

汤英,董金龙,王媛华,等. 一次性施用草酰胺对水稻产量、氮肥利用率、氨挥发和氮素渗漏损失的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(5):50-55,74. doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.05.013

一次性施用草酰胺对水稻产量、氮肥利用率、氨挥发和氮素渗漏损失的影响

汤英^{1,2},董金龙^{1,2},王媛华^{1,2},李汛¹,段增强¹

(1. 中国科学院南京土壤研究所/土壤与可持续农业国家重点实验室,江苏南京 210008; 2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:通过连续2年的田间试验,比较一次性施用草酰胺与分次施用的尿素对稻谷产量、氮肥利用率以及稻田氨挥发和渗漏的影响。结果表明,(1)一次性施用草酰胺的籽粒产量较分次施用尿素有一定的增幅,但未达显著水平;(2)一次性施用草酰胺可显著提高水稻籽粒的氮素吸收量,2013年显著提高氮肥利用率;(3)2013年草酰胺、尿素处理的氨挥发损失量占施氮总量的比例分别为26.4%、42.8%,而2014年则为5%、11%;(4)2013、2014年水稻试验中,一次性施用的草酰胺与分次施用的尿素相比,分别减少了11.6%、34.2%的总氮渗漏损失。综上所述,一次性施用的草酰胺可以在保证产量水平的条件下,减少稻田氨挥发和渗漏损失,改善水稻植株氮素营养状况并提高氮肥利用率。

关键词:草酰胺;缓释氮肥;氨挥发;氮素渗漏;水稻

中图分类号: S511.06 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)05-0050-06

氮肥的使用提高了作物产量,从而才能满足日益增长的人口对粮食的需求^[1]。水稻是我国最主要的粮食作物之一,近几十年来,为了获得持续稳定的高产量,在水稻种植过程中化学氮肥的过量使用问题一直很严重^[2],在广泛种植水稻的华东地区尤为严峻^[3]。过量的化学氮肥投入和不当的施肥方式不仅会降低水稻的氮肥利用效率,而且会增加氮素通过稻田渗漏、径流流失和氨挥发、氧化亚氮等排放损失的风险,引起一系列环境问题^[4-7]。已有研究表明,农业污染是地表水体中氮素的主要来源^[8-10]。在长江下游地区的常规氮肥运筹中,速效氮肥(以尿素为主)一般分多次施用,其中1/2以上的氮肥用作基肥于水稻播种或移植时施用,剩下的氮肥用作追肥于水稻生长期分次施用。虽然分次施用可以减少氮肥损失,提高氮肥利用率,但当前由于我国农村青壮劳力大量进入城市工作,导致农业从业人口短缺,农业生产的劳动力成本大大提高。因此,研究施用成本低、氮肥利用率高、环境友好的肥料新品种或稻田氮素管理措施十分迫切。

新型肥料特别是缓/控释氮肥通过控制或减缓氮素释放速率,使肥料氮素释放与作物的需氮规律在时间上尽可能一致,从而减少氮素损失、提高作物氮素利用效率、降低环境污染风险^[11-12]。缓/控释氮肥由于具有较长的肥效期,一般作为基肥一次性施用即可满足作物全生育期对氮素营养的需求,不仅减少了施肥的劳动力投入,而且节省了施肥时间和成本,逐渐成为研究热点^[13-15]。但目前应用较多的包膜类缓/

控释氮肥不仅价格较高,而且存在包膜材料二次污染的风险,阻碍了其在水稻生产中的大规模应用,而草酰胺可以很好地解决这些问题。草酰胺是一种含氮31.8%,微溶于水,且物理、化学稳定性较高的物质,其自身具有良好的氮素缓释能力^[16-18]。草酰胺的氮素养分释放主要依赖于土壤微生物的作用,同时受土壤性质和外界环境条件影响,因此,草酰胺施入土壤后与土壤环境的接触面积也将影响其养分释放。然而,在过去的几十年里由于草酰胺生产成本较高,关于将草酰胺用作缓释肥料的研究较少,且已有研究主要集中在肥效方面,而关于草酰胺施用后对环境的影响研究极少^[19-22]。目前,通过改进合成方法以及新型催化剂的使用大大降低了草酰胺的生产成本,这使得在水稻生产中广泛使用草酰胺成为可能^[23]。

因此,本研究首先通过室内土壤培养试验遴选出缓释效果好、肥效期能够满足水稻生长需求的适宜粒径草酰胺颗粒肥,而后在大田栽培的水稻上通过2年的田间试验,比较研究一次性施用的草酰胺颗粒肥与传统分次施用的尿素对水稻产量、氮肥利用率以及氮肥的氨挥发和渗漏损失的影响,以期草酰胺在实际生产中的推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区域概况

试验区域位于长江下游的江苏省丹阳市(31°59'37.8"N, 119°30'14.1"E),区域种植结构长期以稻—麦轮作为主,选择集中连片的稻—麦轮作种植区并于稻季进行试验布置。试验区域耕层(0~20 cm)土壤为水稻土,pH值(液土质量比为2.5:1.0)为6.62,有机质含量为22.79 g/kg,土壤全氮含量为1.41 g/kg,碱解氮含量为118.91 mg/kg,速效磷含量为7.97 mg/kg,速效钾含量为83.23 mg/kg。

试验区域水稻的常规栽培和田间管理措施为:(1)稻季氮肥施用量为220~260 kg/hm²,其中50%的氮肥作为基肥

收稿日期:2018-04-06

基金项目:国家重点研发计划(编号:2017YFD0800103、2017YFD0800104);中国科学院STS项目(编号:KFJ-SW-STS-142);江苏省科技支撑计划(编号:BE2012407)。

作者简介:汤英(1987—),女,四川成都人,博士,主要从事植物营养与新型肥料等方面的研究。E-mail:ytang@issas.ac.cn。

通信作者:段增强,硕士,研究员,主要从事植物营养、土壤与可持续农业、设施农业等方面的研究。E-mail:zqduan@issas.ac.cn。

施用,30%在分蘖期作追肥施用,20%在抽穗期作追肥施用。(2)由于施用方便、成本低,常规施肥方式主要以撒施、表施为主。(3)水稻生长期,除分蘖期烤田及成熟前1周不灌水外,其他时间保持稻田处于淹水状态,淹水深度为5 cm左右。(4)磷肥(过磷酸钙)和钾肥(氯化钾)作为基肥一次性施用,平均施用量为 70 kg/hm^2 (P_2O_5)和 40 kg/hm^2 (K_2O)。

