

速效氮与缓控释氮配比一次性侧深施对双季稻产量、氮素利用率及氮素损失的影响

侯坤, 荣湘民, 韩磊, 潘治宇, 彭建伟, 张玉平, 谢桂先, 田昌, 韩永亮

引用本文:

侯坤, 荣湘民, 韩磊, 等. 速效氮与缓控释氮配比一次性侧深施对双季稻产量、氮素利用率及氮素损失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9): 1923–1934.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0290>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同深施肥方式对稻田氨挥发及水稻产量的影响

周平遥, 张震, 王华, 肖智华, 徐华勤, 汪久翔

农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2683–2691 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0441>

洱海流域不同施肥模式对稻田氮磷径流流失的影响

姜海斌, 沈仕洲, 谷艳茹, 于双, 邹洪涛, ArifHusain, 张磊, 张克强

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1305–1313 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1292>

种植方式对稻田氨挥发及氮磷流失风险的影响

杨振宇, 罗功文, 赵杭, 胡旺, 王艺哲, 张含丰, 张玉平

农业环境科学学报. 2021, 40(7): 1529–1537 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1481>

控释氮肥减量施用对春玉米土壤N₂O排放和氨挥发的影响

谢勇, 荣湘民, 张玉平, 何欣, 石敦杰, 刘强

农业环境科学学报. 2016, 35(3): 596–603 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.03.025>

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, 王昌全, 申亚珍, 马菲, 周健民, 杜昌文

农业环境科学学报. 2016, 35(1): 109–114 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.01.015>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

侯坤, 荣湘民, 韩磊, 等. 速效氮与缓控释氮配比一次性侧深施对双季稻产量、氮素利用率及氮素损失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9): 1923–1934.

HOU K, RONG X M, HAN L, et al. Effects of one-time deep application of available nitrogen and slow and controlled-release nitrogen on rice yield, nitrogen use efficiency, and nitrogen loss[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(9): 1923–1934.

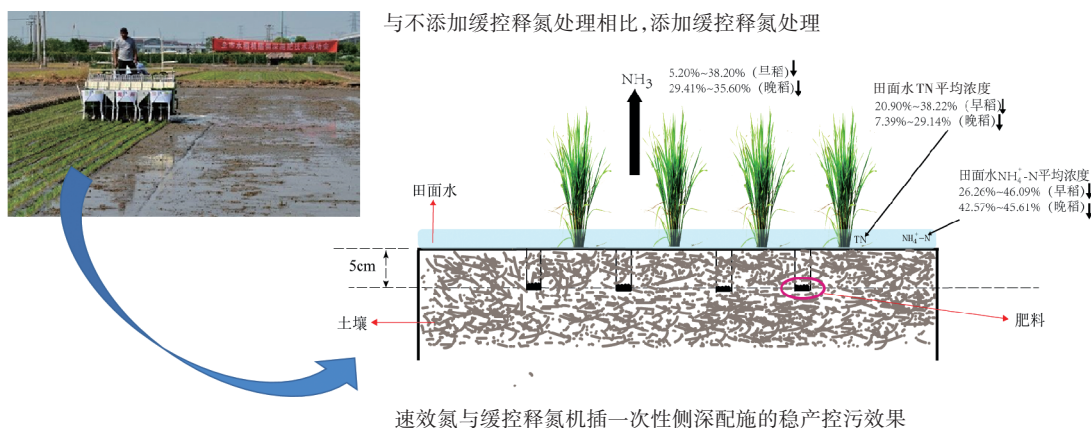


开放科学 OSID

速效氮与缓控释氮配比一次性侧深施对双季稻产量、氮素利用率及氮素损失的影响

侯坤, 荣湘民, 韩磊, 潘治宇, 彭建伟, 张玉平, 谢桂先, 田昌, 韩永亮*

(湖南农业大学资源环境学院, 土壤肥料资源高效利用国家工程实验室, 长沙 410128)



