

辛志远, 王昌全, 申亚珍, 等. 水基包衣控释掺混肥料一次性施用对单季稻氮素利用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 109–114.

XIN Zhi-yuan, WANG Chang-quan, SHEN Ya-zhen, et al. Effect of single application of water-borne polymer coated controlled-release blend fertilizer on nitrogen utilization in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(1): 109–114.

水基包衣控释掺混肥料一次性施用 对单季稻氮素利用的影响

辛志远¹, 王昌全^{1*}, 申亚珍², 马 菲², 周健民², 杜昌文^{2*}

(1.四川农业大学资源学院, 成都 611130; 2.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)

摘要:通过田间小区试验研究一次性简化施肥对水稻产量和氮素吸收利用的影响, 为水稻简化高效施肥提供技术支撑。以水稻品种南粳 46 为试验材料, 设置常规分次施肥处理和水基包衣控释掺混肥料(控释氮占 30%)一次性简化施用处理, 在施肥后利用红外光声光谱法监测农田顶空 NH_3 和 N_2O 浓度, 并测定植株各部位氮素积累量和不同生育期土壤铵态氮与硝态氮含量。结果表明, 与常规分次施肥相比, 一次简化施肥处理将产量从 $6\,201.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 提高到 $6\,506.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 在观测期内常规分次施肥处理的土壤顶空 NH_3 和 N_2O 平均浓度为 $19.14, 8.40\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 而一次简化施肥处理则分别为 $18.63, 7.74\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 氮肥气态损失相对减少, 同时土壤中残留的硝态氮与铵态氮有增加的趋势。因此, 常规分次施肥的农学利用率为 $7.81\text{ kg 籽粒}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ N}$, 而一次简化施肥处理农学利用率为 $9.09\text{ kg 籽粒}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ N}$ 。综上, 水基包衣控释掺混肥料可以实现水稻一次性施肥, 在保证产量的基础上实现氮素利用率的提升, 为水稻简化高效施肥提供了技术支撑。

关键词:水基包衣控释肥料; 一次简化施肥; 氮素利用; 土壤顶空; 氮挥发; 氧化亚氮排放

中图分类号: S158.2 文献标志码: A 文章编号: 1672–2043(2016)01–0109–06 doi:10.11654/jaes.2016.01.015

Effect of single application of water-borne polymer coated controlled-release blend fertilizer on nitrogen utilization in rice

XIN Zhi-yuan¹, WANG Chang-quan^{1*}, SHEN Ya-zhen², MA Fei², ZHOU Jian-min², DU Chang-wen^{2*}

(1.College of Resource and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2.The State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: A field experiment was conducted to study the effects of one-time fertilization of water-borne polymer coated controlled release blend fertilizer on rice growth, rice yield, plant nitrogen absorption, soil nitrogen dynamics and nitrogen-containing gas emissions (NH_3 and N_2O). Rice cultivar used was Nanjing 46. Three treatments were no fertilization, conventional fertilization, and one-time fertilization of water-borne polymer coated controlled release blend fertilizer (controlled release nitrogen accounted for 30%). One-time fertilization treatment increased rice yield to $6\,506.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ from $6\,201.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ in the conventional fertilization, but slightly reduced NH_3 and N_2O average concentrations in soil headspace to $18.63\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ and $7.74\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ from $19.14\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ and $8.40\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ in the conventional fertilization, respectively. The residual nitrate nitrogen and ammonium nitrogen in soil showed an increase tendency in the one-time fertilization. The agronomic efficiency of nitrogen was $7.81\text{ kg grain}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ N}$ for the conventional fertilization, while it was $9.09\text{ kg grain}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ N}$ for the one-time fertilization. Therefore, the one-time fertilization showed more stable nitrogen supply, and also improved nitrogen utilization efficiency.

