

不同深施方式对太湖地区稻田氨挥发和氮肥利用率的影响^①

朱文彬^{1,2}, 曾科^{1,2}, 田玉华¹, 张超³, 李晓³, 葛仁山³, 尹斌^{1*}

(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 江苏华昌化工股份有限公司, 江苏张家港 215600)

摘要: 本研究以太湖地区稻田为研究对象开展连续两年的田间试验, 通过设置不施氮肥(CK)、常规施氮(CN)、减氮表施(RN)、减氮侧深施(RNS)和减氮穴施(RNP)5种施氮处理, 探究不同深施方式对稻田氨挥发与氮肥利用率的影响。结果表明, 与表施处理(CN和RN)相比, RNS和RNP通过降低田面水 NH_4^+ -N浓度和pH分别减少30.95%~41.54% 和66.71%~72.23% 的氨挥发排放($P<0.05$)。相较于RN处理, RNP促进水稻根系生长并增加根区土壤有效氮含量, 进而增加水稻产量(6.23%), 提高氮肥利用率(50.15%), 降低土壤氮盈余(63.92%)($P<0.05$)。与CN处理相比, RNS显著降低土壤氮盈余(29.20%)($P<0.05$), 但水稻吸氮量和氮肥利用率均未显著增加。相较于RNS, RNP进一步降低氨挥发损失(50.84%)和土壤氮盈余(51.07%), 提高氮肥利用率(40.40%)($P<0.05$)。综上所述, RNP的农学和环境效益最高, 但因穴施机械及肥料造粒技术等因素的限制, 尚难应用于实际生产; 而侧深施肥在我国水稻大规模集约化生产中效益较高且切实可行。

关键词: 氮肥深施; 氨挥发; 氮肥利用率; 土壤氮扩散; 水稻根系特征

中图分类号: S143.1+2 文献标志码: A

Effects of Different Deep Fertilization Methods on Ammonia Volatilization and Nitrogen Use Efficiency in Rice Fields in Taihu Lake Region

ZHU Wenbin^{1,2}, ZENG Ke^{1,2}, TIAN Yuhua¹, ZHANG Chao³, LI Xiao³, GE Renshan³, YIN Bin^{1*}

(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 Jiangsu Huachang Chemical Co., Ltd., Zhangjiagang, Jiangsu 215600, China)

Abstract: A two-year field experiment was conducted in the Taihu Lake Region with five treatments: no nitrogen (N) input (CK), conventional N broadcasting (CN), reduced N broadcasting (RN), reduced N with side deep fertilization (RNS), and reduced N with point deep fertilization (RNP), to explore the effects of different deep fertilization methods on ammonia volatilization (NH_3) and N use efficiency (NUE) in paddy fields. The results showed that compared to surface application treatments (CN and RN), RNS and RNP reduced ammonia volatilization by 30.95%–41.54% and 66.71%–72.23% ($P<0.05$), respectively, owing to the reduced NH_4^+ -N concentration and pH in floodwater. RNP significantly promoted the root growth of rice, and increased soil available N content in root zone than RN, thereby increasing rice yield (6.23%) and NUE (50.15%), and decreasing soil N surplus (63.92%) ($P<0.05$). RNS markedly reduced soil N surplus (29.20%) ($P<0.05$), but N uptake and NUE of rice were not significantly increased versus CN. In contrast with RNS, RNP further decreased NH_3 volatilization (50.84%) and soil N surplus (51.07%), and increased NUE (40.40%) ($P<0.05$). Overall, RNP can achieve the maximum agronomic and environmental benefits, but it is difficult to be widely used in agriculture production owing to the limitation of the development of point-deep fertilization machines and fertilizer granulation technology, whereas side-deep fertilization method is feasible to be adopted in large-scale intensive production of rice due to the higher agronomic and environmental benefits.

Key words: Deep fertilization; Ammonia volatilization; Nitrogen use efficiency; Soil nitrogen diffusion; Root characteristics of rice

①基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2018YFD0800306, 2017YFD0200104)资助。

* 通讯作者(byin@issas.ac.cn)

作者简介: 朱文彬(1991—), 男, 安徽淮北人, 博士研究生, 主要从事农田氮素循环和面源污染控制研究。E-mail: wbzhu@issas.ac.cn

我国农业源氨挥发排放量从 1980 年的 2.1 Tg 增至 1996 年的 4.7 Tg，随后降至 2012 年的 2.8 Tg，其中稻田氨挥发排放量约为 1.7 Tg^[1-2]。太湖流域是我国水稻主产区之一，水稻单季施氮量在 N 270 kg/hm² 以上的农户超过 80%，有些甚至高达 320 kg/hm²^[3-4]。大量氮素损失不仅造成资源浪费和环境污染风险，也会降低氮肥利用率^[5]。

传统粗放的施氮方式是造成稻田氨挥发排放量较高且氮肥利用率低的主要原因。氮肥深施对稻田氨减排以及氮肥利用率提升的效果显著且稳定性较高，不易受气候变化、田间管理和土壤性状等因素的影响^[6-8]。然而，穴施可能造成水稻生长前期茎叶徒长和后期贪青晚熟；加之穴施机械和肥料造粒技术等因素的限制，穴施技术很难在大规模水稻生产中推广应用。近些年，侧深施肥技术发展迅速，且在促进水稻增产、提高氮肥利用率与降低氮素损失等方面效果显著，将侧深施肥技术与插秧机械相结合可进一步提高水稻生产效率和净环境经济效益^[9-10]。然而，以

往研究仅关注穴施或侧深施对水稻生产的影响，缺乏对不同深施方式下，稻田农学和环境效益响应的系统评价。因此，本文以太湖地区典型稻田为试验对象，开展了连续两年的田间试验，旨在探究不同深施方式对水稻产量、稻田氨挥发排放和氮肥利用率的影响，以期为我国优化稻田氮素管理模式提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

田间试验点为中国科学院常熟农业生态实验站(31°15'15"N, 120°57'43"E)，年均降水量 1 038 mm，年均气温 15.5 °C。供试土壤类型为潜育人为土，由河湖沉积物发育而来，其基本理化性质(0~20 cm)：土壤有机质 46.12 g/kg，全氮 2.67 g/kg，全磷 0.75 g/kg，全钾 17.95 g/kg，有效磷 31.00 mg/kg，速效钾 243.03 mg/kg，pH(H₂O) 6.87，土壤容重 1.20 g/cm³。试验期间气温和降雨情况如图 1 所示。

