻体系干物质积累及氮磷钾养分的吸收利用[J]. 中国水稻科学, 2018, 32(1): 67–77.