Keywords: water-borne polymer coated controlled release blend fertilizer; one-time fertilization; nitrogen utilization; soil headspace; ammonia volatilization; nitrous oxide emission

收稿日期: 2015–07–22

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(201303103); 国家“973”项目(2015CB150403); 四川省科技支撑计划(2012JZ0003)

作者简介: 辛志远(1992—), 男, 四川人, 硕士研究生, 主要从事控释肥料应用与示范研究。E-mail: 295046116@qq.com

* 通信作者: 王昌全 E-mail: w.changquan@163.com; 杜昌文 E-mail: chwdu@issas.ac.cn

水稻是我国的主要粮食作物之一,种植面积约占总耕地面积的25%^[1]。氮肥对水稻的高产起着重要的支撑作用^[2],然而氮肥的不合理施用导致作物利用率较低,目前我国当季氮肥利用率为35%~50%^[3],大部分氮素损失到环境中,导致温室气体排放增加以及水体富营养化加剧。因此,提高氮素利用率成为农业生产中最为关注的问题之一^[4-5]。

在水稻生产中,含氮气体排放(如 NH_3 和 N_2O)是氮肥损失主要途径之一,因而受到广泛关注^[6-7]。 NH_3 挥发是尿素施入农田后的主要损失途径^[8-9],其损失量高达施氮量的40%~50%^[10-11]; N_2O 排放在氮素损失中也占到较大比例,同时对大气温室效应也具有较大贡献,仅次于 CH_4 和 CO_2 ^[12]。要提高氮素利用率,关键是让氮肥供应与作物需求相匹配,以增加吸收利用,进而减小排放损失。缓控释肥料为有效提高氮素利用提供了可能途径^[13-15],通常认为缓控释肥施用后,肥料养分的供应与植物需求基本一致,可防止土壤中有效氮过量的现象,明显减少施用过程中肥料氮素的损失量^[16]。

水基聚合物包衣控释肥料是近几年来商品化的控释肥料品种之一,和国内外主流聚合物包膜控释肥料相比,具有控释更灵活、环境更友好和生产成本较低的优势^[17-19]。但是,由于水基聚合物包衣控释肥需经包衣再加工,其价格还是显著高于常规速效氮肥,在实际大田生产应用中受到限制。通过掺混一定比例的控释氮肥,一次性简化施用,速效氮部分保证前期氮的供应,而控释氮部分保证中后期供应,不但能与作物需氮相匹配,保证作物产量,同时也能显著降低肥料成本和施肥成本,具有较明显的应用潜力。

本研究以水基聚合物包衣控释肥料为原料,通过控释掺混的方式一次性简化施用,与常规分次施用相比较,综合分析氮素吸收利用、土壤氮素残留以及含氮气体排放,研究其对水稻产量及氮素利用的影响,为简化高效施肥提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验在中国科学院南京土壤研究所汤泉试验基地进行。供试水稻土 pH6.00,有机质为 $22.26\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $1.31\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 $15.41\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $146.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。水稻品种为南粳46。供试常规肥料为绿聚能复合肥,N、P、K比例为16:8:18,江苏中东集团公司生产提供);艾萨斯水基聚合物包衣控释尿素含氮

41.8%,控释期为三个月,静水 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 溶出,江苏艾萨斯新型肥料工程技术有限公司生产提供,水基包膜材料环境友好,其养分释放曲线呈“S”型,养分释放主要受温度和水分影响,大颗粒尿素含氮46.4%,鲁西化工集团公司生产提供。

1.2 试验设计

试验设三个处理:不施肥对照(T1)、当地习惯分次施肥处理(T2)和水基聚合物控释掺混肥处理(T3)。T2处理N、P、K肥的施用量为 $\text{N } 240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $\text{P}_2\text{O}_5\text{ } 60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $\text{K}_2\text{O } 135\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,以尿素、磷二铵和硫酸钾形式一次性基施,氮肥分为基肥、分蘖肥、穗肥(比例为5:2:3)三次施用;T3处理中N、P、K肥的施用量与T2处理保持一致,但所施氮肥中30%的氮由水基聚合包衣控释尿素替代,N、P、K一次性基施。每个处理四次重复,每个试验小区面积为 $40\text{ m}^2(4\text{ m}\times 10\text{ m})$,种植密度为 $20\text{ cm}\times 15\text{ cm}$ 。各处理的灌溉、施药等田间管理措施完全一致。水稻于2014年6月19日插秧,11月18日收获。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 植株含氮量