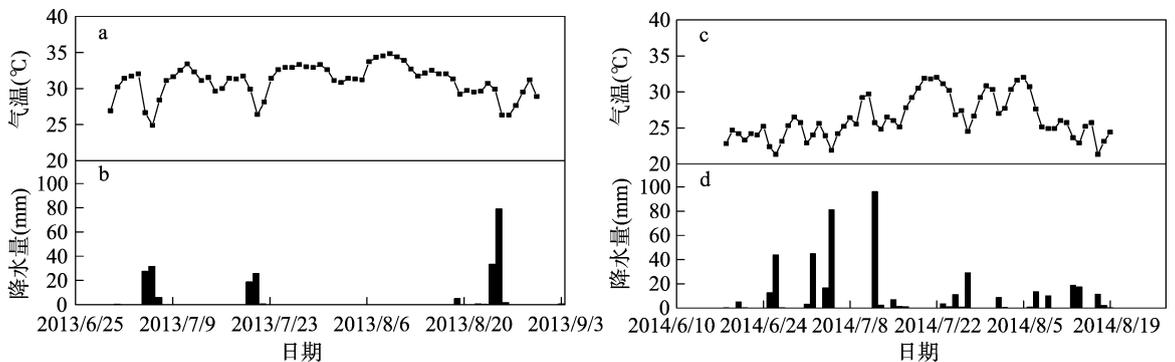
试验期间当地日均气温与降水数据来源于江苏省丹阳市气象局,由图1可知,降水事件发生时,日平均气温明显下降。试验区域日均气温在2013年稻季变化幅度为 $24.9 \sim 34.8 \text{ }^\circ\text{C}$,2014年为 $21.3 \sim 32.0 \text{ }^\circ\text{C}$,平均日均气温为 $31.0 \text{ }^\circ\text{C}$ (2013年)和 $26.3 \text{ }^\circ\text{C}$ (2014年)(图1-a、图1-c)。2013年稻季日均气温 $\geq 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 的天数比2014年多32 d。2013年6月30日至8月30日的总降水量为229.9 mm,2014年6月18日至8月19日总降水量为443.1 mm;在2013、2014年试验期间,分别发生了14、30次降水过程(图1-b、图1-d),2014年试验期间的降水量和降水频率均高于2013年。

1.2 试验设计

采用室内土壤培养方式研究不同粒径草酰胺养分释放特性,试验共设4个处理,为满足破坏性采样需要,每个处理重复30次。试验选择3种粒径草酰胺,分别为粉末状草酰胺(OAp),粒径 $<0.25 \text{ mm}$ (T_1);小粒径草酰胺(OAs), 2.00 mm < 粒径

径 $<2.38 \text{ mm}$ (T_2);大粒径草酰胺(OAb), 3.36 mm < 粒径 $<4.00 \text{ mm}$ (T_3)。按 500 mg N/kg 土的比例分别称取尿素(UR, T_4)以及不同粒径草酰胺加入 100 g 土壤(潮土)中,于塑料杯内充分混合均匀,调节并维持土壤水分含量为田间持水量的75%,密封后放置于 $22 \text{ }^\circ\text{C}$ 恒温培养室中培养。

水稻田间试验共设3个处理:(1)不施氮肥对照(CK);(2)常规施肥处理(UR),尿素分次施用,用量为 225 kg/hm^2 ;(3)草酰胺(2.00 mm < 粒径 $<2.38 \text{ mm}$)处理(OA),草酰胺一次性施用,用量为 225 kg/hm^2 。每个处理重复3次,随机区组排列,小区面积为 50 m^2 ($12.5 \text{ m} \times 4.0 \text{ m}$)。常规施肥处理(UR)中,尿素总施用量的50%在水稻插秧前1~2 d作基肥施用,30%在分蘖期作追肥施用,20%在抽穗期作追肥施用。草酰胺处理(OA)中的草酰胺在水稻插秧前作基肥一次性全部施用。基肥期肥料撒施后随翻耕整地混入土中,追肥施用方式为地表撒施。基肥与追肥施用时间分别为2013年6月30日、7月9日和8月19日,2014年6月18日、6月29日和8月8日。2013年水稻秧苗于7月1日移栽,2014年水稻秧苗于6月19日移栽。所有处理每年均施用相同量的磷肥(过磷酸钙)和钾肥(氯化钾),它们均作为基肥一次性施入,施肥量分别为 40 kg/hm^2 (K_2O)和 70 kg/hm^2 (P_2O_5)。其他田间管理措施同当地习惯。



a 图为 2013 年试验期间日平均气温; b 图为 2013 年试验期间日平均降水量; c 图为 2014 年试验期间日平均气温; d 图为 2014 年试验期间日平均降水量

图1 试验期间日均气温与降水量

1.3 采样与分析

1.3.1 氮素释放特性研究 分别于培养的第3、7、14、21、28、42、56、70、84、105天进行破坏性采样,每次采样随机取3个培养杯,测定土壤中铵态氮、硝态氮含量。土壤铵态氮、硝态氮含量采用 2 mol/L KCl溶液浸提,化学分析仪检测。

氮素累积释放率 = $[(\text{施肥土壤铵态氮含量} + \text{硝态氮含量}) - (\text{对照不施肥土壤铵态氮含量} + \text{硝态氮含量})] \times 100\% / \text{肥料中氮素总量}$ 。

1.3.2 产量与氮肥利用率 作物收获时,对每个小区单独进行人工收割、脱粒、晾晒和测产。分别在各小区中部随机选取一个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 样方,收集样方内全部水稻秸秆和籽粒,并于 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下烘干至恒质量,分别称质量。水稻植株烘干样经机器研磨过 0.5 mm 筛,采用 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$ 法消煮后用化学分析仪测定植物样品内氮含量。稻田土壤基本理化性质按照鲍士旦的常规分析方法^[24]测定。水稻氮肥利用率计算公式为