摘要:为探究在机插同步一次性侧深施肥作业方式下的速效氮与缓控释氮合理配比, 保证水稻产量, 提高肥料利用率, 降低氮素流失, 实现水稻的清洁化生产, 采用田间小区试验, 设置7个处理, 分别为CK: 不施肥, T1: 农民习惯施肥(施N量早稻 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 晚稻 $165 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), T2~T6: 机插同步一次性侧深施肥(施N量早稻 $105 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 晚稻 $132 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 其中T2~T6处理的缓控释氮分别占总氮的0%、10%、20%、30%、40%。结果表明: 在早稻季, 各处理间产量差异不显著; 晚稻季, T3~T5处理的产量间差异不显著, T6处理产量显著低于T4和T5处理; 与T1处理相比, T2~T6处理的氮肥吸收利用率提高了8.08~14.10(早稻)个和6.68~26.61(晚稻)个百分点。与T2处理相比, 早、晚稻T3~T6处理氨挥发累积量分别降低了5.20%~38.20%、29.41%~35.60%, 田面水总氮平均浓度下降了20.90%~38.22%、7.39%~29.14%, 田面水铵态氮平均浓度降低了26.26%~46.09%、42.57%~45.61%, 其中T4处理早、晚稻不减产, 肥料吸收利用率达到了37.93%(早稻)、61.32%(晚稻), 氨挥发累积量、田面水总氮平均浓度和铵态氮平均浓度分别下降37.00%、30.48%、31.88%(早稻), 35.58%、12.88%、52.58%(晚稻), 综合效果最好。研究表明, 在湖南双季稻生产中, 采用机插同步一次性侧深施肥作业方式, 缓控释氮占总氮的20%较为合适。

关键词: 双季稻; 侧深施肥; 速效氮; 缓控释氮; 产量; 氮素损失; 氮素利用率

中图分类号: S511.42 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)09-1923-12 doi:10.11654/jaes.2021-0290

收稿日期: 2021-03-11 录用日期: 2021-05-13

作者简介: 侯坤(1994—), 男, 湖南郴州人, 博士研究生, 从事施肥技术与原理研究。E-mail: 2435914572@qq.com

*通信作者: 韩永亮 E-mail: xiaohliang@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800501); 湖南省教育厅创新平台开放基金项目(19K046); 湖南省自然科学基金青年项目(2019JJ50233)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2018YFD0800501); Scientific Research Foundation of Hunan Provincial Education Department (19K046); The Natural Science Foundation of Hunan Province, China (2019JJ50233)

Effects of one-time deep application of available nitrogen and slow and controlled-release nitrogen on rice yield, nitrogen use efficiency, and nitrogen loss

HOU Kun, RONG Xiangmin, HAN Lei, PAN Zhiyu, PENG Jianwei, ZHANG Yuping, XIE Guixian, TIAN Chang, HAN Yongliang*

(College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Changsha 410128, China)

Abstract: The purpose of this study was to explore the reasonable ratio of available nitrogen to slow/controlled-release nitrogen under the one-time side deep fertilization mode of machine insertion synchronization to improve the fertilizer utilization rate, reduce nitrogen loss, and realize clean production of rice while obtaining a stable rice yield. A field plot experiment was conducted with the seven following treatments, CK: no fertilization; T1: conventional fertilization [N rate: $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (early rice), $165 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (late rice)]; and T2~T6: simultaneous machine-planting and one-side deep fertilization [N application rate: $105 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (early rice), $132 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (late rice)], for which slow and controlled-release nitrogen accounted for 0%, 10%, 20%, 30%, and 40% of the total nitrogen, respectively. The effects of deep application of different ratios of available nitrogen and slow-release nitrogen on the double-cropping rice yield, fertilizer use efficiency, and nitrogen loss were explored. In the early rice season, the yield difference among the treatments was not significant, whereas in the late rice season, the yield difference among treatments T3~T5 was not significant. The yield of treatment T6 was significantly lower than that of treatments T4 and T5. Compared with those of treatment T1, the absorption and utilization rates of treatments T2~T6 increased by 8.08~14.10 percent points (early rice) and 6.68~26.61 percent points (late rice), respectively. For early and late rice, compared with that of treatment T2, the cumulative amount of ammonia volatilization of treatments T3~T6 decreased by 5.20%~38.20% and 29.41%~35.60%, respectively, and the average concentration of total nitrogen in the field water decreased by 20.90%~38.22% and 7.39%~29.14%, respectively. The average concentration of ammonium nitrogen in the surface water of approximately decreased by 26.26%~46.09% and 42.57%~45.61%, respectively. Treatment T4 did not reduce the yields of early and late rice, and the fertilizer absorption efficiency reached 37.93% (early rice) and 61.32% (late rice). The cumulative amount of ammonia volatilization, the average concentration of total nitrogen in the field water, and the average concentration of ammonium nitrogen decreased by 37.00%, 30.48%, and 31.88% for early rice and by 35.58%, 12.88%, and 52.58% for late rice, respectively; thus, the overall effects were the best. The synchronous one-time side deep fertilization method is suitable for the production of double-cropping rice in Hunan Province, and slow/controlled-release nitrogen should account for 20% of the total nitrogen.