植株样与土壤样均在每个生育期的后期采集,以避免刚施肥或追肥不久就采样,不能准确反映肥效。分别在分蘖期(2014年7月10日)、拔节期(8月1日)、齐穗期(9月25日)和成熟期(11月15日)随机选择每个小区的三穴水稻,分为茎、叶、穗和根放入采样袋,在烘箱 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 杀青、 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重后称量,并用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 联合消煮,凯氏定氮法测定植株全氮。

1.3.2 土壤铵态氮与硝态氮浓度

分别在分蘖期、拔节期、齐穗期和成熟期在每个小区土壤表层(0~15 cm)取土,用 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氯化钾浸提,然后振荡1 h并过滤,再用间断式化学分析仪(SmartChem 200, Alliance, France)测定土壤铵态氮与硝态氮含量。

1.3.3 土壤温度测量

将水银温度计插入稻田土壤5 cm深处,每天14:00读数并记录。

1.3.4 土壤顶空 NH_3 和 N_2O 浓度

测定方法是基于红外光声效应的土壤顶空 NH_3 和 N_2O 浓度原位检测。在施肥后(2014年6月18日到7月30日)不下雨的情况下,于每天气温最高的14:00(有利于气体挥发)在每个小区随机选取4个位点,用注射器抽取水面上空1 cm左右高度处空气,注

入干燥真空的 200 mL 特氟龙气体采样袋密封待测。使用傅里叶变换红外光谱仪 (Nicolet 6700, Thermo Fisher, USA) 和气体光声检测附件 (PA101, Gasera, Finland) 对气体扫描, 并在中红外波段进行光谱采集。扫描速率为 32 次、分辨率为 4 cm^{-1} 、动镜速率为 $0.16\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 采用小波变换对气体原始光谱进行平滑处理, 利用标准浓度的气体与峰高建立模型。 NH_3 定量分析的吸收峰位于 $920\sim 990\text{ cm}^{-1}$, N_2O 定量分析的吸收峰位于 $1220\sim 1340\text{ cm}^{-1}$ [20]; NH_3 测定的检测限为 $0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, N_2O 的检测限为 $0.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.3.5 氮肥利用率计算

氮肥农学利用率=(施氮处理籽粒产量-空白处理籽粒产量)/施氮量

氮肥当季利用率=(施氮处理植株吸氮量-空白处理植株吸氮量)/施氮量 $\times 100\%$ [21]

1.4 数据分析

光谱数据使用 Matlab 处理, 其他数据均使用 Excel 2007 计算, 使用 IBM SPSS statistics 20 进行样本数据的差异显著性统计分析, 利用 Excel 2007 作图。

2 结果与讨论

2.1 植株氮素含量

如表 1 所示, 所有处理的植株总氮量在各个时期持续增加, 其中 T2 与 T3 处理的各部位氮素累积量在各时期均没有显著差异, 但不同生育阶段氮素累积量高低变化不同。

在分蘖期与拔节期, T3 处理叶与茎中氮素累积量均高于 T2 处理; 在齐穗期, 由于之前追施穗肥, T2 处理茎、叶及穗中氮素累积量高于 T3 处理; 到了成熟期, T2 处理叶与茎中氮素累积量高于 T3 处理, 但穗中氮素累积量却低于 T3 处理, 虽然 T2 和 T3 之间没有显著差异, 但后期 T3 处理氮素具有更容易转到穗部的趋势。与 T1 处理相比, T3 处理叶中氮素累积量在分蘖期、拔节期、齐穗期和成熟期分别增加了 246%、156%、102% 和 152%; 茎中氮素累积量分别增加了 168%、147%、72% 和 188%; 穗中氮素累积量增加了 65% 和 80% (齐穗期与成熟期); 植株总氮素累积量分别增加了 219%、153%、90% 和 112%。与 T2 处理相比, T3 处理叶中氮素累积量在分蘖期和拔节期分别增加了 7.1% 和 4.9%, 但在齐穗期与成熟期分别减少了 7.1% 和 8.9%; 茎的氮素累积量在分蘖期和拔节期分别增加了 10.7%、12.8%, 但在齐穗期与成熟期分别减少 3.2% 和 7.4%; 穗的氮素累积量在齐穗期