氮肥利用率 = $(\text{施氮处理水稻氮素吸收量} - \text{不施氮处理水稻氮素吸收量}) / \text{施肥量} \times 100\%$ 。

1.3.3 氨挥发损失 本试验采用抽气密闭室法^[25-26]测定氨挥发速率。收集系统由通气管、气密室、氨固定装置和真空泵组成,其原理是利用真空泵将稻田挥发的氨吸入装有稀硫酸的装置内固定(图2)。气密室为直径 20 cm 、高 15 cm 底部开放的有机玻璃罩,顶部留有直径为 2.5 cm 的通气孔与高为 2 m 的通气杆连通,密闭室内的换气频率为 $15 \sim 20$ 次/min。氨固定装置内盛有 50 mL 0.01 mol/L 稀硫酸,采用靛酚蓝比色法测定吸收的铵态氮浓度。施肥后的第1周每天收集氨挥发量,第2周为隔1 d收集1次氨挥发量,之后每2~3天收集1次直至处理间没有显著差异,降水量较大时不收集。每天分上、下午2次收集,共收集4 h,分别为09:00—11:00、14:00—16:00,以这4 h的氨挥发通量均值作为当天平均通量,计算全天的氨挥发总量即氨挥发速率。水稻氨挥发损失总量为稻季每天的氨挥发量之和,以相邻2次测定的氨挥发量均值来估算未进行氨挥发收集的间隔日氨挥发量。

1.3.4 氮素渗漏损失 试验开始前,使用直径为 10 cm 、长为 120 cm 的取土器在各小区中部随机选点打孔,并埋设多孔

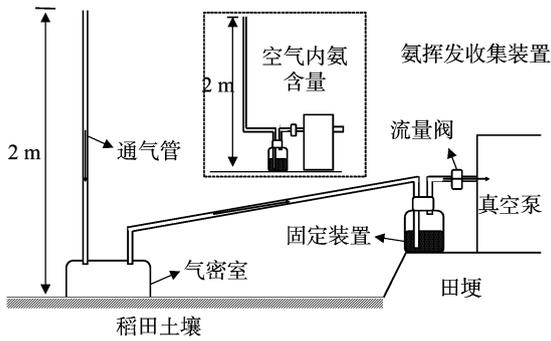
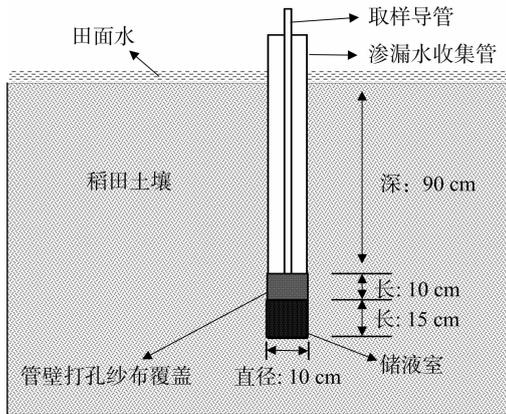
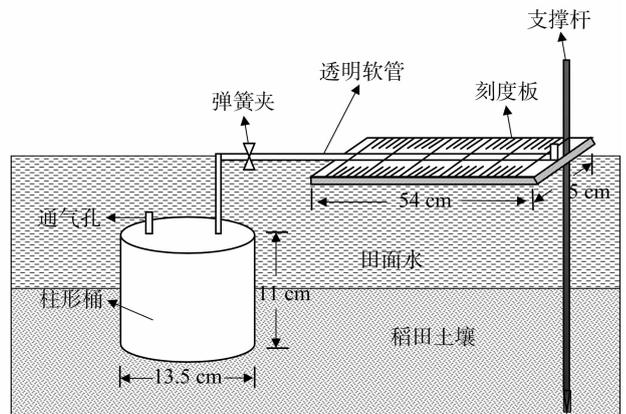


图2 抽气密闭室法测定氨挥发速率原理

渗漏水收集管(埋入土平面以下 115 cm 深度),研究土壤渗漏状况。渗漏管(中国科学院南京土壤研究所生产)由聚氯乙烯(PVC)管制成,直径为 10 cm,管下端距底部 15~25 cm 的管壁上均匀密布直径为 0.5 cm 的小孔,小孔被细密的尼龙纱布包裹,1 根直径为 0.5 cm 的塑料取样导管由渗漏管上端插入底部(图 3-a)。使用手动真空泵通过塑料取样导管采集渗漏水,为避免污染,在第 1 次取样前先将多孔渗漏管内的水晒干并丢弃。在试验开始后,每 7 d 左右(因天气或追肥等



a. 渗漏水收集管原理



b. 快速反应渗漏水计原理

图3 渗漏水收集管和快速反应渗漏水计原理

1.4 数据计算与分析

使用 Origin Pro 8.0 (OriginLab USA) 作图,数据的统计分析使用 SPSS (IBM, version 20) 软件。采用单因素方差分析 (ANOVA)、最小显著性差异法 (LSD) 在 0.05 水平上比较不同处理的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同粒径草酰胺氮素释放特性

由图 4 可知,与尿素相比,草酰胺具有一定缓释性,但缓释效果受肥料粒径大小影响。尿素施入土壤后迅速释放氮素,培养至第 3 天时氮素释放率超过 70%,第 14 天时基本释放完全,释放曲线呈倒“L”形。OAp 的氮素释放特征与尿素相似,在培养至第 14 天时氮素基本释放完全,在培养的前 7 天氮素累积释放率明显低于 UR,与 UR 相比前期具有一定的缓释效果,但释放期没有延长。OAs 与 OAb 的氮素累积释放率变化特征与 UR 和 OAp 完全不同,随培养时间的增加,OAs 与 OAb 的氮素累积释放率缓慢增加,在培养的第 21~42 天增长速率较快,而后出现波动并于培养 70 d 后逐渐达到稳定,

原因,部分采样时间有所推迟或提前)用手动真空泵吸取 1 次渗漏水,渗漏水样本吸取后迅速冷藏带回实验室,并立即放入 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱内保存。渗漏水样品中铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、硝态氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、总氮 (TN) 浓度采用连续流动分析仪 (Skalar, 荷兰,分析误差为 $\pm 3.9\%$,最低检出限为 0.2 mg/L) 分析测定。

