

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.21061

# 不同施氮量及施氮方式对水稻田氨挥发及氮肥利用率的影响

王家宝, 邬刚, 袁嫚嫚, 井玉丹, 王文军, 张祥明, 孙义祥\*

(安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 养分循环与资源环境安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 施用缓控释氮肥是降低稻田土壤氨挥发损失的常用措施之一。将缓控释氮肥与速效氮肥配施, 可以解决水稻对氮素的需求与降低氮素损失之间的矛盾。在保证水稻产量的前提下, 以减少稻田氨挥发损失、提高氮肥利用效率以及降低环境污染为目的, 采用大田裂区试验的方法, 设置不施氮肥和施氮量分别为 60 (N60)、120 (N120)、180 (N180)、240 (N240)  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  5 个施氮水平, 以及氮肥一次性施用 (SF) 及氮肥一基二追 (TF) 2 种施肥方式, 研究不同氮肥用量及运筹模式对水稻田氨挥发、氮肥利用率以及水稻产量的影响: 结果表明, 氮肥施用方式和施氮量对水稻田氨挥发损失量影响显著, 同一施氮方式下, 稻田土壤氨挥发损失量随着施氮量增加而增加, SF 各处理氨挥发损失量为 14.46 ~ 23.74  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , TF 各处理的氨挥发损失量则为 23.3 ~ 47.74  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , SF 氨挥发损失量比 TF 降低 37.9% ~ 50.3%; 氮肥施用方式显著影响氮肥表观利用率和氮肥偏生产力, SF 和 TF 的最大氮肥表观利用率均出现在 N180, 分别为 50.02% 和 38.68%; 低施氮量 (N60) 和高施氮量 (N240) 时, TF 氮肥偏生产力高于 SF, 而施氮量为 120 (N120)  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、180 (N180)  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时, SF 比 TF 氮肥偏生产力分别高出 3.32 和 5.58  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 施氮量极显著影响水稻的氮素吸收量和氮肥农学利用率; SF 和 TF 的最高产量分别出现在 N180 和 N240, 且 SF 高于 TF, 两者相差 465.3  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。缓控释氮肥与速效氮肥配施一次性施肥可以有效降低稻田氨挥发损失, 同时提升氮肥表观利用率和偏生产力, 且能在施氮量较低的情况下获得较高产量, 在水稻氮肥管理上具有应用价值。

**关键词:** 水稻; 氮肥用量; 运筹模式; 氨挥发; 氮肥利用率; 产量

我国有超过 60% 以上的人口以稻米为主食<sup>[1]</sup>, 水稻生产能力的提升对保障国家粮食安全至关重要。施用氮肥是提高水稻产量最有效的途径之一, 但近年来随着氮肥施用量的不断增加, 随之而来的环境污染、资源浪费等问题也日益凸显<sup>[2]</sup>。因此, 在保证产量的同时, 如何减少稻田氮素损失以提高氮肥利用效率成为水稻绿色生产工作中的主要任务。

氨挥发是稻田氮素损失的主要途径<sup>[3]</sup>。据相关报道, 在全球农作物种植体系中, 通过氨挥发损失的氮素占总施氮量的平均比例为 18%, 最高可达 64%<sup>[4]</sup>。改变氮肥种类和优化施肥方式, 已被证实是减少稻田氨挥发损失的有效措施<sup>[5]</sup>。缓控释肥料因其具有养分释放期长、符合水稻对养分的需求

规律、氮素利用效率高以及对环境污染小等优点, 近年来被广泛应用<sup>[6-8]</sup>。因其包膜材料具有疏水特性, 可以有效减缓膜内尿素的释放速率, 从而减少氨挥发损失<sup>[9]</sup>。缓控释肥与速效肥配施一次性施肥可以在减少施肥次数的同时, 很好地匹配作物对养分的吸收和养分供应之间的关系, 已有研究表明, 将缓控释氮肥与普通氮肥配施一次性施入, 可以有效降低玉米田氨挥发损失, 降幅达 80%<sup>[10]</sup>; 徐丽萍等<sup>[11]</sup>将缓控释氮肥与速效氮肥按 7:3 混匀一次性施用后, 在花椰菜和番茄产量分别增加 3.7% 和 21.4% 的同时, 氨挥发损失量分别降低 64.0% 和 46.9%; 在安徽省江淮丘陵区将缓释尿素与普通尿素混合一次性施用后, 稻季氨挥发损失总量和损失率相较于单施普通尿素分别降低了 26.23% 和 4.52%, 同时氮肥利用率提升了 6.07%<sup>[12]</sup>。但也有研究表明, 单施缓控释肥会造成小麦-玉米轮作体系中作物周年产量的下降<sup>[13]</sup>; Yang 等<sup>[14]</sup>也发现, 将缓控释氮肥与速效氮肥配施后, 在降低土壤氨挥发的同时, 水稻产量和氮肥利用率也出现了下降的情况。因此, 不同氮肥配施对稻田土壤氨挥发以及