表 1 不同施肥处理下水稻各生育阶段氮素累积量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

Table 1 Nitrogen accumulation in rice plant at different growth stages ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

部位 Tissue	处理 Treatment	分蘖期 Tillering stage	拔节期 Jointing stage	齐穗期 Full heading stage	成熟期 Mature period
叶 Leaf	T1	12.43b	21.67b	39.08b	13.72b
	T2	40.26a	52.87a	85.11a	37.90a
	T3	43.12a	55.46a	79.08a	34.51a
茎 Stem	T1	6.74b	10.93b	26.84b	21.99b
	T2	16.33a	23.91a	47.57b	68.31a
	T3	18.08a	26.97a	46.04b	63.24a
穗 Panicle	T1	—	—	11.71b	69.55b
	T2	—	—	20.83a	116.43a
	T3	—	—	19.31a	125.51a
合计 Total	T1	19.17b	32.6b	65.92b	105.26b
	T2	56.59a	76.78a	132.68a	222.64a
	T3	61.20a	82.43a	125.12a	223.26a

注: 同列同部位数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平。

Note: Values followed by different letters within a column and the same tissue are significantly different between treatments at 5% level.

减少了 7.3%, 但在成熟期增加了 7.8%; 植株总氮素累积量与 T2 处理没有明显差别。

2.2 水稻氮素农学利用率和当季利用率

从表 2 可以看出, 与不施肥处理 (T1) 相比, T2 与 T3 处理都增加了水稻籽粒的产量。T2 处理的茎与叶氮含量高于 T3 处理, 但穗氮含量较低, T2 与 T3 处理的氮肥当季利用率没有显著差别, 但 T3 处理的氮肥农学利用率明显高于 T2 处理。与 T1 处理相比, T3 处理籽粒产量增加了 50.4%; 与 T2 处理相比, T3 处理籽粒产量增加了 4.9%, 氮肥当季利用率增加了 0.53%, 氮肥农学利用率增加了 16.4%。以上结果表明, T3 处理能保证水稻产量和氮肥利用率稳定且有增加趋势。

表 2 不同施肥处理对水稻氮素利用率的影响

Table 2 Nitrogen use efficiencies in rice under different fertilization treatments

处理 Treatment	籽粒产量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ Grain yield	氮素农学利用率/ $\text{kg 籽粒}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ 氮}$ Agronomic efficiency	氮素当季利用率/% Nitrogen utilization efficiency
T1	4 326.45b	—	—
T2	6 201.90a	7.81	48.91
T3	6 506.85a	9.09	49.17

注: 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平。

Note: Values followed by different letters in a column are significantly different between treatments at 5% level.

2.3 水稻土壤表层铵态氮与硝态氮含量

由于水稻土壤长期处于淹水状态,硝化作用被强烈抑制,水稻田氮素形态以铵态氮为主^[2]。由图1可以看出,T1处理土壤铵态氮一直处于较低水平。T2处理在拔节期处于很低状态,齐穗期有一些上升,成熟期又迅速下降。T3处理处于持续降低状态,在齐穗期时降至最低。在分蘖期,水稻对土壤氮素需求量大,T3处理与T2处理均供给了充足的铵态氮,分别为60.2、45.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,促进了水稻的分蘖;在拔节期,T3处理土壤铵态氮含量降至22.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而T2处理已经降至12.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,接近T1处理;在齐穗期,由于T3处理是一次性施肥,且有70%是速效氮,土壤铵态氮已经接近T1处理,而T2处理由于穗肥施用,铵态氮含量有小幅上升,达到21.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;到了成熟期,T2处理的土壤铵态氮含量也与T1基本一致。