通过改进型快速反应渗漏水计监测试验稻田 24 h 的渗漏量。改进型快速反应渗漏水计是 Zhao 等根据国际水稻研究所 1987 年设计的渗漏水计改良而来^[27]。由于水稻生长季的土壤大部分时间处于水淹状态,水通过土壤向下持续渗漏的速率近似恒定,因此,渗漏水计可通过测量田面水的减少量来确定地表水垂直渗漏速率(图 3-b)。在本试验中,通过在不同小区内 20 次的重复测量得出,稻田的平均渗漏速率为 2 mm/d 。

累积氮渗漏量 (kg/hm^2) = 渗漏水时间间隔加权平均氮浓度 (mg/L) \times 总渗漏水量 (m^3/hm^2) $\times 0.001$ 。

其中,渗漏水时间间隔加权平均氮浓度 = [渗漏水氮浓度 (mg/L) \times 采样间隔天数 (d)] 之和 / 总采样天数 (d)。

总渗漏水量 (mm) = 稻田平均渗漏速率 (mm/d) \times 淹水天数 (d)。

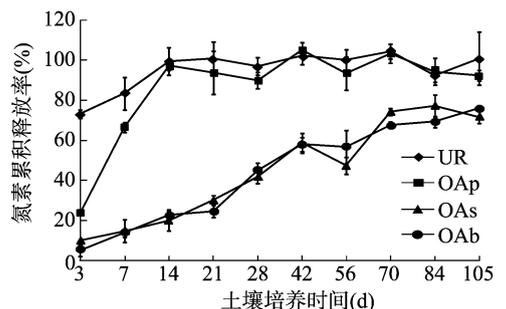


图4 土壤培养条件下不同粒径草酰胺氮素累积释放率

至培养结束时的第 105 天,OAs、OAb 的氮素累积释放率分别为 70.5%、75.4%。在整个培养期,OAs 和 OAb 的氮素累积释放率均明显低于 UR 和 OAp,而在整个培养过程中 OAs、OAb 的氮素累积释放率基本无明显差异。

2.2 不同处理对水稻产量和秸秆生物量的影响

由表 1 可知,在连续 2 年的试验中,施肥处理下水稻的产量均显著高于 CK 处理。在 2013 年试验中,UR、OA 处理下水稻产量分别较 CK 提高 27.7%、32.3%,而在 2014 年试验

中,水稻产量分别较 CK 提高 57.4%、63.8%。但在 2013、2014 年两季水稻中,一次性施用的 OA 与分次施用的 UR 相比,水稻产量没有显著性差异。与 CK 相比,施氮不仅可提高水稻产量,同时可显著提高水稻秸秆的生物量,其中在 2013 年水稻季内 OA 处理下水稻秸秆生物量显著高于 UR。

表 1 2013、2014 年不同处理下水稻籽粒和秸秆生物量

处理	2013 年生物量(t/hm^2)		2014 年生物量(t/hm^2)	
	籽粒	秸秆	籽粒	秸秆
CK	6.5 ± 0.1b	5.9 ± 0.2c	4.7 ± 0.1b	4.3 ± 0.5b
UR	8.3 ± 0.1a	6.9 ± 0.2b	7.4 ± 0.3a	6.9 ± 0.2a
OA	8.6 ± 0.2a	7.5 ± 0.3a	7.7 ± 0.0a	7.3 ± 0.6a

注:同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。下表同。

2.3 不同处理对氮素吸收与氮肥利用率影响

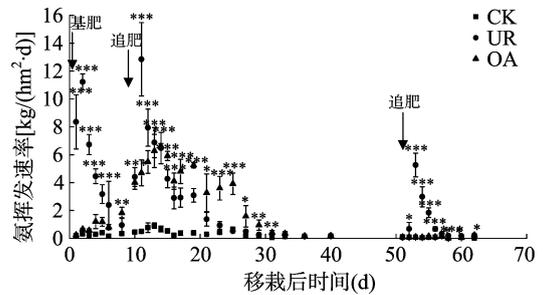
由表 2 可知,施用氮肥可以显著提高籽粒和秸秆的氮素吸收量。水稻籽粒的氮素吸收量以 OA 处理最高,显著高于 UR 处理,而在秸秆的氮素吸收量中 OA 处理与 UR 处理无显著性差异。地上部总的氮素吸收量以 OA 处理最高,其中在 2013 年显著高于 UR 处理。2013 年各处理地上部总的氮素吸收量均明显高于 2014 年,但氮肥利用率却表现出相反的趋势。在连续 2 年的试验中,OA 处理下的氮肥利用率均最高,并在 2013 年显著高于 UR 处理,同时 2014 年 OA 处理下水稻氮肥利用率明显高于 2013 年。

表 2 2013、2014 年水稻氮素吸收量和氮肥利用率

年份	处理	氮素吸收量(kg/hm^2)			氮肥利用率 (%)
		籽粒	秸秆	地上部	
2013	CK	82 ± 4.2c	33 ± 2.4b	115.0 ± 4.6c	—
	UR	121 ± 2.4b	70 ± 4.7a	191.0 ± 3.4b	33.5 ± 1.5b
	OA	128 ± 2.7a	77 ± 3.2a	206.0 ± 5.8a	40.2 ± 2.6a
2014	CK	55 ± 2.0c	26 ± 1.1b	80.5 ± 2.8b	—
	UR	102 ± 7.6b	70 ± 6.9a	172.0 ± 14.0a	40.6 ± 6.0a
	OA	115 ± 3.1a	73 ± 6.5a	187.0 ± 4.4a	47.4 ± 2.0a