Keywords: double-cropping rice; side deep fertilization; available nitrogen; controlled-release nitrogen; yield; nitrogen loss; nitrogen use efficiency

氮是影响水稻生长发育的主要营养元素之一。进入21世纪以来,氮肥的大面积施用实现了粮食的大量增产,解决了大部分地区的温饱问题。但是,我国的氮肥当季利用效率只有30%~35%,远低于发达国家水平^[1-2]。较低的肥料利用率,迫使农民增加肥料投入量以获得较高产量^[3]。长期过量和不合理的肥料施用带来了水体富营养化、地下水硝酸盐过高、土壤退化等一系列的环境问题^[4-5]。减少肥料施用的同时保证粮食安全已经成为目前亟待解决的问题。

随着农业现代化的不断推进,采用工厂化的育秧和机插同步一次性侧深施肥技术,不仅有助于解决我国现阶段农村劳动力不足的问题,还减少了肥料投入,提高了水稻生产效率和经济效益。在实际应用中,相比于农民习惯施肥,采用机插同步一次性侧深施肥作业方式也表现突出,在减氮15.9%的条件下,提高了氮肥偏生产力,增产效果显著,同时稻米品质

更优^[6];罗翔等^[7]的研究表明,与常规施肥相比,在机插侧深施肥作业方式下施肥量减少20%,水稻分蘖早,有效分蘖数、叶片叶绿素含量和产量明显提高;同种作业方式,钟雪梅等^[8]在减氮20%~30%的条件下,水稻能实现小幅增产和稳产。但是,随着减氮量的增加,可能造成水稻后期供氮不足从而影响水稻产量。缓控释肥能减缓养分释放速度,延长肥效,但目前单一的速效氮或缓控释氮施用通常不能满足水稻整个生育期的需肥,仍然需要多次施肥^[9-10]。缓控释肥部分代替速效肥,能缓解后期供肥不足的问题^[11],但采用速效氮与缓控释氮混合深施的研究较少。本试验采用机插同步一次性侧深施肥技术,在减氮20%~30%的前提下^[8],设置速效氮与缓控释氮的不同配比,以探究其对双季稻产量、氮肥利用率及氮素损失的影响,为水稻机械化、清洁化生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2019年4—11月在湖南省汨罗市凤凰乡荞麦湖村(28°55'N、112°56'E)进行,该区属亚热带大陆性季风湿润气候,境内阳光充足,雨量充沛,气候温和,年日平均气温16.9℃,年均总日照时数1665 h,无霜期263 d,年均降雨量1353 mm,年均蒸发量1330 mm。该区供试土壤为河潮泥,是由近现代河流冲积物发育而来的水稻土,土壤含有机质27.56 g·kg⁻¹、全氮2.51 g·kg⁻¹、全磷0.42 g·kg⁻¹、全钾20.43 g·kg⁻¹、碱解氮221.72 mg·kg⁻¹、速效磷13.42 mg·kg⁻¹、速效钾251.52 mg·kg⁻¹,pH 5.12。