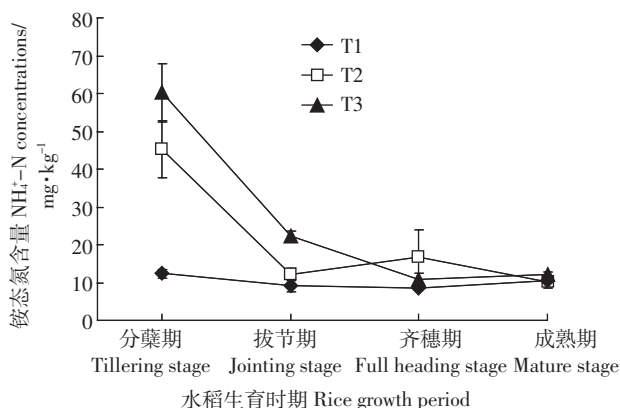


图1 不同生育时期土壤铵态氮含量

Figure 1 Soil ammonium nitrogen content at different growth stage

由图2可以看出,T1、T2与T3处理在各生育期的土壤硝态氮含量基本一致。在分蘖期与拔节期,由于水稻田淹水,硝化作用被强烈抑制,各处理的土壤硝态氮含量均十分低。到了齐穗期与成熟期,稻田排水,土壤通气,硝化细菌活跃,土壤硝态氮含量有所上升,但其总量明显低于铵态氮。

水稻土壤供给的氮以铵态氮为主,T3处理在分蘖期与拔节期供氮量高于T2处理,但到齐穗期时,氮素释放很少,低于追施穗肥的T2处理。因为在前期T3处理已经积累了足够的氮素,所以在成熟期T3处理的氮素积累不低于T2处理,甚至籽粒含氮量高于T2处理。

2.4 土壤顶空 NH_3 浓度

土壤顶空 NH_3 浓度与 NH_3 挥发密切相关。从图3可以看出,T2与T3处理均在施肥后第2d出现

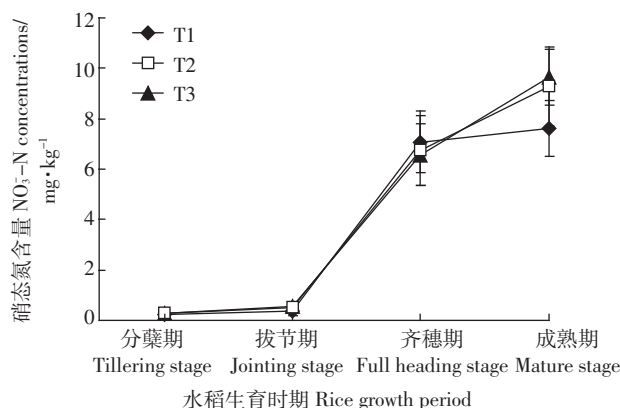


图2 不同生育时期土壤硝态氮含量

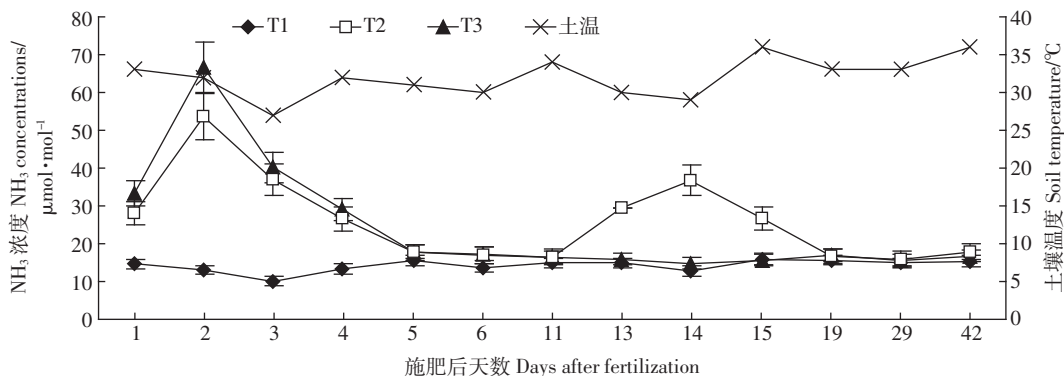
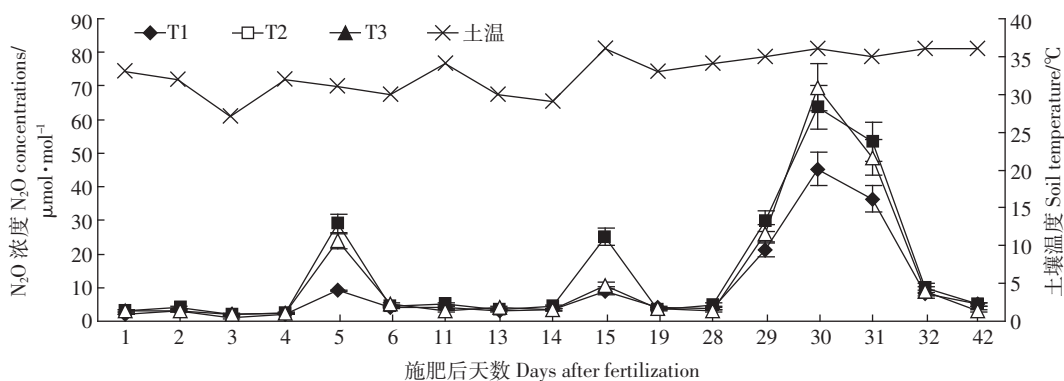
Figure 2 Soil nitrate nitrogen content at different growth stage