2.4 不同处理对稻田氨挥发影响

由图 5 可知,在 2013 年水稻生长季中,试验水稻田在不施氮处理下稻田氨挥发速率较低,主要在 $1 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 以下。施用基肥后,水稻移栽的第 2 天,UR 处理下稻田的氨挥发速率即达到第 1 个峰值,为 $11.2 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$,而后不断降低,在水稻移栽后的前 6 d,UR 处理的稻田氨挥发速率始终显著高于 OA 处理和 CK 处理。水稻移栽后的第 9 天 UR 处理开始施用第 1 次追肥,随后 UR 处理的稻田氨挥发速率开始升高至第 12 天达到第 2 个峰值,为 $12.8 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$,而后逐渐降低,至第 25 天时与 CK 处理无显著差异。UR 处理的第 2 次追肥于移栽后的第 51 天施用,之后 UR 处理的稻田氨挥发速率在 2 d 内急剧升高并达到第 3 次峰值,为 $5.3 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$,而后快速降低至较低水平。OA 处理下稻田的氨挥发速率在水稻移栽后的前 6 d 一直处于较低的水平,均低于 $1.2 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$,移栽后的第 8 天 OA 处理下稻田的氨挥发速率开始快速增加,至第 14 天时达到最高峰,为 $6.6 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$,并在第 15 天时超过 UR 处理,而后缓慢波动降低,持续至第 29 天时 OA 处理的稻田氨挥发速率仍显著高于 UR 处理,而后继续降低,至第 33 天时与 CK 处理无显著差异。



*, **, ***分别表示处理间在0.05、0.01、0.001上差异显著。下同

图 5 2013 年不同处理稻田氨挥发速率动态变化

由图 6 可知,在 2014 年水稻生长季中,试验水稻田在不施氮处理下稻田氨挥发速率一直处于较低的水平,均在 $0.5 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 以下。UR 处理的稻田氨挥发速率变化特征与 2013 年基本相同,在基肥施用后,水稻移栽的第 1 天,UR 处理下稻田的氨挥发速率即达到第 1 个峰值,为 $3.6 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$,而后不断降低,在水稻移栽后的前 6 天,UR 处理的稻田氨挥发速率始终显著高于 OA 处理和 CK 处理。水稻移栽后的第 9 天 UR 处理开始施用第 1 次追肥,随后 UR 处理的稻田氨挥发速率开始升高至第 12 天达到第 2 个峰值,为 $3.8 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$,而后逐渐降低,至第 29 天时与 CK 处理无显著差异。UR 处理的第 2 次追肥于移栽后的第 51 天施用,之后 UR 处理的稻田氨挥发速率在 2 d 内急剧增加并达到第 3 次峰值,为 $1.6 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$,而后快速降低至较低水平。OA 处理下稻田的氨挥发速率在水稻移栽后的前 9 天一直处于较低的水平,均低于 $0.33 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$,移栽后的第 10 天 OA 处理下稻田的氨挥发速率开始快速增加,至第 15 天时达到最高峰,为 $1.9 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$,而后缓慢降低,持续至第 31 天时 OA 处理的稻田氨挥发速率显著高于 UR 处理,而后与 CK 处理无显著性差异。

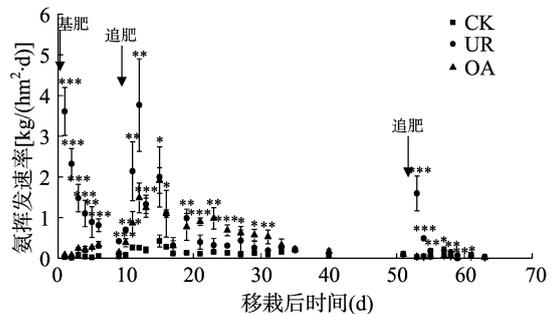


图 6 2014 年不同处理稻田氨挥发速率动态变化

由表 3 可知,在水稻生长期间各个处理下稻田的累积氨挥发量、肥料氮损失量和肥料氮损失率连续 2 年均以 UR 处理最高。在 2013、2014 年水稻生长季,与 UR 处理相比,OA 处理下累积氨挥发损失量分别降低 34.8%、47.7%。OA 处理下的肥料氮损失率分别为 26.4%、5.0%,显著低于 UR 处理。

2.5 不同处理对稻田氮素渗漏影响

由图 7 可知,2013 年水稻生长季中,在移栽后的前 2 周,UR 处理稻田渗漏水中的铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、总氮浓度最高,显著高于 OA、CK 处理,其次为 OA 处理。移栽 1 周后,UR 处理渗漏水中铵态氮、总氮的浓度呈现出波动但总体呈下降趋势,至移栽后的第 50 天(8 月 19 日),与 CK 处理下的渗漏水

表3 2013、2014年水稻生长季稻田氨挥发累积释放量

处理	累积氨挥发量 (kg/hm ²)	肥料氮损失量 (kg/hm ²)	肥料氮损失率 (%)
2013			
CK	10.3 ± 0.9c	—	—
UR	107.0 ± 13.8a	96.4 ± 13.8a	42.8 ± 6.1a
OA	69.8 ± 6.8b	59.5 ± 6.8b	26.4 ± 3.0b
2014			
CK	3.6 ± 0.2c	—	—
UR	28.3 ± 4.1a	24.7 ± 4.1a	11.0 ± 1.8a
OA	14.8 ± 1.6b	11.1 ± 1.6b	5.0 ± 0.7b

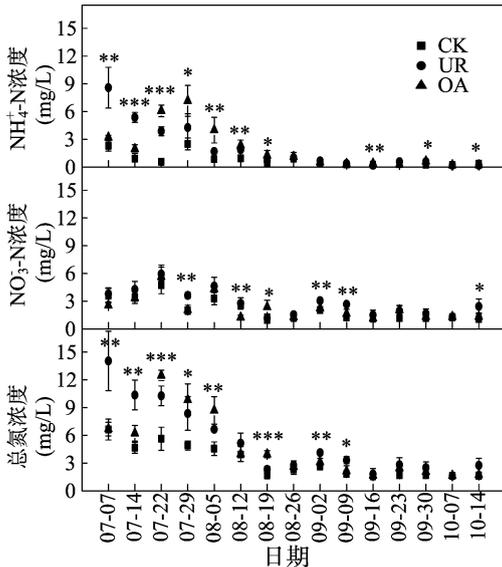


图7 2013年不同处理下稻田渗漏水氨浓度的动态变化

无显著差异。OA处理稻田渗漏水中铵态氮、硝态氮、总氮浓度随时间的变化趋势整体呈先增加后降低的趋势,并于移栽后的第22(7月22日)至29天(7月29日)达到最大值,而后不断下降,至移栽后的第57天(8月26日),与CK处理下的渗漏水无显著差异。