1.2 供试材料

供试早稻品种为陵两优268(生育期112 d),晚稻为桃优香占(生育期113 d)。供试肥料为尿素(含N 46%)、氯化钾(含K₂O 60%)、复混肥和水稻侧深施专用肥,早、晚稻的水稻侧深施专用肥各有5种,分别为缓控释氮占总施氮量比例的0%、10%、20%、30%、40%,肥料均由湖南沃博特生物公司提供。缓控释氮(包膜为树脂包膜,释放天数为120 d)的氮素释放曲线如图1。供试机械为2FH-8插秧同步精量施肥机,由湖南龙舟农机股份有限公司研发,施肥位置为水稻侧3 cm,施肥深度5 cm。

1.3 试验设计

采用田间小区试验,共设7个处理,分别为:CK,不施肥处理;T1,农民习惯施肥处理(早、晚稻基肥、追肥均为人工撒施,且基肥与追肥施氮量的比分别为6:4和6:5);T2~T6为机插同步一次性侧深施肥处理,缓释氮配比分别为0%、10%、20%、30%、40%。各处理磷肥量为45 kg·hm⁻²(早稻)和36 kg·hm⁻²(晚稻);各处理的早、晚稻施钾量均为90 kg·hm⁻²。各处理的施肥量见表1。农民习惯施肥处理的早、晚稻基肥施用时间为2019年4月18日和7月30日,追肥时间为基肥后10 d,即2019年4月28日和8月9日,T2~T6施

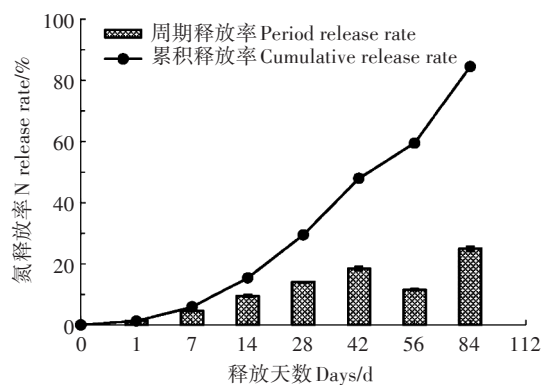


图1 缓控释尿素在25℃静水中氮素累积释放曲线^[12]

Figure 1 Cumulative nitrogen release curve of slow controlled release urea in still water at 25 °C

表1 各施肥处理施肥量

Table 1 Fertilization amount of each fertilization treatment

稻季 Season	处理 Treatment	基肥 Basal fertilizer		追肥 Topdressing	总量 Total dosage/(kg·hm ⁻²)		
		肥料类型	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
早稻 Early rice	CK	—	—	—	—	—	—
	T1	复混肥	20-10-10	尿素 130.4 kg·hm ⁻² + 氯化钾 75 kg·hm ⁻²	150	45	90
	T2	水稻生产专用肥	23.1-9.9-19.8(不含缓控释氮)	—	105	45	90
	T3	水稻生产专用肥	23.1-9.9-19.8(缓控释氮占比10%)	—	105	45	90
	T4	水稻生产专用肥	23.1-9.9-19.8(缓控释氮占比20%)	—	105	45	90
	T5	水稻生产专用肥	23.1-9.9-19.8(缓控释氮占比30%)	—	105	45	90
	T6	水稻生产专用肥	23.1-9.9-19.8(缓控释氮占比40%)	—	105	45	90
晚稻 Late rice	CK	—	—	—	—	—	—
	T1	复混肥	20-8-12	尿素 163 kg·hm ⁻² + 氯化钾 60 kg·hm ⁻²	165	36	90
	T2	水稻生产专用肥	27.1-7.4-18.5(不含缓控释氮)	—	132	36	90
	T3	水稻生产专用肥	27.1-7.4-18.5(缓控释氮占比10%)	—	132	36	90
	T4	水稻生产专用肥	27.1-7.4-18.5(缓控释氮占比20%)	—	132	36	90
	T5	水稻生产专用肥	27.1-7.4-18.5(缓控释氮占比30%)	—	132	36	90
	T6	水稻生产专用肥	27.1-7.4-18.5(缓控释氮占比40%)	—	132	36	90