收稿日期: 2021-01-31; 录用日期: 2021-04-10

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFD0200806); 安徽省农业科学院作物高产与养分资源高效利用团队 (2020YL065)。

作者简介: 王家宝 (1989-), 助理研究员, 硕士, 研究方向为新型肥料与高效施肥。E-mail: wangjiabao19900804@163.com。

通讯作者: 孙义祥, E-mail: sunyixiang@126.com。

氮肥利用率的影响有待进一步探讨。

本研究通过田间试验,探讨了氮肥不同用量(60、120、180、240 kg·hm<sup>-2</sup>)和不同施用方式(不施氮、单施速效氮肥一基二追、速效氮肥与缓控释肥配施一次性施用)对稻田土壤氮挥发和水稻产量及氮肥利用效率的影响,以期降低稻田氮素损失和指导合理施肥提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验点概况

本试验于2019年6~11月在安徽省合肥市巢湖中埠镇建华村进行。试验点位于117°46'34" E、31°39'14" N,属北亚热带季风气候区,年平均气温16.1℃,年均日照时数2035~2270 h,年降水量1158 mm。试验点种植模式为稻-麦轮作,一年两熟制,土壤类型为潜育型水稻土。小麦收获后,耕作层(0~20 cm)土壤的基本理化性质:pH 6.6,全氮1.23 g·kg<sup>-1</sup>,有效磷21.42 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾125.6 mg·kg<sup>-1</sup>,有机质22.18 g·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验材料

试验所用普通尿素(N 46%)、普通过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%)、KCl(K<sub>2</sub>O 60%)均为市场购买所得;所用缓控释氮肥为聚氨酯包膜尿素(N 44%),释放期40、90 d,由茂施肥料公司生产。

水稻品种为湘两优900,水稻3叶期移栽,基本苗22.5万穴·hm<sup>-2</sup>,行距33.3 cm,株距13.3 cm。

### 1.3 试验设计

本研究为大田试验,采用裂区设计:主区为施氮量,分别为60、120、180、240 kg·hm<sup>-2</sup>(简称N60、N120、N180、N240);副区为施肥方式,分别设置一次性施肥(SF)和一基二追(TF),同时设置不施氮对照(CK),共9个处理。其中,采用一次性施肥的处理氮肥运筹模式为释放期40 d包膜尿素:释放期90 d包膜尿素:普通尿素=3:3:4,将不同类型氮肥按上述比例混匀后,在水稻移栽前做基肥一次性施入,后期不再追肥;采用一基二追施肥处理氮肥运筹模式为基肥:分蘖肥:穗肥=5:3:2,所用氮肥类型为普通大颗粒尿素。各处理施磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)75 kg·hm<sup>-2</sup>,钾肥(K<sub>2</sub>O)90 kg·hm<sup>-2</sup>,磷钾肥全部作为基肥施入。小区面积30 m<sup>2</sup>(5 m×6 m),3次重复,小区间田埂覆膜隔离防渗,单排单灌。

水分管理方式为生育前期灌水—中期干湿交

替—后期淹水—收获期自然落干。具体为移栽后两周内、施肥后一周内、孕穗期和灌浆期保持水层(3~5 cm),中期(分蘖期至孕穗前)采用干湿交替灌溉方式,有效分蘖临界叶龄期排水晒田,收获前自然落干。病虫害等的防治同当地农户习惯。

## 1.4 测定项目与方法

### 1.4.1 土壤氮挥发的测定

氮挥发采用密闭室监测法测定<sup>[12]</sup>。密闭室为顶部带有通气孔的直径为20 cm、高为15 cm的有机玻璃罩。用20 g·L<sup>-1</sup>硼酸溶液吸收挥发的氨气,每次收集结束后,用标准酸(C<sub>1/2H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></sub>=0.020678 mol·L<sup>-1</sup>)滴定,计算氮挥发量。施肥后每天9:00~11:00进行抽气,并以此为平均值计算全天的氮挥发量<sup>[15]</sup>。施肥后连续测定,直到各处理间无显著差异为止。