由图8可知,2014年水稻生长季中,在移栽后的前35天,UR处理稻田渗漏水中的铵态氮、总氮浓度最高,显著高于OA、CK处理。从移栽后第15天(7月3日)开始,UR处理渗漏水中铵态氮、总氮浓度逐渐下降,至移栽后的第51天(8

月8日)、第63天(8月20日)渗漏水中的铵态氮、总氮浓度分别与CK无显著性差异。OA处理稻田渗漏水中铵态氮、硝态氮、总氮浓度随时间的变化趋势与2013年水稻生长季相似,整体呈先增加后降低的趋势,于第21(7月9日)到28天(7月16日)时达到最大值,而后不断下降。在移栽后的第35天(7月23日),OA处理渗漏水中的铵态氮、硝态氮浓度与CK无显著性差异,总氮浓度在移栽后的第63天(8月20日)与CK处理下的渗漏水无显著差异。

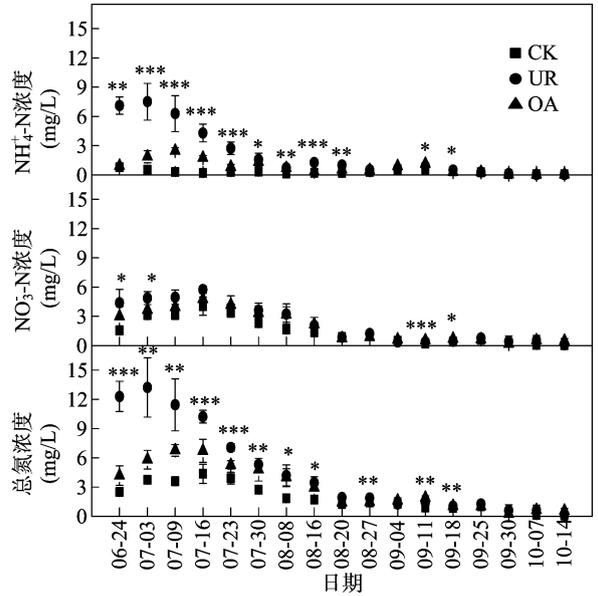


图8 2014年不同处理下稻田渗漏水氨浓度的动态变化

由表4可知,施用氮肥可显著增加稻田的氮素渗漏损失量。其中,与尿素(UR)相比,施用草酰胺(OA)可显著减少总氮渗漏损失。在2013年水稻生长季,与UR处理相比,OA处理显著减少11.6%的总氮渗漏损失。2014年水稻生长季,与UR处理相比,OA处理显著减少60.3%的NH₄⁺-N渗漏损失和34.2%的总氮渗漏损失。2013、2014年,OA处理氮素渗漏损失率分别为1.30%、1.05%,而UR处理下这一比例为1.82%、2.51%。因此,连续2年的研究结果表明,一次性施用OA可明显减少肥料氮的渗漏损失。

表4 2013、2014年不同处理稻田氮素渗漏损失量

处理	2013年氮素渗漏损失量(kg/hm ²)			2014年氮素渗漏损失量(kg/hm ²)		
	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	总氮	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	总氮
CK	1.45 ± 0.15b	3.98 ± 0.31b	5.99 ± 0.35c	0.61 ± 0.04c	3.04 ± 0.24b	3.93 ± 0.36c
OA	3.85 ± 0.67a	4.35 ± 0.28b	8.91 ± 0.60b	1.73 ± 0.08b	4.22 ± 0.58a	6.30 ± 0.59b
UR	3.85 ± 0.18a	5.42 ± 0.54a	10.08 ± 0.44a	4.36 ± 1.01a	4.72 ± 0.37a	9.57 ± 1.31a

3 讨论与结论

已有研究表明,缓释氮肥可明显提高作物吸氮量、产量和氮肥利用率^[28-29]。本研究结果表明,颗粒草酰胺一次性施用处理可显著提高水稻籽粒的氮素吸收量,说明草酰胺一次性施用可较好满足作物生育后期生殖生长对氮素的需求。结合本研究产量及氮肥利用率结果可以发现,与分次施用尿素相比,草酰胺一次性施用籽粒产量有一定增幅,但未达显著水平,而2013年氮肥利用率显著提高,表明在等氮量投入的条

件下,草酰胺一次性施用在水稻生产上具有稳产增效的作用。

大量研究表明,氮肥的施用对氨挥发有显著影响^[30-33],本研究连续2年的结果得出相同的结论。施氮量相同的草酰胺和尿素处理氨挥发释放特征不同,这是由草酰胺和尿素在土壤内不同的氮素释放原理引起的,尿素易溶于水,施入土壤后迅速水解释放出NH₄⁺,导致短时间内土壤溶液中的NH₄⁺浓度快速升高,这是氨挥发速率快速提高的主要原因,因此在每次施肥后,UR处理均会出现一个氨挥发峰值。草酰胺难溶于水的物理特性是其与尿素最主要的不同点,颗粒状草酰

胺施入土壤后在土壤溶液和土壤微生物的共同作用下,不断缓慢水解释放出 NH_4^+ 。因此,在本研究中,与尿素相比,施用草酰胺可显著减少氨挥发损失。本试验得出的氨挥发损失量占施氮总量的比例结果年际差异较大,2013年草酰胺、尿素处理分别为26.4%、42.8%,而2014年则为5%、11%,这与影响氨挥发环境因素较多有关^[34],2013年较2014年气温高、降水少,由于稻田土壤的氨挥发速率与气温呈正相关关系,因此气温的升高对稻田土壤的氨挥发具有促进作用^[35-36]。也有研究表明,通过氨挥发损失的氮量占施氮总量的比例范围差异较大,可从忽略不计至高达60%^[37-38],约占全部氮肥损失量的10%~80%^[39-40]。