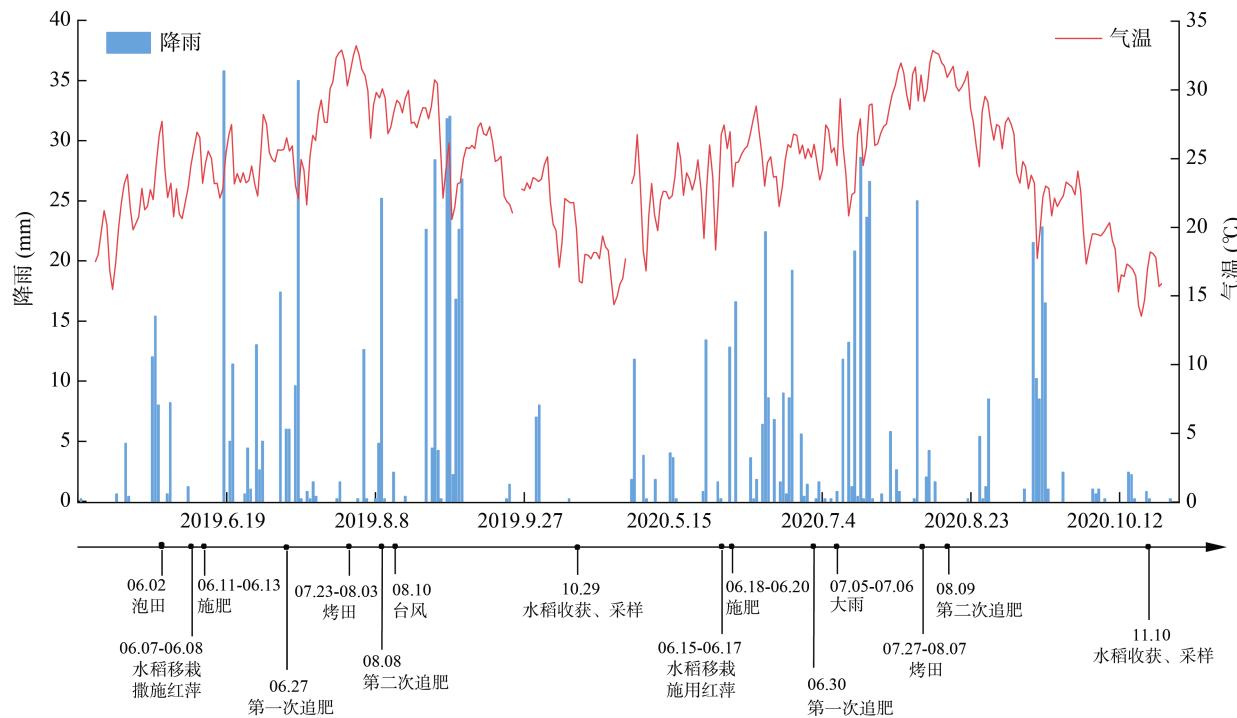


图 1 2019 年和 2020 年稻季降水、每日气温和田间管理

Fig. 1 Mean precipitation, daily air temperature and field management in rice seasons of 2019 and 2020

1.2 试验设计和田间管理

试验于 2019—2020 年稻季进行，共设置 5 个施肥处理：不施氮处理(CK)、当地常规施氮处理(CN)、减氮表施处理(RN)、减氮侧深施处理(RNS)和减氮穴施处理(RNP)，每个处理 4 个重复。试验小区采用不平衡裂区设计，CK、CN、RN 和 RNS 处理的小区面

积为 42 m²(6 m×7 m)；RNP 处理作为裂区设置在 RN 处理小区中，裂区面积为 4 m²(2 m×2 m)。CN 和 RN 处理均为表施，施氮量分别为 N 300 和 255 kg/hm²，其中基肥、分蘖肥和穗肥分别占 40%、30% 和 30% 的尿素。RNS 和 RNP 处理施氮量均为 N 255 kg/hm²，其中 60% 作为基肥侧深施或穴施，其余 40% 作穗

肥表施。侧深施肥即将尿素呈条带状施于水稻一侧5 cm, 土表以下5 cm处; 穴施即将尿素呈点状施于水稻一侧5 cm, 土表以下10 cm处, 具体如图2所示。所有处理的磷肥(过磷酸钙, P₂O₅ 12%)和钾肥(氯化钾, K₂O 60%)均作基肥一次性施入, 单季施用量分别是90 和120 kg/hm²。水稻品种为南粳46, 在秧龄30 d左右移栽, 移栽密度为20 cm×20 cm, 每穴3株水稻。所有小区的田间水分管理等措施与当地传统措施保持一致(图1)。

1.3 稻田氨挥发采样与测定

采用密闭空间歇通气法采集稻田氨挥发, 采用靛酚蓝比色法测定吸收液NH₄⁺-N浓度^[11-12]。与此同时, 采集田面水, 经过滤后测定田面水NH₄⁺-N和NO₃⁻-N浓度。采用便携式pH计测定田面水pH。氨挥发通量计算公式如下所示:

$$F_{\text{NH}_3} = \frac{C \times V \times 24 \times 10^{-6}}{\pi \times R^2 \times T \times 10^{-4}} \quad (1)$$

式中: F_{NH_3} 为氨挥发排放通量(N kg/(hm²·d)); C 为

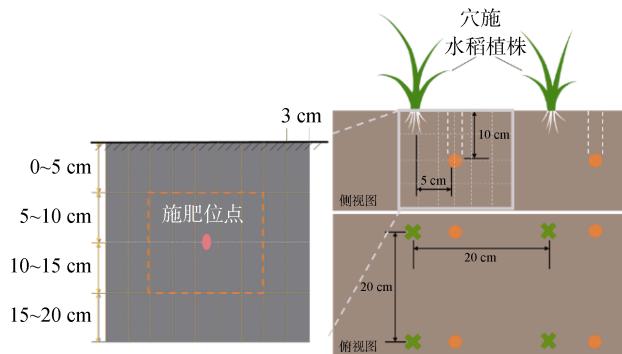


图2 侧深施和穴施施肥及土样采集图解

Fig. 2 Diagram of side-deep fertilization, point-deep fertilization and soil sample collection

1.5 土壤NH₄⁺-N和NO₃⁻-N动态变化的测定

在2020年稻季基肥施入后的第7、14、28、45天分别采集RN、RNS和RNP处理的土壤样品。对RNP和RNS处理, 以施肥位点为中心, 在水平方向上每间隔3 cm(即0~3、3~6和6~9 cm)用直径3 cm的采样器采集0~5、5~10、10~15和15~20 cm的土壤样品(图2); 对RN处理, 按照“S”形采样法, 采集0~5、5~10、10~15和15~20 cm的土壤样品。去除可见肥料颗粒、石子、植物残体等杂质后, 用1 mol/L KCl溶液浸提鲜土(土液比1:5, m:V), 采用靛酚蓝比色法测定土壤NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量。

1.6 水稻根系特征和不同生育期水稻含氮量的测定

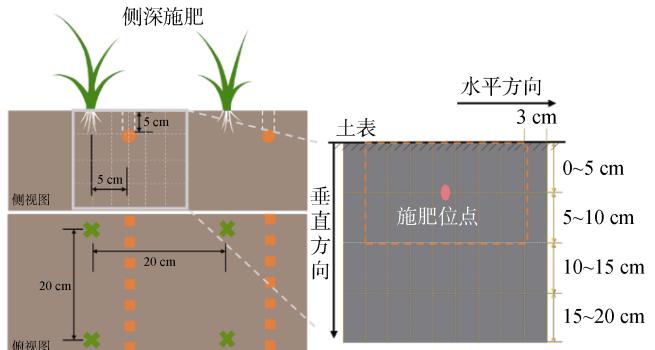
在2019年稻季, 采集分蘖期、拔节期、抽穗期和收获期水稻地上部分样品(每个小区采集2穴), 新