### 1.4.2 水样采集及测定

水样采集与氮挥发的测定同步,每次采样后,样品置于4℃冰箱中保存,铵态氮浓度采用靛酚蓝比色法测定。

### 1.4.3 植株样品采集及分析方法

收获期每小区分别采集籽粒、秸秆样品,测定样品氮含量,实验室常规考种。水稻用小型收割机全部实收,单独计产。植物样品采用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消煮,凯氏定氮法测定待测液中的氮。

## 1.5 数据处理与分析

土壤氮挥发计算公式为(以N计): $F=V \times 10^{-3} \times C \times 0.014 \times (10^4 / \pi r^2) \times 12$

式中: $F$ 为土壤氮挥发日损失量,kg·hm<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>;  $V$ 为滴定用标准酸的体积,mL; $10^{-3}$ 为体积转换系数; $C$ 为滴定用标准酸的标定浓度,mol·L<sup>-1</sup>;0.014为氮原子的相对原子质量,kg·mol<sup>-1</sup>;  $10^4$ 为面积转换系数; $r$ 为有机玻璃气室的半径,m;12为24 h与日氮挥发收集时间2 h的比值。

肥料利用率按照以下公式计算:

吸氮量(kg·hm<sup>-2</sup>)=(植株秸秆干物重×秸秆含氮量)+(籽粒干物重×籽粒含氮量)

氮肥表观利用率(REN,%)=(施氮区作物吸氮总量-无氮区作物吸氮总量)/氮肥投入量×100

氮肥农学利用率(AEN,kg·kg<sup>-1</sup>)=(施氮区作物产量-无氮区作物产量)/氮肥投入量

氮肥偏生产力(PFPN,kg·kg<sup>-1</sup>)=施氮区作

物产量 / 施氮量

试验数据用 Excel 2010 进行整理及绘图; 采用 SPSS 22.0 的广义线性模型 (General Linear Models) 进行方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 氨挥发通量

施肥方式对水稻田土壤氨挥发通量影响十分明显 (图 1)。由图 1 可知, 采用一基二追施氮方式,

在每次施肥后 1 ~ 2 d 氨挥发通量即出现波峰, 随后快速下降 (图 1a), 施肥后一周左右, 各处理间则无明显差别。基肥施用后的峰值最高, 蘖肥与穗肥施用后氨挥发通量的峰值相当, 各处理氨挥发通量均随着施氮量的增加而增加。