本研究中尿素处理下氮素通过渗漏损失量最高,分别占施氮总量的1.82%(2013年)、2.51%(2014年),低于Peng等在水稻上的试验结果(3.06%)^[41],原因主要是施氮量的不同,Peng等的施氮量为403 kg/hm²,远大于本试验中的用量,而氮肥用量增加会促进氮素通过渗漏损失^[42]。在2013、2014年水稻试验中,一次性施用草酰胺与分次施用尿素相比,分别减少11.6%、34.2%的总氮渗漏损失。在不施肥条件下从本试验区域水稻田中通过渗漏损失的氮以硝态氮为主,明显高于铵态氮,这可能是由于水稻更偏向于吸收利用铵态氮^[43]。

综上所述,一次性施用的草酰胺可以在保证产量水平的条件下,减少稻田氨挥发和渗漏损失,改善水稻植株氮素营养状况并提高氮肥利用率。因此,在水稻生产过程中一次性施用的草酰胺可以等量代替分次施用的尿素,进而实现节本、稳产、增效、减排的目的。

参考文献:

- [1] Vitousek P M, Naylor R, Crews T, et al. Nutrient imbalances in agricultural development[J]. *Science*, 2009, 324(5934): 1519-1520.
- [2] 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(4): 783-795.
- [3] Roelcke M, Schleef K H, Richter J. Recent trends and recommendations for nitrogen fertilization in intensive agriculture in eastern China[J]. *Pedosphere*, 2004, 14(4): 449-460.
- [4] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [5] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China - contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63(2/3): 117-127.
- [6] Peng S B, Buresh R J, Huang J L, et al. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China [J]. *Field Crops Research*, 2006, 96(1): 37-47.
- [7] Banerjee B, Pathak H, Aggarwal P. Effects of dicyandiamide, farmyard manure and irrigation on crop yields and ammonia volatilization from an alluvial soil under a rice (*Oryza sativa* L.) - wheat (*Triticum aestivum* L.) cropping system [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 36(3): 207-214.
- [8] Zhang X H, Yuan W Y, Zhang G M, et al. Control of nutrients after discharge to lakes through wastewater [J]. *Water Science and Technology*, 2004, 50(6): 173-178.
- [9] Kronvang B, Graesbøll P, Larsen S E, et al. Diffuse nutrient losses in Denmark[J]. *Water Science and Technology*, 1996, 33(4/5): 81-88.
- [10] Boers P C M. Nutrient emissions from agriculture in the Netherlands, causes and remedies [J]. *Water Science and Technology*, 1996, 33(4/5): 183-189.
- [11] Yang Y E, 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.
- [12] Golden B R, Slaton N A, Norman R J, et al. Evaluation of polymer-coated urea for direct-seeded, delayed-flood rice production [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(2): 375-383.
- [13] 李武, 邓飞, 胡慧, 等. 缓控释氮肥对机插杂交水稻稻米品质的影响[J]. *核农学报*, 2018(4): 779-787.
- [14] 侯红乾, 黄永兰, 冀建华, 等. 缓/控释肥对双季稻产量和氮素利用率的影响[J]. *中国水稻科学*, 2016, 30(4): 389-396.
- [15] 许仙菊, 马洪波, 宁运旺, 等. 缓释氮肥运筹对稻麦轮作周年作物产量和氮肥利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(2): 307-316.
- [16] de Ment J D, Hunt C M, Stanford G, et al. Nitrogen fertilizers, hydrolysis, nitrification, and nitrogen availability of oxamide, as influenced by granule size [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1961, 9(6): 453-456.
- [17] Rubio J L, Hauck R D. Uptake and use patterns of nitrogen from urea, oxamide, and isobutylidene diurea by rice plants [J]. *Plant and Soil*, 1986, 94(1): 109-123.
- [18] 李方敏, 艾天成, 周升波, 等. 缓释氮肥对水稻的增产效果及其氮素利用率[J]. *土壤通报*, 2004, 35(3): 311-315.
- [19] 卜东升, 王立军, 张涛, 等. 缓释氮肥草酰胺对新疆新疆滴灌棉田养分和产量的影响[J]. *中国棉花*, 2014, 41(12): 17-19.
- [20] 张润花, 段增强. 缓效氮肥在菇渣复合基质育苗中的肥效[J]. *江苏农业科学*, 2012, 40(3): 338-340.
- [21] 张润花, 段增强. 草酰胺对菇渣混合基质理化性状和番茄幼苗生长的影响[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(22): 271-275.
- [22] Englestad O P, Hunt C M, Terman G L. Response of corn to nitrogen in oxamide and ammonium nitrate in greenhouse experiments I [J]. *Agronomy Journal*, 1964, 56(6): 579-582.
- [23] 江苏丹化煤制化学品工程技术有限公司. 一种草酰胺类缓释氮肥及其制备方法; CN102304003A [P]. 2011-07-28.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 29-108.
- [25] Kissel D E, Brewer H L, Arkin G F. Design and test of a field sampler for ammonia volatilization [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1977, 41(6): 1133-1138.
- [26] 周伟, 田玉华, 曹彦圣, 等. 两种氨挥发测定方法的比较研究 [J]. *土壤学报*, 2011, 48(5): 1090-1095.
- [27] Zhao X, Zhou Y, Min J, et al. Nitrogen runoff dominates water nitrogen pollution from rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 156: 1-11.
- [28] 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.