测得吸收液中NH₄⁺-N的浓度(mg/L); V 为稀硫酸吸收液的体积(L); T 为氨挥发持续采集时间(h); R 为密闭室半径(m)。

1.4 水稻产量、吸氮量、氮盈余和氮素回收利用率的测定

水稻成熟后, 于各小区内随机选取3个1 m²样方内的水稻地上部分(小区边缘除外)。RNP处理的裂区内水稻全部收取。采集的样品, 经脱粒、风干、称重后, 计算水稻产量和秸秆生物量。测产后, 随机选取一部分籽粒和秸秆样品置于80 °C的烘箱中烘至恒重, 经粉碎和过筛(<0.149 mm), 采用碳氮元素分析仪(Primacs SNC100-IC, 2019)测定氮含量。水稻吸氮量根据籽粒和秸秆的干物质量与氮含量进行计算, 氮盈余为当季施氮量与吸氮量之差。氮肥利用率计算公式为:

$$\text{氮肥利用率}(\%) = \frac{\text{施氮处理水稻吸氮量} - \text{对照处理水稻吸氮量}}{\text{施氮量}} \times 100 \quad (2)$$



鲜的水稻籽粒和秸秆在80 °C烘至恒重, 经粉碎过筛(<0.149 mm), 用碳氮元素分析仪(Primacs SNC100-IC, 2019)测定水稻籽粒和秸秆全氮含量。

采集RN、RNS和RNP处理下分蘖期水稻根系(每个小区随机选取两穴水稻), 将整株水稻完整取出, 尽量避免损伤根系, 清洗水稻根系后, 用EPSON根系扫描仪(Expression 11000XL)测定水稻根系长度、根表面积、根体积和根尖数。采用水稻根系参数分析软件(WinRHIZO Pro, 2008)分析处理水稻根系特征指标。如果不能立即测定, 将水稻根系用50%乙醇溶液于-4 °C暂时保存, 并于一周内完成测定。

1.7 数据处理与分析

试验数据采用SPSS 16.0进行统计分析, 采用Origin 2017进行绘图。采用单因素方差分析比较不

同处理间的显著性差异。所有数据经正态性和方差齐性检验后, 对不同处理的氨挥发、水稻产量、秸秆生物量、吸氮量、氮盈余和氮肥利用率进行多重比较。采用 R 语言绘制不同生育期水稻地上部分吸氮量与水稻产量和氮肥利用率的相关性热图。

2 结果与分析

2.1 氨挥发日通量、氨挥发累积极量、田面水 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 浓度和 pH

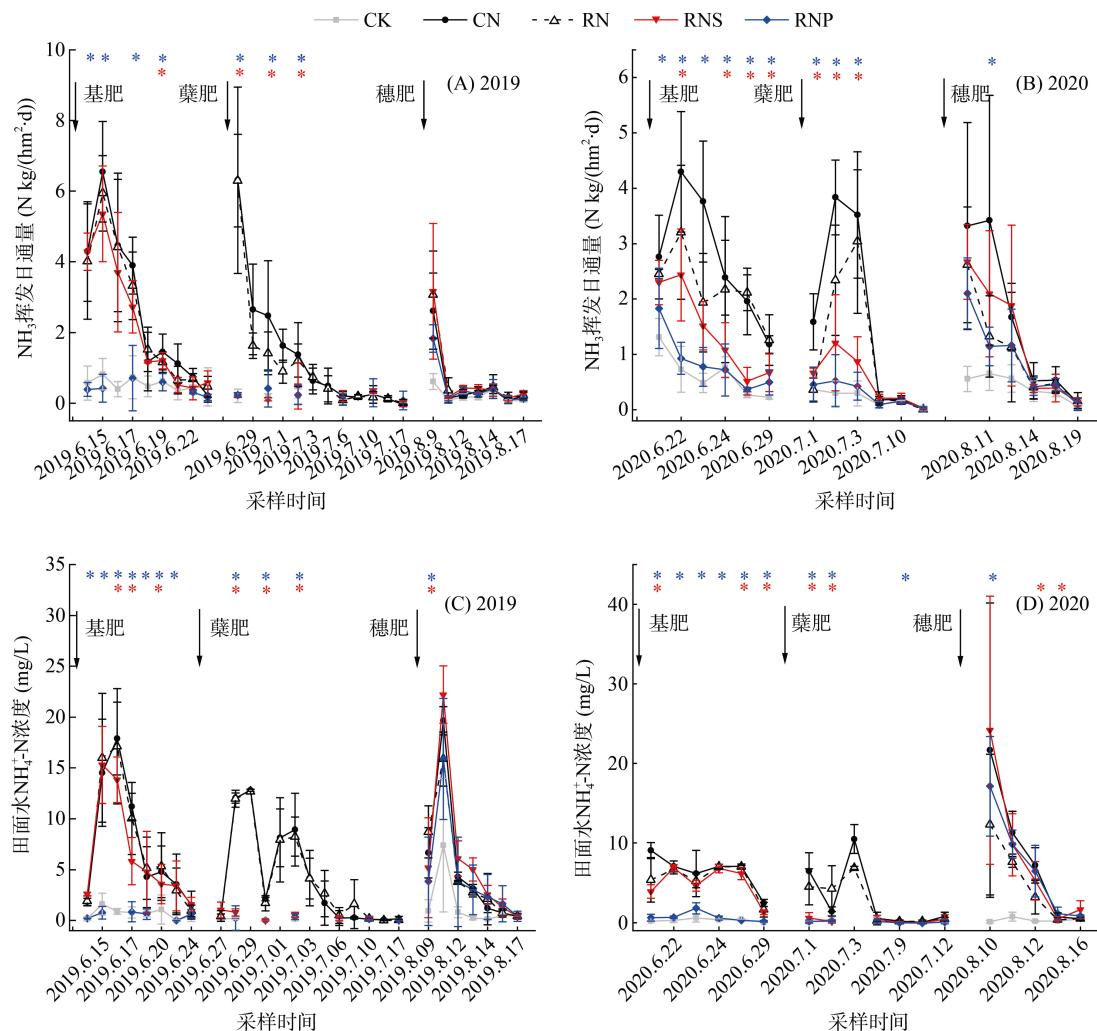
各处理的氨挥发日通量均在施肥后 1~3 d 内达到峰值, 随后逐渐降低。不同处理氨挥发日通量顺序为: CK<RNP<RNS<RN<CN, 且 RNP 处理的氨挥发日通量与 CK 近似(图 3)。除 RNP 处理, CN、RN 和 RNS 处理均有超过 50% 的氨挥发损失发生在基肥期。CN、RN、RNS 和 RNP 处理两年平均氨挥发损失分别占施氮量的 16.97%(15.91% 和 18.02%, 分别指 2019 年和 2020 年, 下同)、16.73%(16.67% 和 16.78%)、11.56%(10.46% 和 12.65%) 和 5.57%(4.89%