采用一次性施肥的方式后第 2 d 即出现氨挥发高峰, 随后逐渐降低。整个水稻生育期, 一次性施肥的各处理均只有 1 个氨挥发排放高峰 (图 1b)。

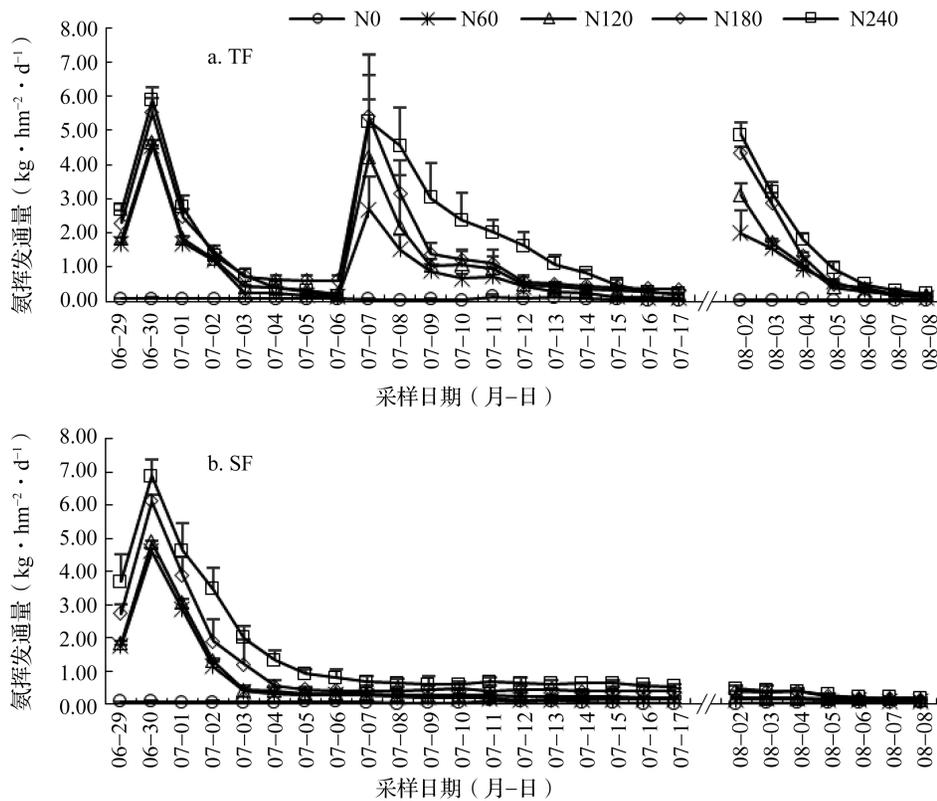


图 1 不同施氮方式与施氮量对稻田氨挥发通量的影响

### 2.2 氨挥发损失量

不同氮肥施用方式及施氮量在水稻各生育阶段的氨挥发损失量见表 1。由表 1 可知, 不同施氮方式和施氮量下稻田土壤氨挥发损失量差异较大, 氨挥发损失总量占施氮量的 13.19% ~ 38.83%。氮肥施用方式和施氮量对水稻整个生育期氨挥发的影响均达到极显著差异, 而两者交互作用对水稻田土壤氨挥发损失总量的影响差异不显著。

在施氮量相同的情况下, 采用一次性施肥的处理氨挥发损失量均显著低于一基二追施肥处

理。SF 不同施氮量处理氨挥发损失比例大小为 SFN60>SFN120>SFN240>SFN180, 且主要集中在前期, 后期氨挥发损失量很小。而 TF 中各处理的氨挥发损失比例大小为 TFN60>TFN120>TFN180>TFN240, 基肥 - 蘖肥阶段氨挥发损失量在 9.89 ~ 14.31  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  之间, 蘖肥 - 穗肥阶段氨挥发损失量在 7.76 ~ 21.69  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  之间, 穗肥以后氨挥发损失量在 5.65 ~ 11.85  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  之间。相同施氮量条件下, SF 比 TF 氨挥发损失总量降低了 37.9% ~ 50.3%。

表 1 不同施氮方式和氮肥施用量稻季阶段氨挥发损失量

氮肥施用方式	施氮量 (kg · hm <sup>-2</sup> )	基肥 - 蘖肥 (kg · hm <sup>-2</sup> )	蘖肥 - 穗肥 (kg · hm <sup>-2</sup> )	穗肥以后 (kg · hm <sup>-2</sup> )	损失总量 (kg · hm <sup>-2</sup> )	氨挥发损失比例 (%)
TF	N60	9.89e	7.76c	5.65d	23.30d	38.83a
	N120	10.92de	11.56b	6.93e	29.41e	24.51b
	N180	14.31c	14.86b	9.76b	38.93b	21.63bc
	N240	14.20c	21.69a	11.85a	47.74a	19.89c
SF	N60	11.64de	1.89d	0.93f	14.46e	24.10b
	N120	12.58cd	2.77d	1.21f	16.56e	13.80d
	N180	17.27b	4.56cd	1.91e	23.74d	13.19d
	N240	23.73a	6.77c	2.15e	32.65c	13.60d
氮肥施用方式		**	**	**	**	**
施氮量		**	**	**	**	**
氮肥施用方式 × 施氮量		**	*	**	ns	*

注：表中同列数据后字母不同表示在 5% 水平上差异显著。“ns”表示差异不显著；“\*”表示在 5% 水平上差异显著；“\*\*”表示在 1% 水平上差异显著。下同。