肥处理早、晚稻均不追肥。

各处理均重复3次,随机区组排列。小区面积为48 m²(12 m×4 m),栽插密度为12 cm×25 cm(早稻)和16 cm×25 cm(晚稻)。

1.4 样品采集及测定方法

1.4.1 氨挥发

挥发的氨气采用密闭室间歇式通气法收集。圆柱形密闭室由透明有机玻璃制成,底面直径20 cm、高9 cm。挥发氨吸收液为20 g·L⁻¹的硼酸,每次抽气结束后,用标准稀硫酸(0.01 mol·L⁻¹ H⁺)滴定,计算土壤中氨挥发量。抽气时,气室内换气速率控制在15~20次·min⁻¹。施肥后每日上午9:00—11:00和下午15:00—17:00进行抽气,作为当日氨挥发的平均通量计算全天氨挥发量,持续测定直至施氮处理与未施氮处理的氨挥发通量无显著差异为止。田间土壤氨挥发损失的计算公式如下:

$$F=(c \times V \times 14 \times 10^{-2} / S) \times (24 / t)$$

式中: F 为氨挥发通量(以NH₃-N计),kg·hm⁻²·d⁻¹; c 为标准稀硫酸的滴定浓度,mol·L⁻¹; V 为滴定消耗稀硫酸的体积,mL;14为每摩尔NH₃中N的质量数,g·mol⁻¹; S 为捕获装置的截面积,m²; t 为氨挥发收集时间,h。氨挥发累积量是各测定时期的氨挥发通量之和。

1.4.2 田面水

田面水样采集:早稻为施肥后的第1、2、3、5、7、9、11、17、24、30、36 d;晚稻为施肥后的第1、2、3、5、7、9、11、13、15、22、29、36 d,田面水总氮采用碱性过硫酸钾消煮-紫外分光光度法测定,NH₄⁺-N、NO₃⁻-N含量用SmartChem200测定。

1.4.3 土样

采用五点取样法,取收获期0~20 cm土层土壤。采用碱解扩散法^[13]测定碱解氮含量。

1.4.4 水稻植株样品

分别于水稻分蘖盛期、抽穗期、灌浆期及成熟期,取水稻植株样品,用H₂SO₄-H₂O₂消煮,开氏定氮法^[13-14]测定氮含量(KDN-102C定氮仪)。成熟期测产。

收获期考种指标:

氮素积累总量(Total N accumulation, TNA)为成熟期单位面积植株(茎叶和穗)氮积累量的总和;

氮收获指数(N harvest index, NHI)为成熟期单位面积植株籽粒氮素积累量/单位面积植株氮素总积累量;

氮肥吸收利用率(N recovery efficiency, NRE)=(施氮区氮总吸收量-无氮区氮总吸收量)/施氮量×100%;

氮肥农学利用率(N agronomic efficiency, NAE)=(施氮区稻谷产量-无氮区稻谷产量)/施氮量;

氮肥生理利用率(N physiological efficiency, NPE)=(施氮区稻谷产量-无氮区稻谷产量)/(施氮区氮总吸收量-无氮区氮总吸收量);

氮肥偏生产力(N partial factor productivity, NPFP)=施氮区稻谷产量/施氮量。

1.5 数据处理

采用Microsoft Excel 2016和SPSS 17.0软件进行数据处理和分析,处理间差异显著性分析采用最小显著差异法(LSD)。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对双季稻产量的影响

如表2所示,在早稻季,T1~T6处理的产量都显著高于CK处理,其中T2处理产量最高,达到5 811.43 kg·hm⁻²,比T1处理提高了2.48%,其次为T4、T5、T6处理,比T1处理分别提高了0.34%、2.35%、1.05%,T3处理减产了0.21%,但T1~T6处理之间的产量差异不显著。在晚稻季,T1~T6处理的产量显著高于CK处理,其中T5产量最高,达8 510.42 kg·hm⁻²,比T1处理提高了5.01%;T2、T3、T4处理分别提高了0.43%、0.38%、4.88%;T6处理相比T5和T4处理均显著减产。

早稻季,各处理间的千粒质量和结实率均差异不显著;晚稻季,T1处理的千粒质量显著低于CK、T2、T4、T5、T6处理,T2~T6处理间差异不显著;T3~T6处理结实率显著低于CK处理,但T1~T6处理间结实率差异不显著。