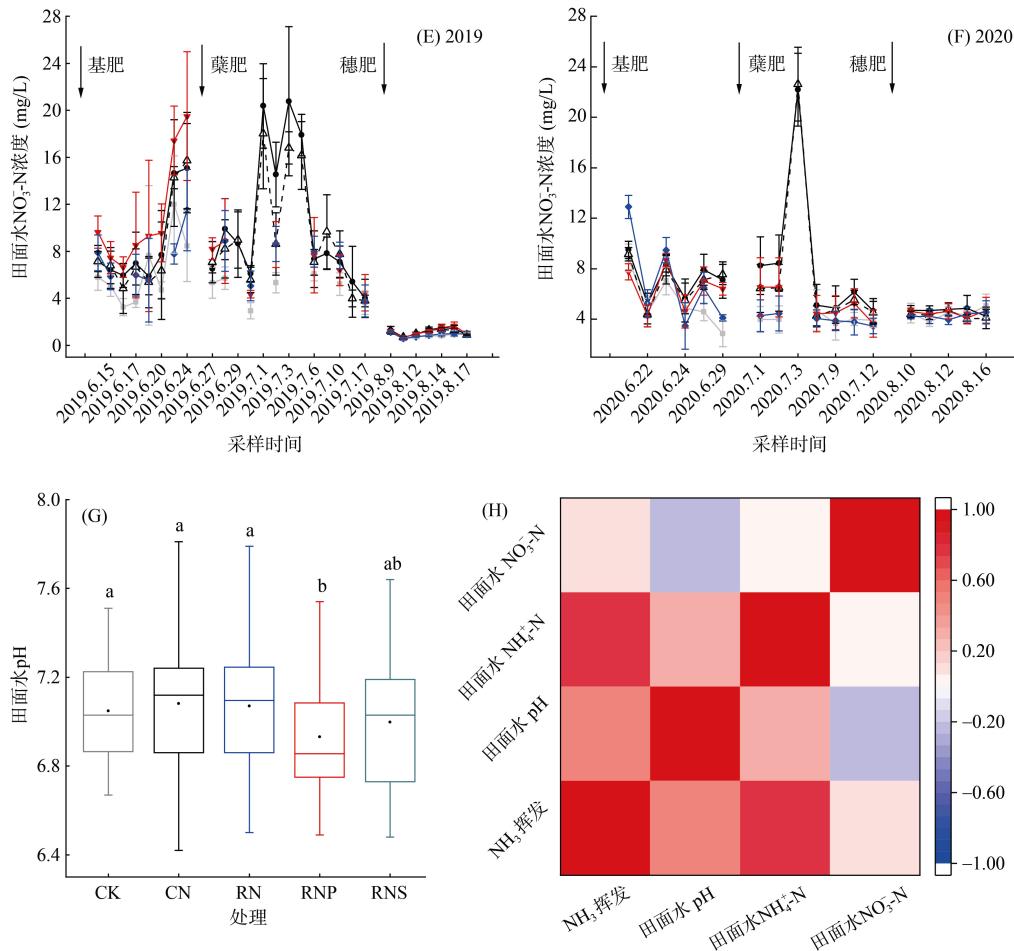
和 6.24%)。RN、RNS 和 RNP 处理的氨挥发排放量分别比 CN 处理低 15.85%(10.33% 和 21.36%)、41.54%(32.42% 和 50.65%) 和 72.23%(70.56% 和 73.86%)($P<0.05$)。相较于 RN, RNS 和 RNP 进一步降低 30.95%(24.64% 和 37.25%) 和 66.71%(62.57% 和 70.85%) 的氨挥发排放($P<0.05$); 且 RNP 比 RNS 的氨挥发排放量低 50.84%(40.35% 和 61.33%)。各处理氨挥发排放强度的规律与排放量一致(表 1)。

田面水 NH_4^+ -N 浓度变化规律与氨挥发日通量类似, 而田面水 NO_3^- -N 浓度的变化无明显规律。与表施处理(CN 和 RN)相比, 减氮深施处理(RNS 和 RNP)降低田面水 pH。Pearson 相关性结果表明, 稻田氨挥发日通量与田面水 NH_4^+ -N 浓度以及 pH 均呈显著正相关关系($P<0.05$)(图 3)。

2.2 水稻生物量、吸氮量、土壤氮盈余和氮肥利用率

不同施氮处理对水稻产量、吸氮量、土壤氮盈余和氮肥利用率的影响如表 2 所示。单纯减少氮肥投入





(A~D图中蓝色和红色的星号分别表示RNP和RNS处理与CN间差异达 $P<0.05$ 显著水平; G图箱体中的点表示均值,横线表示中位数,误差棒表示最大值和最小值,小写字母不同表示处理间差异达 $P<0.05$ 显著水平)

图3 氨挥发日通量(A、B), 田面水NH₄⁺-N(C、D)、NO₃⁻-N(E、F)和pH(G)变化情况, 以及氨挥发与田面水pH、NH₄⁺-N和NO₃⁻-N的相关性(H)

Fig. 3 NH₃ volatilization (A, B), floodwater NH₄⁺-N (C, D), NO₃⁻-N (E, F) and pH (G) in paddy fields, and pearson correlation between daily NH₃ volatilization and floodwater pH, NH₄⁺-N, and NO₃⁻-N (H)

表1 2019年和2020年稻季氨挥发累积量和氨挥发排放强度
Table 1 Cumulative NH₃ volatilization and NH₃ intensity in rice seasons of 2019 and 2020

年份	处理	氨挥发累积排放量 (N kg/hm ²)			占施氮量比例 (%)	氨排放强度 (N kg/t)
		累积量	基肥	第一次追肥		
2019	CK	11.35 c	5.72 b	3.83 b	1.80 b	—
	CN	47.73 a	25.31 a	17.64 a	4.78 a	15.91
	RN	42.80 a	23.39 a	14.35 a	5.06 a	16.78
	RNP	12.47 c	4.87 b	4.30 b	3.31 ab	4.89
	RNS	32.25 b	22.49 a	4.63 b	5.14 a	12.65
2020	CK	10.87 d	4.79 c	2.49 b	3.59 c	—
	CN	54.06 a	21.65 a	20.54 a	11.88 a	18.02
	RN	42.51 b	18.65 a	15.92 a	7.95 b	16.67
	RNP	15.91 d	5.47 c	3.30 b	7.14 b	6.24
	RNS	26.68 c	10.50 b	6.55 b	9.62 ab	10.46
交互影响 <i>P</i> 值(<i>F</i> 值)	年际	0.91 (0.14)	0.01 (15.68)	0.47 (0.54)	<0.001 (34.66)	0.99 (<0.001)
	施肥方式	<0.001 (66.84)	<0.001 (62.74)	<0.001 (42.21)	0.046 (3.48)	<0.001 (85.77)
	年际×施肥方式	0.29 (1.30)	0.05 (6.58)	0.61 (0.503)	0.80 (0.22)	0.34 (1.12)

注: 同列数据小写字母不同表示同一年份不同处理间差异显著($P<0.05$), 下表同。

表 2 不同施肥处理下水稻生物量、吸氮量、氮盈余和氮素回收利用率
Table 2 Rice biomass, N uptake, N surplus, and RE_N under different treatments