### 2.3 田面水铵态氮浓度

不同施肥处理的水稻田面水铵态氮浓度变化趋势与氨挥发变化趋势相似 (图 2)，在相同施氮量

的情况下，基肥期 SF 各处理田面水铵态氮浓度峰值均高于 TF，这主要是因为一次性施肥的处理前期速效氮肥施用量较大。采用一基二追的施肥处

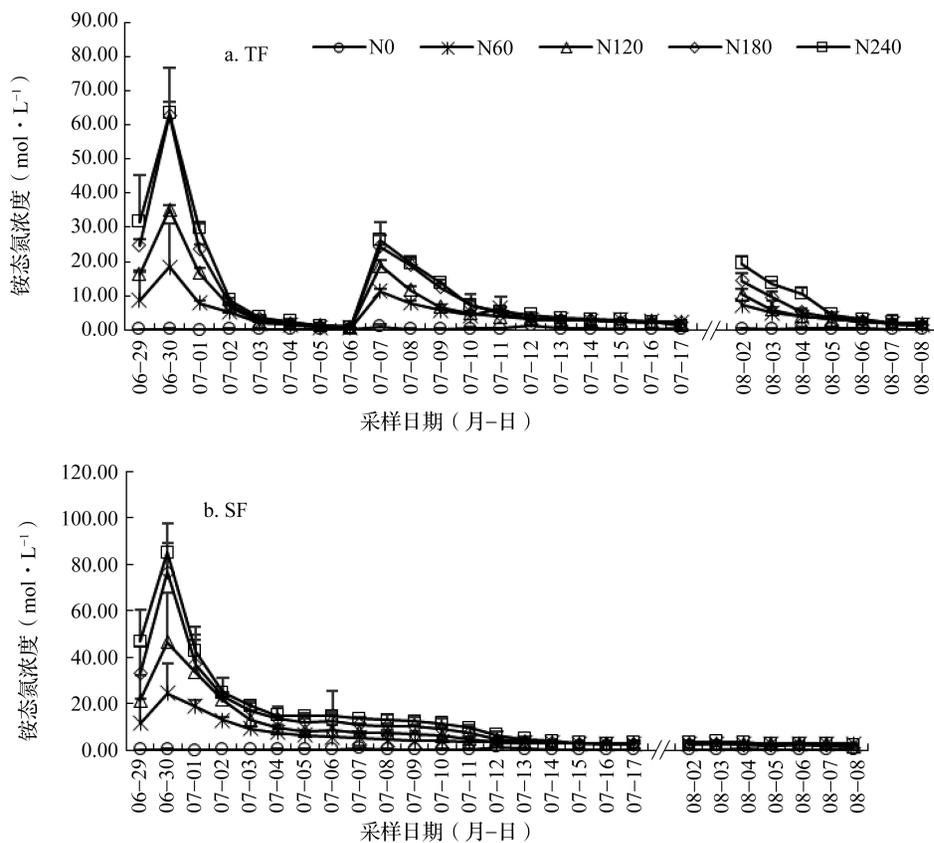


图 2 不同施氮方式与施氮量对水稻田面水铵态氮浓度的影响

理, 基肥施用后的第 2 d 即达到峰值, 且随着施氮量的增加而增加, TF N240 最高, 达到  $63.41 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 施肥后一周左右各处理间无明显差距。各施肥时期的田面水浓度峰值依次为基肥 > 蘖肥 > 穗肥 (图 2a)。采用一次性施肥的各处理水稻田面水铵态氮浓度也在施肥后第 2 d 达到峰值, 之后逐渐降低, SF N240 峰值最高, 为  $85.04 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  (图 2b)。

#### 2.4 氮肥利用率

氮肥施用方式对水稻氮素吸收量影响不显著,

但对氮肥表观利用率以及氮肥偏生产力影响显著。而施氮量可显著影响氮素吸收、氮肥农学利用率和氮肥偏生产力, 对氮肥表观利用率影响不显著。相同施氮量情况下, SF 的水稻吸氮量以及氮肥表观利用率较 TF 均有增加趋势 (表 2)。采用一基二追的施肥方式, 水稻单位面积吸氮量随着施氮量的增加而增加, 而采用一次性施肥的各处理中, 水稻吸氮量则随着施氮量的增加呈现先增加后减少的趋势。

表 2 不同施氮方式与施氮量对水稻氮肥利用效率的影响

氮肥施用方式	施氮量	吸氮量 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	氮肥表观利用率 (%)	氮肥农学利用率 ( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	氮肥偏生产力 ( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
TF	N60	125.29c	34.77a	65.92a	156.64a
	N120	142.82bc	31.99b	35.14b	80.50b
	N180	174.06ab	38.68cd	28.52b	58.76cd
	N240	175.67ab	29.68d	23.64b	46.32d
SF	N60	120.38c	26.59a	58.41a	149.13a
	N120	135.44bc	25.84b	38.46b	83.82b
	N180	194.46a	50.02c	34.10b	64.34c
	N240	187.97a	34.81d	23.05b	45.73d
氮肥施用方式		ns	*	ns	*
施氮量		**	ns	**	*
氮肥施用方式 × 施氮量		ns	ns	ns	ns

#### 2.5 水稻产量

不同施氮方式与施氮量对水稻产量的影响如图 3 所示。由图 3 可知, 施氮量为  $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时, 采用一次性施肥的处理水稻产量高于采用一基二追的处理, 且差异显著。其余施氮量情况下, 不同施氮方式对水稻产量的影响差异不显著。但采用

一次性施肥方式的处理, 水稻产量随着施氮量的增加呈现出先上升后下降的趋势, 且在施氮量为  $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时, 产量达到最高, 为  $11581.80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 而采用一基二追施肥的处理, 水稻达到最高产量的施氮量为  $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 为  $11116.51 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