NH_3 挥发峰值,分别为53.7、66.7 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。第二次出现 NH_3 挥发峰是在施肥后第14d (T2处理追肥后的第2d),T2处理出现36.78 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 的峰值。两次 NH_3 挥发峰均出现在施肥后的第2d,并在6d内逐渐降低,趋于平稳。从图3可以看出土壤温度变化与T1的 NH_3 挥发浓度变化趋势是一致的,但对施肥处理影响不明显。

T3处理是一次性施肥,且控释氮肥只占30%,因此第一次 NH_3 挥发峰值高于T2处理。T2处理追肥后,出现明显 NH_3 挥发峰,但是同时段内的T3处理顶空 NH_3 浓度明显降低,即追肥增加了 NH_3 排放。在历时42d的监测期内,T2处理 NH_3 挥发平均浓度为19.14 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,T3处理 NH_3 挥发平均浓度为18.63 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,总体上T3处理的 NH_3 挥发损失小于T2处理。

2.5 土壤顶空 N_2O 浓度

土壤顶空 N_2O 浓度也与 N_2O 排放密切相关。从图4可以看出, N_2O 动态与 NH_3 明显不同, N_2O 峰明显滞后,且T2分别在施肥后的第5、15d (T2处理追肥后的第3d) 和第30d出现三个峰值,前两个峰较小,第三个峰值较大,其浓度分别为29.01、25.09、63.56 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。T3处理在第5d和第30d分别出现一个小峰值和一个大峰值,浓度分别为24.10、69.58 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。两个处理的 N_2O 小排放峰与施肥有关,而在第30d之所以出现较大排放峰,是因为施肥后第29~31d进行了排水晒田。在监测期内,T2处理 N_2O 挥发平均浓度为8.40 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,T3处理 N_2O 挥发平均浓度为7.74 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。由此可以看出, N_2O 排放除了与施肥有关外,还与干湿交替有关,且在排水晒田期出现峰值,而在淹水条件下 N_2O 排放

图3 不同施肥的处理对土壤顶空 NH_3 浓度的影响Figure 3 Effects of different fertilization on NH_3 concentrations in soil headspace图4 不同施肥处理对土壤顶空 N_2O 浓度的影响Figure 4 Effects of different fertilization on N_2O concentrations in soil headspace

较少。

土壤中 N_2O 的产生主要源于土壤中微生物参与的硝化和反硝化反应,而硝化及反硝化细菌的活性受制于水、气、热等条件。土壤含水量很低或长期持续淹水都不利于硝化及反硝化细菌的生长,对稻田土壤来说,土壤水分含量始终处于很高的状态,这时土壤通气性就有可能成为微生物活性最重要的制约因素。土壤由于持续淹水而处于缺氧和强还原状态, N_2O 的产生以反硝化作用为主,但这时反硝化作用产生的 N_2O 可以被 N_2O 还原酶还原为 N_2 ,而且加上水层对 N_2O 向大气扩散过程的阻隔及对 N_2O 的少量溶解,导致淹水期间稻田向大气排放的 N_2O 量很少^[23]。排水晒田期间,土壤的干湿交替使硝化作用和反硝化作用交替成为 N_2O 的主要产生来源,同时,土壤的干湿交替还能抑制反硝化过程中的深度还原,使 N_2O 的产生量增加^[24-25]。