年份	处理	施氮量 (N kg/hm ²)	稻谷产量 (kg/hm ²)	秸秆生物量 (kg/hm ²)	吸氮量 (N kg/hm ²)	氮盈余 (N kg/hm ²)	氮肥利用率 (%)
2019	CK	—	4 806.82 b	4 441.16 c	67.69 d	—	—
	CN	300	9 237.81 a	7 999.35 ab	183.97 b	116.03 a	38.76 b
	RN	255	8 987.61 a	6 567.09 b	160.30 c	94.70 ab	36.32 b
	RNP	255	9 577.62 a	8 579.96 a	219.42 a	35.58 c	59.50 a
	RNS	255	9 368.71 a	6 078.66 bc	171.61 bc	83.39 b	40.75 b
2020	CK	—	3 993.45 c	3 146.65 c	57.42 c	—	—
	CN	300	9 393.99 b	10 792.44 a	192.55 b	107.45 a	45.04 b
	RN	255	8 974.01 b	9 523.68 ab	187.86 b	77.31 b	47.17 b
	RNP	255	10 219.39 a	10 987.41 a	213.63 a	28.64 c	66.25 a
	RNS	255	9 453.73 b	8 342.71 b	180.06 b	80.13 b	46.06 b
交互影响 <i>P</i> 值(<i>F</i> 值)	年际		0.15 (2.20)	0.01 (13.14)	0.28 (1.24)	0.62 (0.25)	0.016 (6.61)
	施肥方式		0.001 (9.93)	0.043 (3.63)	<0.001 (18.63)	<0.001 (26.66)	<0.001 (24.69)
	年际×施肥方式		0.20 (1.73)	0.91 (0.092)	0.82 (0.20)	0.52 (0.68)	0.87 (0.15)

(RN)有降低稻谷产量的趋势, 而减氮深施处理(RNS 和 RNP)可保证产量稳定, 甚至增加稻谷产量, 其中 RNP 处理显著增加 2020 年稻谷产量(8.79%) (*P*<0.05)。相比于 CN 处理, RNS 处理的土壤氮盈余降低 29.20% (28.13% 和 30.26%) (*P*<0.05), 但未增加水稻吸氮量; RNP 处理的水稻吸氮量和氮肥利用率分别增加 15.11%(10.95% 和 19.27%) 和 50.15%(47.09% 和

53.21%), 土壤氮盈余降低 63.92%(61.50% 和 69.34%) (*P*<0.05)。相较于 RNS 处理, RNP 处理的吸氮量和氮肥利用率进一步增加 23.26%(18.65% 和 27.86%) 和 40.40%(36.95% 和 43.84%), 土壤氮盈余降低 51.07%(44.80% 和 57.34%)。Pearson 相关性结果表明, 氮肥利用率和土壤氮盈余分别与稻田氨挥发呈显著负相关和正相关关系(*P*<0.05, 表 3)。

表 3 氨挥发累积量与稻谷产量、吸氮量、氮盈余和氮肥利用率的 Pearson 相关性
Table 3 Pearson correlation between cumulative NH₃ volatilization and rice yield, N uptake, N surplus and RE_N

施肥期	稻谷产量		水稻吸氮量		氮盈余		氮肥利用率	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
基肥	-0.365	-0.527*	-0.710**	-0.402	0.815**	0.727**	-0.806**	-0.562*
第一次追肥	-0.323	-0.432	-0.283	-0.360	0.629**	0.705**	-0.439	-0.536*
第二次追肥	-0.071	-0.064	-0.449	-0.418	0.409	0.678**	-0.447	-0.542*
累积量	-0.382	-0.458	-0.622*	-0.424	0.839**	0.787**	-0.752**	-0.602*

注: *、**分别表示相关性达 *P*<0.05 和 *P*<0.01 显著水平。

2.3 土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的动态变化

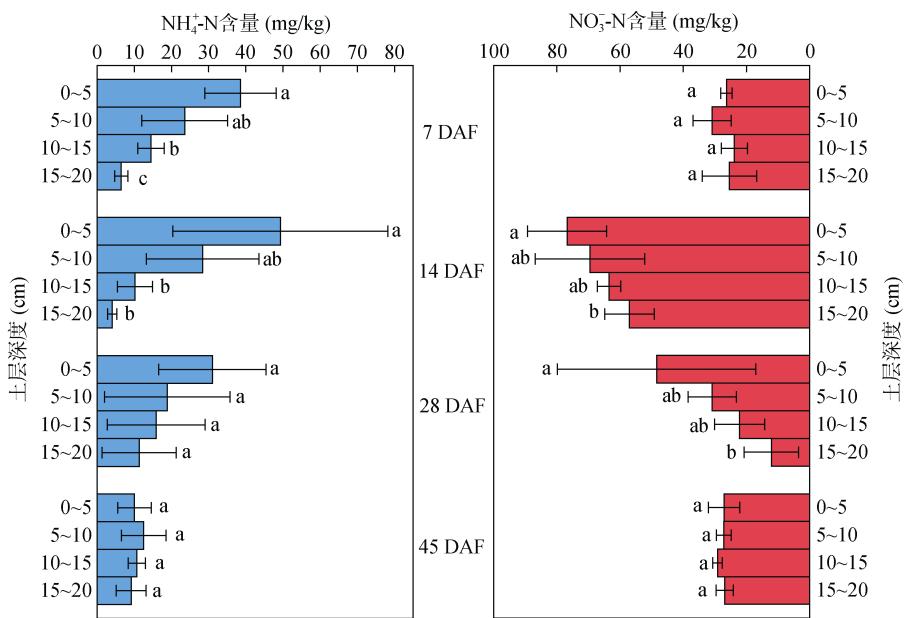
RN 处理的土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量分别为 4.05~49.29 mg/kg 和 12.11~76.77 mg/kg, 均在基肥后第 14 天含量最高, 至第 45 天降至最低。基肥后第 7 和 14 天, 0~5 cm 土层 NH₄⁺-N 含量显著高于 10~15 cm 和 15~20 cm; 而在基肥后第 14 和 28 天, 0~5 cm 土层 NO₃⁻-N 含量显著高于 15~20 cm 土层(图 4)。

基肥后第 7 天, RNS 处理土壤 NH₄⁺-N 含量达到最大值(4.50~122.30 mg/kg), 且主要分布在土表以下 0~10 cm(图 5); 基肥后第 14 天, RNS 处理 NO₃⁻-N 含量达到最大值(13.89~96.25 mg/kg)。RNP 处理的

土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量范围分别为 4.86~107.6 和 11.34~81.51 mg/kg, 且均在基肥后第 14 天达到最大值, 主要分布土表以下 5~15 cm 以及施肥位点两侧 6 cm 区域内(如图 2 中橙色虚线框所示)。基肥后第 45 天, RNS 和 RNP 处理的 NH₄⁺-N 含量分别降至 5.41~35.79 和 7.06~35.35 mg/kg, NO₃⁻-N 含量分别降至 23.08~55.50 和 29.34~52.23 mg/kg(图 5)。

2.4 水稻根系生长和不同生育期水稻含氮量

如图 6 所示, 减氮深施处理(RNS 和 RNP)可促进水稻根系生长, 以 RNS 处理效果最显著。RNS 和 RNP 处理的水稻根系生物量、根长、根表面积、根