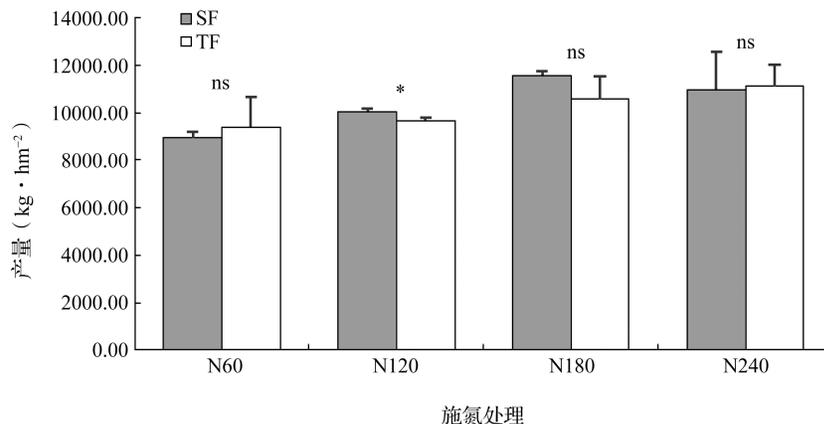


图 3 不同施氮方式与施氮量对水稻产量的影响

注: ns、\*、\*\* 分别表示两种施肥方式下水稻产量差异不显著 ( $P>0.05$ )、显著 ( $P<0.05$ )、极显著 ( $P<0.01$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 不同氮肥施用量对水稻田氨挥发损失特征的影响

氮肥的施用是稻田氨挥发损失的主要来源<sup>[16]</sup>,且同一种施氮方式下氨挥发损失量随着施氮量的增加而增加(图1)。但在本研究设置的施氮量梯度下,氨挥发损失比例随着施氮量的增加呈现降低的趋势。这可能是因为随着施氮量的增加,水稻对氮素的吸收量也在增加,同时除氨挥发损失以外的氮素损失量也会随之增加(例如通过径流等途径),加之土壤氮素残留量的积累,就导致通过氨挥发损失的氮素占整个施氮量的比例降低。但也有研究表明<sup>[17]</sup>,氨挥发损失比例与施氮量没有显著的相关性,这可能与不同气候、土壤性质和水管理等有关。田面水铵态氮浓度也是影响氨挥发的最主要因素之一,降低田面水铵态氮浓度是减少氨挥发损失的关键<sup>[18]</sup>。本研究中,施肥后1~2 d,水稻田面水的铵态氮浓度达到最高,且与氨挥发损失通量的变化规律一致(图2),这与前人的研究结果一致<sup>[19-22]</sup>。N240处理的田面水铵态氮浓度在各自施肥方式中的峰值均为最高,说明水稻田面水铵态氮浓度会随着施氮量的增加而增加。但俞映侬等<sup>[23]</sup>的研究则表明,由于受其他环境等因素的影响,田面水铵态氮浓度与氨挥发损失之间的相关性并不显著。这可能主要与不同区域的降雨和温度的差异有关。因此,以田面水铵态氮浓度作为评价稻田氨挥发损失风险的指标,还需要进一步修正。

#### 3.2 不同氮肥施用方式对水稻田氨挥发损失量以及水稻产量的影响

不同施肥方式对氨挥发损失也有一定影响。本研究中,SF各处理的氨挥发损失量在14.46~23.74 kg·hm<sup>-2</sup>之间,TF各处理的氨挥发损失量则为23.3~47.74 kg·hm<sup>-2</sup>(表1),各处理水稻田氨挥发损失比例为13.19%~38.4%,SF的氨挥发损失量较TF的降幅在37.9%~50.3%之间,这一结果低于杨铎等<sup>[24]</sup>的缓控释氮肥可以减少氨排放量70%以上的研究结论,这主要是因为本研究所设置的施肥方式为速效氮肥与缓控释氮肥配施,而速效氮肥氨挥发损失量较高造成的。采用速效氮肥与缓控释氮肥配施一次性施肥可以有效降低稻田氨挥发损失量的原因可能是缓控释氮肥的包膜材料可以阻隔膜内肥料与土壤接触的几率,从而减少了参与氨

挥发的底物氮,降低土壤氨挥发损失<sup>[25]</sup>。不同施肥方式和氮肥种类还可显著影响水稻产量<sup>[26]</sup>,陈贤友等<sup>[27]</sup>的报道指出,缓控释氮肥与普通氮肥按一定比例配施后,较单施普通尿素多次施肥处理,可以显著提高水稻产量;Yang等<sup>[14]</sup>则报道了长期定位试验的研究结果为不同类型氮肥配施,作物产量会有下降的趋势。不同研究结果的差异可能与土壤类型、作物品种、种植习惯等因素有关。本研究表明,施氮量为120 kg·hm<sup>-2</sup>时,SF处理水稻产量显著高于TF,且SF处理水稻最高产量对应的施氮量低于TF(图3)。以上说明,采用缓控释氮肥与速效氮肥配施一次性施肥方式后,在保证水稻产量的前提下,有更大的减肥潜力。