2.2 不同施肥处理对双季稻氮素累积量的影响

如表3所示,在早稻季,T2~T6处理间氮素累积量、氮收获指数均差异不显著,但T5处理氮收获指数显著高于T1处理($P<0.05$)。而在晚稻季中,孕穗期T6处理的氮素累积量显著低于T1~T5处理,但T2~T6处理在分蘖期、灌浆期和成熟期的氮素累积量各施肥处理间差异均不显著;CK处理的氮收获指数最高,其次为T5处理,在T2~T6处理中,T5处理显著高于T2处理,但T3、T4、T6处理间差异不显著。

2.3 不同施肥处理对双季稻氮素利用率的影响

如表4所示,在双季稻生产过程中,相比于T1处理,早稻和晚稻T2~T6处理的NRE、NAE、NPE、NPFP分别提高了30.01%~52.38%、-1.16%~26.40%、5.85%~39.31%、30.48%~41.10%(早稻)和19.25%~76.66%、

3.13%~46.15%, 38.00%~46.15%, 20.29%~40.79% (晚稻)。在早稻季, T2~T6处理的NRE均显著高于T1处理, 其中T5处理的NRE显著高于其他处理, 达41.02%; T3~T6处理的NAE、NPE、NPFP差异均不显著; T2~T6处理的NPFP显著高于T1处理。在晚稻季T2~T6处理中, T4处理的NRE达到了61.32%, 显著高于T2和T3处理, 而NAE、NPE、NPFP处理间差异均不

显著。以上说明, 氮肥减量深施能有效提高氮肥吸收利用率, 同时在深施处理中添加一定比例的缓控释氮能进一步提高氮肥利用率, 为双季稻的高产奠定基础。

2.4 不同施肥处理的双季稻经济效益

如表5所示, T2~T6处理与T1处理相比经济效益提高了9.2%~12.9% (早稻) 和-1.3%~11.4% (晚稻), 从产投比来看, 不同缓控释氮配比处理均显著高于

表2 双季稻产量

Table 2 Yield composition of double cropping rice

稻季 Season	处理 Treatment	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	千粒质量 Thousand grain weight/g	结实率 Seed setting rate/%
早稻 Early rice	CK	3 879.51±308.92b	25.37±0.29a	84.00±0.48a
	T1	5 670.65±113.09a	24.71±0.09a	85.61±0.42a
	T2	5 811.43±102.83a	24.55±0.30a	87.02±0.14a
	T3	5 658.86±18.14a	24.82±0.36a	88.73±0.43a
	T4	5 690.36±309.29a	27.25±2.04a	87.03±1.29a
	T5	5 803.95±124.58a	24.81±0.13a	87.74±0.19a
晚稻 Late rice	T6	5 730.39±2.06a	24.55±0.21a	88.32±0.13a
	CK	6 114.58±150.35c	26.06±0.48a	89.37±0.18a
	T1	8 104.17±104.17ab	23.01±0.42c	83.15±1.58ab
	T2	8 135.42±210.49ab	25.15±0.14ab	83.54±1.66ab
	T3	8 131.25±3.61ab	24.16±0.43bc	76.40±2.80b
	T4	8 500.00±60.14a	24.61±1.29ab	77.94±2.76b
	T5	8 510.42±42.1a	25.01±0.19ab	81.69±4.37b
	T6	7 656.25±18.04b	25.19±0.13ab	80.55±2.58b

注: 表中数值为平均值±标准误(n=3), 表中不同小写字母代表处理间在5%水平上差异显著(LSD)。下同。

Note: Data in the table are represented with mean±SE (n=3). Different lowercase letters in the table mean significant difference among treatments at 5% level (LSD). The same below.