(图中小写字母不同表示同一采样日不同土层间差异达 $P<0.05$ 显著水平；DAF 表示基肥施入后天数，下图同)

图 4 RN 处理下土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的动态扩散

Fig. 4 Dynamic diffusion of soil NH_4^+ -N and NO_3^- -N under RN treatment

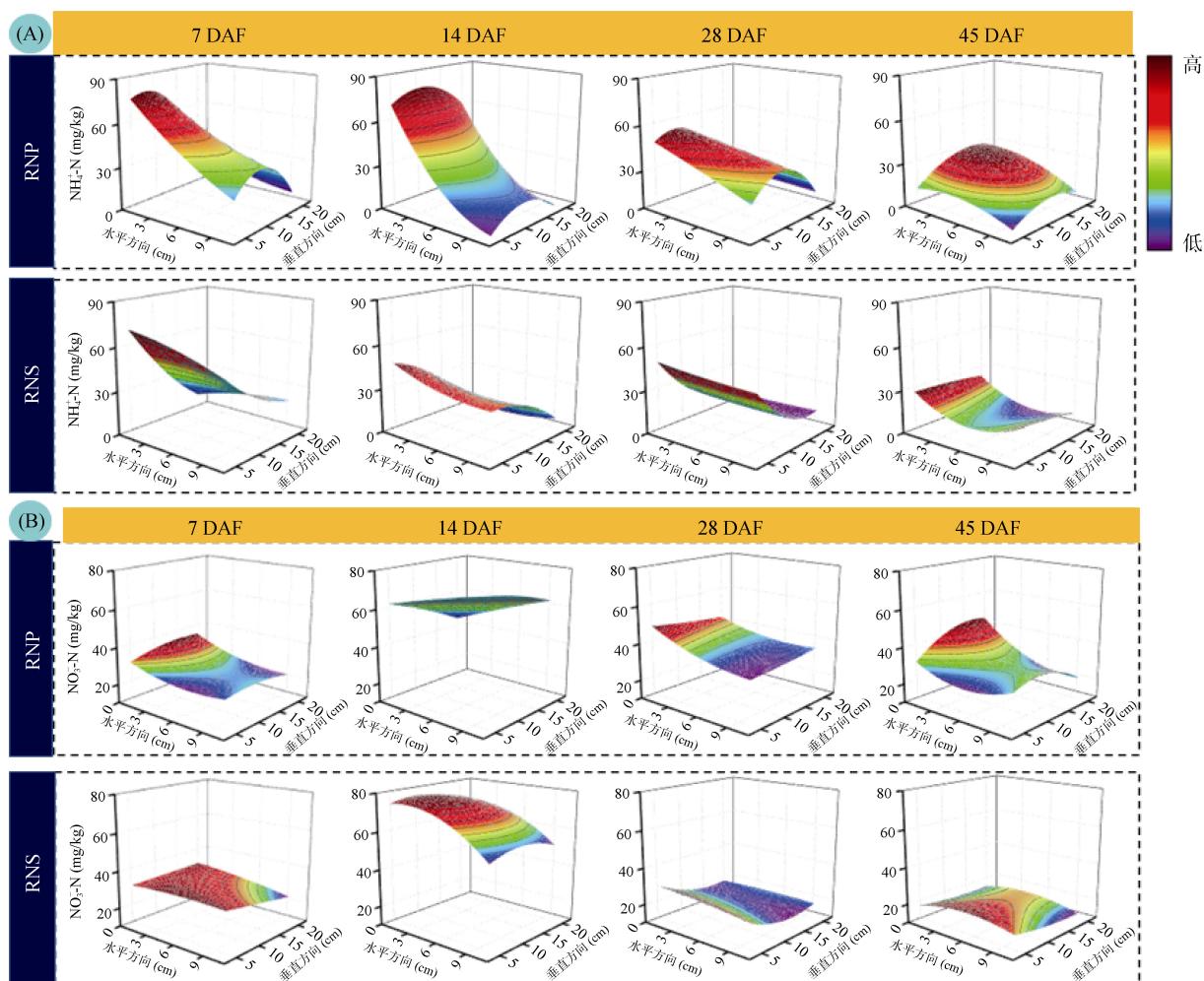


图 5 RNS 和 RNP 处理土壤 NH_4^+ -N (A) and NO_3^- -N (B) 的动态扩散

Fig. 5 Dynamic diffusion of soil NH_4^+ -N (A) and NO_3^- -N (B) under RNS and RNP treatments

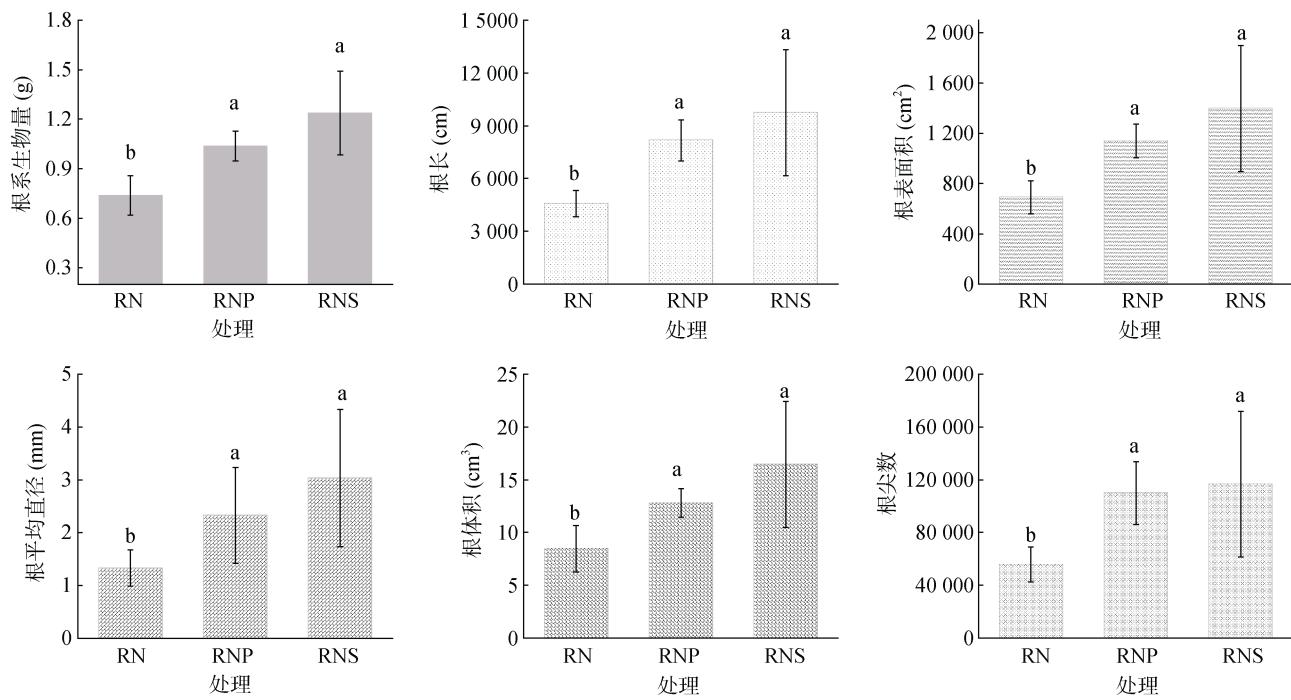
(图中小写字母不同表示处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平)