对于缓控释氮肥施入土壤后,除了研究氮素损失对环境的影响外,包膜材料可能带来的环境风险也应充分考虑<sup>[28]</sup>。包膜材料的选用近年来也呈现出十分多样的选择,但是包膜材料施入土壤后,其残留对土壤生态系统和地下水的影响以及材料降解机理的研究还要持续关注。改进施肥方式、肥料种类和优化施氮量已成为当前学者对减少稻田氨挥发损失研究的主要方向,但兼顾环境和经济效益的科学化氮肥管理模式,还应进一步探讨。

### 4 结论

缓控释氮肥与速效氮肥配施一次性施肥方式可减少稻田氨挥发损失量,减排幅度为37.9%~50.3%。

施氮方式可以显著影响水稻氮肥表观利用率和氮肥偏生产力,而对吸氮量以及氮肥农学利用率影响不显著;施氮量则对水稻氮素吸收量、氮肥农学利用率以及氮肥偏生产力均达到显著影响,但两者交互作用对上述因素均无显著影响。

采用缓控释氮肥与速效氮肥配施一次性施肥方式,可以在施氮量较低的情况下水稻产量达到最高,具有减肥的潜力。

#### 参考文献:

- [1] Wu W, Nie L X, Liao Y C, et al. Toward yield improvement of early-season rice: other options under double rice-cropping system in central China [J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, 45: 75-86.
- [2] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands [J]. *Science*, 2010, 327 (5968): 1008-1010.
- [3] Behera S N, Sharma M, Aneja V P, et al. Ammonia in the

- atmosphere: A review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2013, 20 (11): 8092–8131.
- [4] Pan B B, Lam S K, Mosier A, et al. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: A global synthesis [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 232: 283–289.
- [5] 杨国英, 郭智, 刘红江, 等. 稻田氨挥发影响因素及其减排措施研究进展 [J]. *生态环境学报*, 2020, 29 (9): 1912–1919.
- [6] 樊小林, 刘芳, 廖照源, 等. 我国控释肥研究的现状和展望 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15 (2): 463–473.
- [7] Azeem B, Ku Shaari K Z, Man Z B, et al. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer [J]. *Journal of Controlled Release*, 2014, 181: 11–21.
- [8] Ni B L, Liu M Z, Lü S Y, et al. Environmentally friendly slow release nitrogen fertilizer [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59 (18): 10169–10175.
- [9] 薛利红, 杨林章, 施卫明, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——源头减量技术 [J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32 (5): 881–888.
- [10] 安文博, 孙焱鑫, 李占台, 等. 不同缓控释肥对鲜食玉米产量、品质及氨挥发的影响 [J]. *应用生态学报*, 2020, 31 (7): 2422–2430.
- [11] 徐丽萍, 巨昇容, 王远, 等. 江苏设施菜地控释氮肥一次性基施增效减排效果研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40 (5): 1106–1114, 1141.
- [12] 邬刚, 袁嫚嫚, 曹哲伟, 等. 江淮丘陵区不同氮肥管理模式对稻田氨挥发损失特征研究 [J]. *水土保持学报*, 2017, 31 (4): 285–288, 331.
- [13] 胡瞞瞞, 董文旭, 王文岩, 等. 华北平原氮肥周年深施对冬小麦-夏玉米轮作体系土壤氨挥发的影响 [J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28 (12): 1880–1889.
- [14] Yang J, Gao W, Ren S. Long-term effects of combined application of chemical nitrogen with organic materials on crop yields, soil organic carbon and total nitrogen in fluvio-aquic soil [J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 151: 67–74.
- [15] 盛伟红, 刘文波, 赵晨光, 等. 优化施肥对不同轮作系统稻田氨挥发的影响 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 46 (7): 45–53, 65.
- [16] 朱兆良. 中国土壤氮素研究 [J]. *土壤学报*, 2008, 45 (5): 778–783.
- [17] 杨士红, 彭世彰, 徐俊增, 等. 不同水氮管理下稻田氨挥发损失特征及模拟 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28 (11): 99–104.
- [18] He Y P, Zhang J Y, Yang S H, et al. Effect of controlled drainage on nitrogen losses from controlled irrigation paddy fields through subsurface drainage and ammonia volatilization after fertilization [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 221: 231–237.
- [19] 侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 等. 缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果 [J]. *环境科学*, 2017, 38 (12): 5326–5332.
- [20] 李然, 蔡威威, 艾天成, 等. 稻田氨挥发损失和水稻产量对不同水氮处理的响应 [J]. *中国土壤与肥料*, 2020 (3): 47–54.
- [21] 金树权, 陈若霞, 汪峰, 等. 不同氮肥运筹模式对稻田田面水氮浓度和水稻产量的影响 [J]. *水土保持学报*, 2020, 34 (1): 242–248.
- [22] Sun Y, Xia G, He Z, et al. Zeolite amendment coupled with alternate wetting and drying to reduce nitrogen loss and enhance rice production [J]. *Field Crops Research*, 2019, 235: 95–103.
- [23] 俞映惊, 薛利红, 杨林章. 太湖地区稻田不同氮肥管理模式对氨挥发特征研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32 (8): 1682–1689.
- [24] 杨铨, 吴良欢, 伍少福, 等. 树脂包膜尿素在稻田中的释放特征及与积温的关系 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32 (2): 199–204.
- [25] Chu H Y, Hosen Y, Yagi K, et al. Soil microbial biomass and activities in Japanese Andosols as affected by controlled and application depth of urea [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, 42 (2): 89–96.
- [26] 李诗豪, 刘天奇, 马玉华, 等. 耕作方式与氮肥类型对稻田氨挥发、氮肥利用率和水稻产量的影响 [J]. *农业资源与环境学报*, 2018, 35 (5): 447–454.
- [27] 陈贤友, 吴良欢, 韩科峰, 等. 包膜尿素和普通尿素不同掺混比例对水稻产量与氮肥利用率的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16 (4): 918–923.
- [28] Chen L, Xie Z G, Zhuang X L, et al. Controlled release of urea encapsulated by starch-g-poly (L-lactide) [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2008, 72 (2): 342–348.