与传统常用的罩式检测方法相比^[20],土壤顶空的监测方法具有明显的优点:首先,从田间收集的气体不需要添加任何化学试剂,可直接进行光谱扫描,减少了化学实验带来的误差;其次,实验过程简便,直接进行光谱扫描,不需要繁琐的化学实验;其三,罩式方法改

变了罩内的温度、湿度及空气流动等,所得结果可能不同程度地偏离实际情况,而土壤顶空监测方法是原位分析方法,能更好地反映真实情况。本次气体监测试验在每天 14:00 进行,浓度的测定虽然能在一定程度上反映土壤中相关气体的排放状况,但无法准确反映不同气体的排放速率,故在进一步的试验中应当增加每天气体浓度的观测次数和观测位置,并考虑环境因子,进行排放模型构建,以计算不同气体的排放通量。

3 结论

(1)分次施肥处理的氮素当季利用率与一次简化施肥处理没有显著差异,但简化施肥处理的氮素农学利用率较高,其氮肥效率优于分次施肥处理。

(2)在观测期内 T2 处理的土壤顶空 NH_3 和 N_2O 平均浓度分别为 19.14 、 $8.40 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,而 T3 处理的土壤顶空 NH_3 和 N_2O 平均浓度分别为 18.63 、 $7.74 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。水稻田顶空 NH_3 浓度平衡值约为 $15 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,施氮肥会导致其排放量迅速增加;而水稻田顶空 N_2O 浓度平衡值约为 $3 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,干湿交替可导致其排放量迅速增加。

(3)常规肥料掺混水基包衣控释肥料一次性施用,既减少了施肥成本,保证或提高了水稻产量,同时能一定程度上提高水稻氮素利用率,故在简化高效施肥中具有较强的应用潜力。

参考文献:

- [1] Tian K, Zhao Y C, Xu X H, et al. Effects of long-term fertilization and residue management on soil organic carbon changes in paddy soils of China: A meta-analysis[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2015, 204: 40–50.
- [2] 杨梢娜, 俞巧钢, 叶静, 等. 施氮水平对杂交晚粳“浙优12”产量及氮素利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(5): 1120–1125.
YANG Shao-na, YU Qiao-gang, YE Jing, et al. Effects of nitrogen fertilization on yield and nitrogen use efficiency of hybrid rice[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(5): 1120–1125.
- [3] 谢建昌. 世界肥料使用的现状与前景[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(4): 321–330.
XIE Jian-chang. Current situation and prospect of world fertilizer use[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4(4): 321–330.
- [4] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, et al. Nitrogen cycles: Past, present and future[J]. *Biogeochemistry*, 2004, 70(2): 153–226.
- [5] Deng F, Wang L, Ren W J, et al. Enhancing nitrogen utilization and soil nitrogen balance in paddy fields by optimizing nitrogen management and using polyaspartic acid urea[J]. *Field Crops Research*, 2014, 169: 30–38.
- [6] Cai G X, Chen D L, Ding H, et al. Nitrogen loss from fertilizers applied to maize-wheat and rice in the North China Plain[J]. *Nutrient Cycling in Agro-Ecosystems*, 2002, 63: 187–195.
- [7] Zhu Z L, Wen Q. Soil nitrogen in China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992.
- [8] Yang Y C, Zhang M, Li Y C, et al. Controlled-release urea commingled with rice seeds reduced emission of ammonia and nitrous oxide in rice paddy soil[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(6): 1661–1673.
- [9] Cao J L, Tian G M, Ren L T. Ammonia volatilization from urea applied to the field of wheat and rice in southern Jiangsu Province[J]. *J Nanjing Agric Univ*, 2000, 23(4): 51–54.
- [10] Shen S M. Contribution of nitrogen fertilizer the development of agriculture and its loss in China[J]. *Acta Pedol Sin*, 2002, 39: 12–25.
- [11] Tian G M, Cao J L, Cai Z C, et al. Ammonia volatilization from winter wheat field top-dressed with urea[J]. *Pedosphere*, 1998, 4: 331–336.
- [12] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 等. 不同施肥处理对稻田氧化亚氮排放的影响[J]. *中国农业气象*, 2006, 27(4): 273–276.
QIN Xiao-bo, LI Yu-e, LIU Ke-ying, et al. Effects of different fertilization treatments on nitrous oxide emission from paddy field[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2006, 27(4): 273–276.
- [13] Wiedenfeld R P. Rate, timing and slow-release nitrogen fertilizers on cabbage and onions[J]. *Hort Science*, 1986, 21: 236–238.
- [14] Chalk P M, Craswell E T, Polidoro J C, et al. Fate and efficiency of ^{15}N -labelled slow- and controlled-release fertilizers[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015, 102(2): 167–178.
- [15] 何绪生, 李素霞, 李旭辉, 等. 控效肥料的研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(2): 97–106.
HE Xu-sheng, LI Shu-xia, LI Xu-hui, et al. Research progress of control effect fertilizer[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4(2): 97–106.
- [16] 丁洪, 王跃思, 秦胜金, 等. 控释肥对土壤氮素反硝化损失和 N_2O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(5): 1015–1019.
DING Hong, WANG Yue-si, QIN Sheng-jin, et al. Effect of controlled release fertilizer on soil nitrogen denitrification and N_2O emission[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5): 1015–1019.
- [17] Zhao C, Shen Y Z, Du C W, et al. Evaluation of waterborne coating for controlled-release fertilizer using wurster fluidized bed[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2010, 49: 9644–9647.
- [18] Shaviv A. Advances in controlled-release fertilizers[J]. *Advances in Agronomy*, 2001, 71: 1–49.
- [19] Zhou Z J, Du C W, Li T, et al. Biodegradation of a biochar-modified waterborne polyacrylate membrane coating for controlled-release fertilizer and its effects on soil bacterial community profiles[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22: 8672–8682.
- [20] Du C W, Wang J, Zhou J, et al. *In situ* measurement of ammonia concentration in soil headspace using Fourier transform mid-infrared photoacoustic spectroscopy[J]. *Pedosphere*, 2015, 25(4): 605–612.
- [21] 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.
PENG Shao-bing, HUANG Jian-liang, ZHONG Xu-hua, et al. Research methods of improving the utilization ratio of nitrogen fertilizer in paddy field in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(9): 1095–1103.
- [22] 朱兆良, 张福锁. 主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用的基础研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
ZHU Zhao-liang, ZHANG Fu-suo. Basic research on nitrogen behavior and efficient use of nitrogen fertilizer in main field ecosystem[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [23] 曹金留, 徐华, 张宏康, 等. 苏南丘陵区稻田氧化亚氮的排放特点[J]. *生态学杂志*, 1999, 18(3): 6–9.
CAO Jin-liu, XU Hua, ZHANG Hong-kang, et al. The emission characteristics of south of Jiangsu hilly area of paddy field nitrous oxide[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(3): 6–9.
- [24] 王智平, 曾江海, 张玉铭. 农田土壤 N_2O 排放的影响因素[J]. *农业环境保护*, 1994, 13(1): 40–42.
WANG Zhi-ping, ZENG Jiang-hai, ZHANG Yu-ming. Factors affecting the N_2O emissions from agricultural soils[J]. *Agro-environmental Protection*, 1994, 13(1): 40–42.
- [25] 封克, 殷士学. 影响氧化亚氮形成与排放的土壤因素[J]. *土壤学进展*, 1995, 23(6): 35–40.
FENG Ke, YIN Shi-xue. Effect of nitrous oxide formation and emission factors of soil[J]. *Progress in Soil Science*, 1995, 23(6): 35–40.