图 6 水稻分蘖期根系特征
Fig. 6 Rice root parameters at tillering growth stage

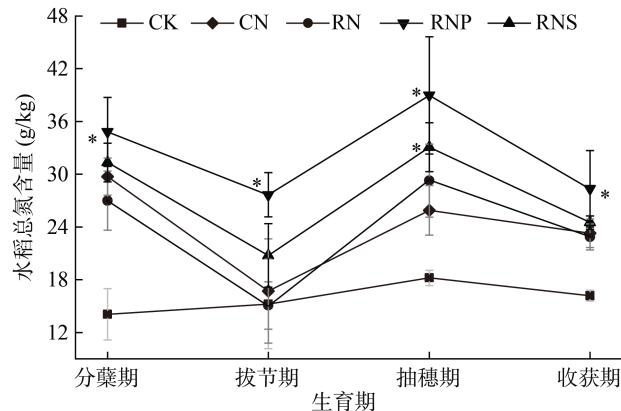
体积、根平均直径与根尖数分别比 RN 处理显著增加 67.80%、40.68%、112.46%、78.07%、101.48%、64.45%，94.19%、50.95%，128.56%、75.38% 和 110.10%、97.82% ($P < 0.05$)。与 RNP 处理相比，RNS 处理的根系生物量、根长、根表面积、根平均直径、根体积和根尖数可进一步提高 19.28%、19.31%、22.51%、30.32%、28.15% 和 6.21%。

相较于 CN 处理，RNS 处理抽穗期水稻地上部分含氮量显著增加 27.26% ($P < 0.05$)，而 RNP 处理的分蘖期、拔节期、抽穗期和收获期水稻地上部分含氮量分别显著增加 17.04%、65.53%、50.68% 和 21.73% ($P < 0.05$) (图 7)。与 RNS 处理相比，RNP 处理下水稻分蘖期、拔节期、抽穗期和收获期地上部分含氮量分别提高 9.99%、24.92%、15.14% 和 13.53%，且水稻产量、吸氮量和氮肥利用率之间存在显著正相关关系 (图 8)。

3 讨论

3.1 不同施氮方式对稻田氨挥发的影响

本文系统探究了表施、侧深施和穴施 3 种施氮方式对稻田氨挥发的影响，结果表明，降低施氮量未显著降低稻田氨挥发损失，且有降低水稻产量的风险 (表 1、表 2)。穴施和侧深施可保障水稻产量稳定或增产，同时显著降低稻田氨挥发排放 (表 1、图 3)，



(* 表示该处理与 CN 间差异达 $P < 0.05$ 显著水平)
图 7 不同处理下水稻不同生育期地上部吸氮量变化
Fig. 7 Changes in rice TN contents at different growth stages under different treatments

主要是因为氮肥深施显著降低田面水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度和 $\text{pH}^{[7]}$ 。然而，施肥深度与氮肥分布是造成不同深施方式氨减排效果差异的主要原因^[13]。减氮侧深施(RNP)的氮肥呈点状分布，土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的迁移受到土壤黏粒和土壤胶体的吸附和离子交换作用的限制^[14-15]。此外，氮肥深施下土壤脲酶活性的降低也有利于降低氨挥发^[16]。相较而言，减氮穴施(RNS)处理下， $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 主要分布在较浅土层(0~10 cm)，由于 NH_4^+ 较易向上迁移，因此田面水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度较高，促进氨挥发产生^[17]。Pearson 相关性结果表明，氮肥利用率的增加

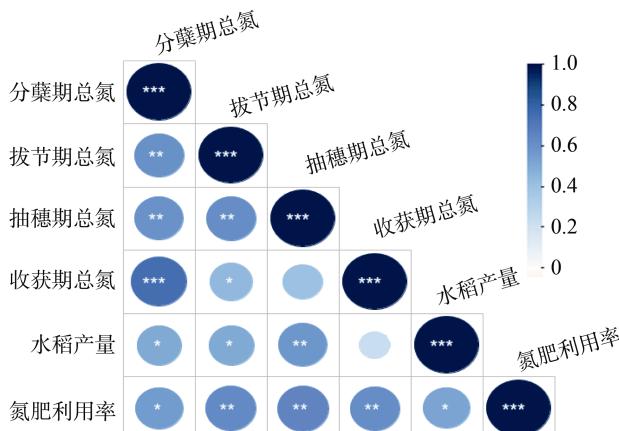


图 8 不同生育期水稻含氮量与水稻产量和氮素回收利用率之间的相关性热图

Fig. 8 The heatmap of Pearson correlation between N content, rice yield, and REN

和土壤氮盈余的降低也有助于减少稻田氨挥发损失(表2、表3)。Chen等^[18]研究结果也发现土壤氮盈余与稻田氨挥发损失显著负相关,然而,氮肥利用率和氨挥发的关系尚不明确。

除氨挥发,土壤NO₃⁻-N的分布可能造成稻田氮素反硝化、淋溶和径流的损失。RNP处理下,NO₃⁻-N的分布更集中于根区范围,其含量有随土壤深度增加而增加的趋势,因此较易发生淋溶损失;而RNS处理的NO₃⁻-N主要分布在0~10 cm土层且易发生水平迁移,因此径流损失风险较大(图5B)。此外,有研究表明,氮肥深施可分别降低42.5%和13.3%的N₂O和N₂损失^[19]。然而,不同深施方式对稻田反硝化的影响有待进一步探究。

3.2 不同氮肥深施方式提高氮肥利用率的机制

与传统表施相比,减氮深施(RNS和RNP)可提高氮肥利用率,其中RNP对水稻增产和氮肥利用率提高的效果最优,因为在穴施条件下,较为发达的根系(图6)以及水稻根区较高的土壤有效氮含量(图5)有助于水稻直接获取氮素养分。此外,穴施的氮肥具有缓释特性,土壤氮素有效性的延长能够增加水稻吸氮量(图7)。相关研究也表明,相较于表施,氮肥穴施的水稻根区高NH₄⁺-N可维持近两个月,并可促进水稻根系生长,增加氮素在水稻生长后期向籽粒中转移,进而提高氮肥利用率^[6-7, 10, 20]。RNS的土壤有效氮分布较为分散(0~10 cm土层),尽管超过88%的根系分布在0~10 cm土层^[21],较高的氮素损失也会降低氮肥利用率。