### Effects of different nitrogen application rates and methods on ammonia volatilization and nitrogen use efficiency in paddy fields

WANG Jia-bao, WU Gang, YUAN Man-man, JING Yu-dan, WANG Wen-jun, ZHANG Xiang-ming, SUN Yi-xiang\* (Institute of Soil and Fertilizer, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Nutrient Cycling, Resources and Environment of Anhui, Hefei Anhui 230031)

**Abstract:** The application of slow and controlled-release nitrogen fertilizer is one of the common measures to reduce the loss of ammonia volatilization in paddy soil. Combining slow and controlled-release nitrogen fertilizer with quick acting

nitrogen fertilizer can solve the contradiction between rice demand for nitrogen and reducing nitrogen loss. In order to reduce ammonia volatilization loss, improve nitrogen use efficiency and reduce environmental pollution on the premise of ensuring rice yield, field split plot experiment was adopted. In order to study the effects of different nitrogen application rates and nitrogen application methods on ammonia volatilization, nitrogen use efficiency and rice yield, five nitrogen application levels of 60 (N60), 120 (N120), 180 (N180) and 240 (N240)  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  were set up, and two fertilization methods of base application (SF) and half fertilizer applying by base application with twice topdressing of the other half (TF) were used. The results showed that nitrogen application methods and nitrogen rates had significant effects on ammonia volatilization in rice field. Under the same nitrogen application mode, ammonia volatilization loss of paddy soil increased with the increase of nitrogen application rate. The ammonia volatilization loss of SF was 14.46 ~ 23.74  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , while that of TF was 23.3 ~ 47.74  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , and the ammonia volatilization loss of SF was 37.9% ~ 50.3% lower than that of TF. The apparent nitrogen use efficiency and nitrogen partial productivity were significantly affected by nitrogen application methods. The maximum apparent nitrogen use efficiency of SF and TF appeared at N180, 50.02% and 38.68%, respectively. The partial nitrogen productivity of TF was higher than that of SF at low nitrogen application rate (N60) and high nitrogen application rate (N240), while the partial nitrogen productivity of SF was higher than that of TF at 120 (N120)  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  and 180 (N180)  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  by 3.32 and 5.58  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively. The nitrogen application rate significantly affected the nitrogen uptake and nitrogen agronomic use efficiency of rice. The highest yield of SF and TF appeared in N180 and N240, respectively, and SF was higher than TF, with a difference of 465.3  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ . The combined application of slow controlled and release nitrogen fertilizer and quick acting nitrogen fertilizer can reduce the ammonia volatilization loss of rice field effectively, improve the apparent utilization rate and partial productivity of nitrogen, and achieve higher yield under the condition of low nitrogen application, which is of practical value in the management of nitrogen fertilizer in rice.

**Key words:** paddy; nitrogen application rate; nitrogen application method; ammonia volatilization; nitrogen use efficiency; yield