- [15]王若兰,赵炎,张令,等. 玉米霉变与其图像颜色特征参数之间的相关性研究[J]. 粮食与饲料工业,2015(2):13-16.
- [16]Stricker M, Orengo M. Similarity of color images [C]//Storage and Retrieval for Image and Video Databases III. International Society for Optics and Photonics,1995:381-393.
- [17]夏永泉,李耀斌,李晨. 基于图像处理技术的小麦叶部病害识别研究[J]. 科技通报,2016,32(4):92-95.
- [18]崔艳丽,程鹏飞,董晓志,等. 温室植物病害的图像处理及特征值提取方法的研究[J]. 农业工程学报,2005,21(增刊2):32-35.
- [19]胡敏,陈红波,许良凤,等. 基于颜色和纹理特征的黄瓜病害识别算法[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(7):970-977.
- [20]吕腾腾. 基于支持向量机的小麦病害识别研究[D]. 泰安:山东农业大学,2015.
- [21]田有文. 基于纹理特征和支持向量机的葡萄病害的识别[J]. 仪器仪表学报,2005,26(S1):606-608.
- [22]陈兵旗,郭学梅,李晓华. 基于图像处理的小麦病害诊断算法[J]. 农业机械学报,2009,40(12):190-195.
- [23]杨倩,高晓阳,武季玲,等. 基于颜色和纹理特征的大麦主要病害识别研究[J]. 中国农业大学学报,2013,18(5):129-135.
- [24]王树文,张长利. 基于图像处理技术的黄瓜叶片病害识别诊断系统研究[J]. 东北农业大学学报,2012,43(5):69-73.
- [25]张静,王双喜,董晓志,等. 基于温室植物叶片纹理的病害图像处理及特征值提取方法的研究[J]. 沈阳农业大学学报,2006,37(3):282-285.
- [26]毛罕平,徐贵力,李萍萍. 番茄缺乏叶片的图像特征提取和优化选择研究[J]. 农业工程学报,2003,19(2):133-136.
- [27]Bakhshipour A, Jafari A, Nassiri S M. Weed segmentation using texture features extracted from wavelet sub-images[J]. Biosystems Engineering,2017,157:1-12.
- [28]王怀宇,李景丽. 基于纹理特征的玉米苗期田间杂草识别[J]. 江苏农业科学,2014,42(7):143-145.
- [29]Rojas C P, Leonardo S G, Toledo N V. Weed recognition by SVM texture feature classification in outdoor vegetable crops images[J]. Ingeniería E Investigación,2017,37(1):68-74.
- [30]师韵,王旭启,张善文. 基于主分量分析的苹果叶部3种常见病害识别方法[J]. 江苏农业科学,2016,44(9):337-340.
- [31]刘君,王振中,李宝聚,等. 基于图像处理的作物病害自动识别系统的研究[J]. 计算机工程与应用,2012,48(13):154-158,180.
- [32]邓继忠,李敏,袁之报,等. 基于图像识别的小麦腥黑穗病害特征提取与分类[J]. 农业工程学报,2012,28(3):172-176.
- [33]秦丰,刘东霞,孙炳达,等. 基于图像处理技术的四种苜蓿叶部病害的识别[J]. 中国农业大学学报,2016,21(10):65-75.
- [34]田凯,张连宽,熊美东,等. 基于叶片病斑特征的茄子褐纹病识别方法[J]. 农业工程学报,2016,32(增刊1):184-189.
- [35]Zhang S, Wu X, You Z, et al. Leaf image based cucumber disease recognition using sparse representation classification[J]. Computers & Electronics in Agriculture,2017,134:135-141.
- [36]马浚诚,温皓杰,李鑫星,等. 基于图像处理的温室黄瓜霜霉病诊断系统[J]. 农业机械学报,2017,48(2):195-202.
- [37]刘涛,仲晓春,孙成明,等. 基于计算机视觉的水稻叶部病害识别研究[J]. 中国农业科学,2014,47(4):664-674.
- [38]Dewi R K, Ginardi R H. Feature extraction for identification of sugarcane rust disease [C]//International Conference on Information, Communication Technology and System (ICTS),2014:99-104.
- [39]凌秀华,卢文彪,王耐,等. 基于图像处理技术的麦冬药材特征提取与识别[J]. 辽宁中医杂志,2017(7):1460-1462.
- [40]曹金留,田光明,任立涛,等. 江苏南部地区稻麦两熟土壤中尿素的氨挥发损失[J]. 南京农业大学学报,2000,23(4):51-54.
- [41]Schlesinger W H, Hartley A E. A global budget for atmospheric NH₃ [J]. Biogeochemistry,1992,15(3):191-211.
- [42]杨震,朱兆良,蔡贵信,等. 表面成膜物质抑制水稻田中氮挥发的研究[J]. 土壤学报,1995,32(增刊2):160-165.
- [43]De Datta S K, Buresh R J, Obcemea W N, et al. Nitrogen-15 balances and nitrogen fertilizer use efficiency in upland rice[J]. Fertilizer Research,1990,26(1/2/3):179-187.
- [44]Han K, Zhou C J, Wang L Q, et al. Reducing ammonia volatilization from maize fields with separation of nitrogen fertilizer and water in an alternating furrow irrigation system [J]. Journal of Integrative Agriculture,2014,13(5):1099-1112.
- [45]Peng S Z, Yang S H, Xu J Z, et al. Nitrogen and phosphorus leaching losses from paddy fields with different water and nitrogen managements [J]. Paddy and Water Environment,2011,9(3):333-342.
- [46]闫德智,王德建,林静慧. 太湖地区氮肥用量对土壤供氮、水稻吸氮和地下水的影响[J]. 土壤学报,2005,42(3):440-446.
- [47]Ishii S, Ikeda S, Minamisawa K, et al. Nitrogen cycling in rice paddy environments: past achievements and future challenges [J]. Microbes and Environments,2011,26(4):282-292.

(上接第58页)

- [29]Xu M G, Li D C, Li J M, et al. Polyolefin-coated urea decreases ammonia volatilization in a double rice system of southern China [J]. Agronomy Journal,2013,105(1):277-284.
- [30]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.
- [31]Sun H J, Zhang H L, Min J, et al. Controlled-release fertilizer, floating duckweed, and biochar affect ammonia volatilization and nitrous oxide emission from rice paddy fields irrigated with nitrogen-rich wastewater [J]. Paddy and Water Environment,2016,14(1):105-111.
- [32]Wang H H, Hegazy A M, Jiang X, et al. Suppression of ammonia volatilization from rice-wheat rotation fields amended with controlled-release urea and urea [J]. Agronomy Journal,2016,108(3):1214-1224.
- [33]蒋炳伸,李大红,李鸿雁. 2006—2014年驻马店地区农业源大气氨排放量变化[J]. 江苏农业学报,2017,33(1):100-106.
- [34]宋勇生,范晓晖. 稻田氨挥发研究进展[J]. 生态环境,2003,12(2):240-244.
- [35]武岩,红梅,林立龙,等. 不同施肥措施对河套灌区盐化潮土氮挥发及氧化亚氮排放的影响[J]. 土壤,2017,49(4):745-752.