然而,氮肥穴施下水稻根区较高的NH₄⁺-N含量为处在生长前期的水稻提供过多氮素营养,可能导致水稻秸秆和叶片吸收过多氮素,造成水稻贪青晚熟,

生长期延长^[20]。缓/控释肥或有机无机肥可调节氮素供给,缓解因早期养分过剩造成的水稻贪青晚熟与养分资源浪费^[22-23]。

3.3 穴施与侧深施在水稻集约化生产中的应用前景

现阶段我国水稻生产正由不同尺度的小田块向大规模集约化生产转型,随着我国城镇化和农业生产集约化不断发展,劳动力成本也在不断增加,农业机械化生产是实现农业可持续发展的必然选择。东南亚国家也存在类似问题,以印度尼西亚为例,因机械化率较低,当地农业生产主要依靠人力进行,与人力相比,机械化作业的生产效率提高了近11倍^[24]。简易、高效、低投入、高收益是未来集约化农业的发展方向,虽然穴施的农学和环境效益最高,但如不提高施肥效率、降低成本,穴施将很难在大规模集约化农业生产中推广应用^[20]。

机械侧深施肥技术已在不同地区大面积示范和推广应用,且成效显著^[9, 25]。将侧深施肥技术与插秧机及施肥器相结合能够降低29.1%~59.3%和39.0%~65.6%的径流和氨挥发损失,同时生产每公顷水稻可节约标准煤211.6 kg^[9]。因此,机械侧深施肥技术高产、高效、环保、经济等优势可有效推动我国农业现代化进程。然而,从2001年到2010年,我国可用机械每年仅增长0.75%^[24]。近些年,我国施肥机械的研发与应用已取得较大进展,如:颗粒肥料深施器、机械插秧侧深施肥等已在部分地区示范应用,并取得较好的农学、环境和经济效益^[9, 26]。因此,大力开发施肥机械,提高农业机械化水平是我国农业可持续发展亟待解决的问题。然而,侧深施肥与穴施相比在水稻生产的农学和环境效益等方面仍存在差距,因此,在提高农业机械化水平的同时,有必要采取优化措施进一步提高侧深施肥技术的生产效率和综合效益。

4 结论

氮肥深施可显著降低稻田氨挥发排放并提高氮肥利用率,其中,穴施的农学和环境效益最高,但因穴施机械及肥料造粒技术等因素的限制,还难以在实际生产中推广应用;而侧深施肥的水稻生产效益较高,是目前我国水稻大规模集约化生产中切实可行的施肥方式。

参考文献:

- [1] Kang Y N, Liu M X, Song Y, et al. High-resolution ammonia emissions inventories in China from 1980 to 2012[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16(4): 2043–2058.

- [2] Wang H Y, Zhang D, Zhang Y T, et al. Ammonia emissions from paddy fields are underestimated in China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 235: 482–488.
- [3] 王海, 席运官, 陈瑞冰, 等. 太湖地区肥料、农药过量施用调查研究[J]. *农业环境与发展*, 2009, 26(3): 10–15.
- [4] Wu L A, Chen X P, Cui Z L, et al. Improving nitrogen management via a regional management plan for Chinese rice production[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(9): 095011.
- [5] 晏娟, 沈其荣, 尹斌, 等. 太湖地区稻麦轮作系统下施肥量对作物产量及氮肥利用率影响的研究[J]. *土壤*, 2009, 41(3): 372–376.
- [6] Liu T Q, Fan D J, Zhang X X, et al. Deep placement of nitrogen fertilizers reduces ammonia volatilization and increases nitrogen utilization efficiency in no-tillage paddy fields in central China[J]. *Field Crops Research*, 2015, 184: 80–90.
- [7] Nkebiwe P M, Weinmann M, Bar-Tal A, et al. Fertilizer placement to improve crop nutrient acquisition and yield: A review and meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2016, 196: 389–401.
- [8] 巨晓棠, 张翀. 论合理施氮的原则和指标[J]. *土壤学报*, 2021, 58(1): 1–13.
- [9] Min J, Sun H J, Wang Y, et al. Mechanical side-deep fertilization mitigates ammonia volatilization and nitrogen runoff and increases profitability in rice production independent of fertilizer type and split ratio[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 316: 128370.
- [10] Zhong X M, Zhou X, Fei J C, et al. Reducing ammonia volatilization and increasing nitrogen use efficiency in machine-transplanted rice with side-deep fertilization in a double-cropping rice system in Southern China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 306: 107183.
- [11] Cao Y S, Tian Y H, Yin B, et al. Assessment of ammonia volatilization from paddy fields under crop management practices aimed to increase grain yield and N efficiency[J]. *Field Crops Research*, 2013, 147: 23–31.
- [12] 田玉华, 曾科, 尹斌. 基于不同监测方法的太湖地区稻田基蘖肥期氨排放研究[J]. *土壤学报*, 2019, 56(5): 1180–1189.
- [13] 邓美华, 尹斌, 张绍林, 等. 不同施氮量和施氮方式对稻田氨挥发损失的影响[J]. *土壤*, 2006, 38(3): 263–269.
- [14] Griggs B R, Norman R J, Wilson C E, et al. Ammonia volatilization and nitrogen uptake for conventional and conservation tilled dry-seeded, delayed-flood rice[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(3): 745–751.
- [15] Liu X W, Wang H Y, Zhou J M, et al. Effect of N fertilization pattern on rice yield, N use efficiency and fertilizer-N fate in the Yangtze River Basin, China[J]. *PLoS One*, 2016, 11(11): e0166002.
- [16] Soares J R, Cantarella H, de Campos Menegale M L. Ammonia volatilization losses from surface-applied urea with urease and nitrification inhibitors[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 52: 82–89.
- [17] Pan W L, Madsen I J, Bolton R P, et al. Ammonia/ammonium toxicity root symptoms induced by inorganic and organic fertilizers and placement[J]. *Agronomy Journal*, 2016, 108(6): 2485–2492.
- [18] Chen G, Zhao G H, Cheng W D, et al. Rice nitrogen use efficiency does not link to ammonia volatilization in paddy fields[J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 741: 140433.
- [19] Xia L L, Li X B, Ma Q Q, et al. Simultaneous quantification of N_2 , NH_3 and N_2O emissions from a flooded paddy field under different N fertilization regimes[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(4): 2292–2303.
- [20] Yao Y L, Zhang M, Tian Y H, et al. Urea deep placement for minimizing NH_3 loss in an intensive rice cropping system[J]. *Field Crops Research*, 2018, 218: 254–266.
- [21] 张玉, 秦华东, 黄敏, 等. 水稻根系空间分布特性的数学模拟及应用[J]. *华南农业大学学报*, 2013, 34(3): 304–308.
- [22] Aulakh M S, Khera T S, Doran J W, et al. Yields and nitrogen dynamics in a rice-wheat system using green manure and inorganic fertilizer[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(5): 1867–1876.
- [23] Kumar K A, Swain D K, Bhadoria P B S. Split application of organic nutrient improved productivity, nutritional quality and economics of rice-chickpea cropping system in lateritic soil[J]. *Field Crops Research*, 2018, 223: 125–136.
- [24] Paman U, Inaba S, Uchida S. The mechanization of small-scale rice farming: Labor requirements and costs[J]. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2014, 7(3): 122–126.
- [25] Zhu C H, Xiang J, Zhang Y P, et al. Mechanized transplanting with side deep fertilization increases yield and nitrogen use efficiency of rice in Eastern China[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 5653.
- [26] 刘爱云, 高建国, 杨正华. 机械侧深施肥对水稻产量及氮肥利用率的影响[J]. *上海农业科技*, 2020(3): 86–87.