表3 不同施肥处理对水稻生育期氮素累积和氮收获指数的影响

Table 3 Deep application of different fertilization treatments for double-cropping rice has effect on nitrogen accumulation and nitrogen harvest index during rice growth period

稻季 Season	处理 Treatment	各生育期氮素累积量 TNA at different stages/(kg·hm ⁻²)				氮收获指数 NHI%
		分蘖期/MT	孕穗期/HS	灌浆期/FS	成熟期/MS	
早稻 Early rice	CK	7.04±0.71c	12.47±0.75b	77.34±4.58b	102.35±1.03b	55.19±5.07ab
	T1	12.18±0.17a	23.35±1.68a	105.56±3.11a	133.41±14.5a	52.86±4.01b
	T2	11.49±1.59ab	21.69±2.73a	102.33±6.98a	123.70±0.30ab	54.34±0.85ab
	T3	10.42±0.98ab	20.81±0.43a	104.75±1.68a	129.28±3.57ab	58.94±0.41ab
	T4	10.13±0.92ab	20.13±1.99ab	100.62±3.11a	107.59±7.59ab	60.90±2.90ab
	T5	8.93±0.69bc	26.42±4.33a	107.22±3.38a	139.26±2.16a	63.31±0.96a
晚稻 Late rice	T6	9.46±0.70abc	23.84±3.34a	102.12±4.45a	129.66±8.12ab	55.21±2.46ab
	CK	42.80±1.80b	48.63±0.89b	53.57±0.89b	59.79±1.47b	62.80±2.22a
	T1	80.54±1.66a	114.64±9.76a	124.37±4.35a	138.91±0.05a	45.66±3.90c
	T2	70.24±3.00a	98.55±1.45a	122.00±1.45a	135.41±3.96a	44.55±1.34c
	T3	69.86±1.94a	106.89±2.61a	116.70±2.61a	131.07±5.08a	50.79±1.05bc
	T4	75.89±1.36a	111.89±1.89a	132.58±1.89a	136.79±2.72a	51.54±1.90bc
	T5	80.28±5.65a	101.76±7.08a	114.27±7.08a	132.73±1.61a	55.50±6.15ab
	T6	71.45±5.62a	70.34±4.86b	135.9±4.86a	136.82±3.18a	48.12±0.44bc

T1 处理,但 T2~T6 之间的差异在早稻季中差异不显著,晚稻季 T6 处理显著降低。

2.5 不同施肥处理对双季稻稻田氮挥发的影响

氮挥发是稻田氮素损失的重要途径,如图 2a 和

图 2c 所示,T1 处理早、晚稻氮挥发在施肥后第 3 d 达到峰值,分别为 $4.45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $8.66 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,之后快速下降到 $0.55 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.82 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,下降了 87.6% 和 90.5%,在追肥后第 2 d 达到第二个峰

表 4 不同施肥处理的氮素利用率

Table 4 Nitrogen utilization efficiency of different fertilization treatments for double cropping rice

稻季 Season	处理 Treatment	氮肥吸收利用率 NRE/%	氮肥农学利用率 NAE/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	氮肥生理利用率 NPE/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	氮肥偏生产力 NPFP/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
早稻 Early rice	CK	—	—	—	—
	T1	26.92±0.11d	11.25±0.54a	26.10±2.90b	39.93±0.54c
	T2	36.51±1.52bc	14.22±0.88a	27.63±0.88b	56.34±1.26a
	T3	37.07±0.59bc	11.12±0.48a	28.04±0.04ab	52.10±0.48b
	T4	37.93±1.20b	12.30±0.20a	36.36±4.89a	53.28±0.20ab
	T5	41.02±0.05a	13.16±3.30a	30.63±0.37ab	54.14±3.30ab
晚稻 Late rice	T6	35.00±0.10c	14.12±2.38a	33.50±1.50ab	55.10±2.38ab
	CK	—	—	—	—
	T1	34.71±1.71c	8.95±0.23a	29.08±1.23b	33.71±0.23b
	T2	41.71±2.95bc	11.72±2.74a	40.31±1.61a	42.66±2.74ab
	T3	41.39±3.24bc	9.23±0.07a	41.61±1.61a	40.55±0.45ab
	T4	61.32±4.15a	11.26±1.96a	42.50±2.50a	47.46±5.37a
	T5	59.86±4.66a	13.08±0.23a	41.50±0.77a	44.02±0.23a
	T6	53.87±3.25ab	10.80±0.82a	40.13±0.67a	41.74±0.82ab

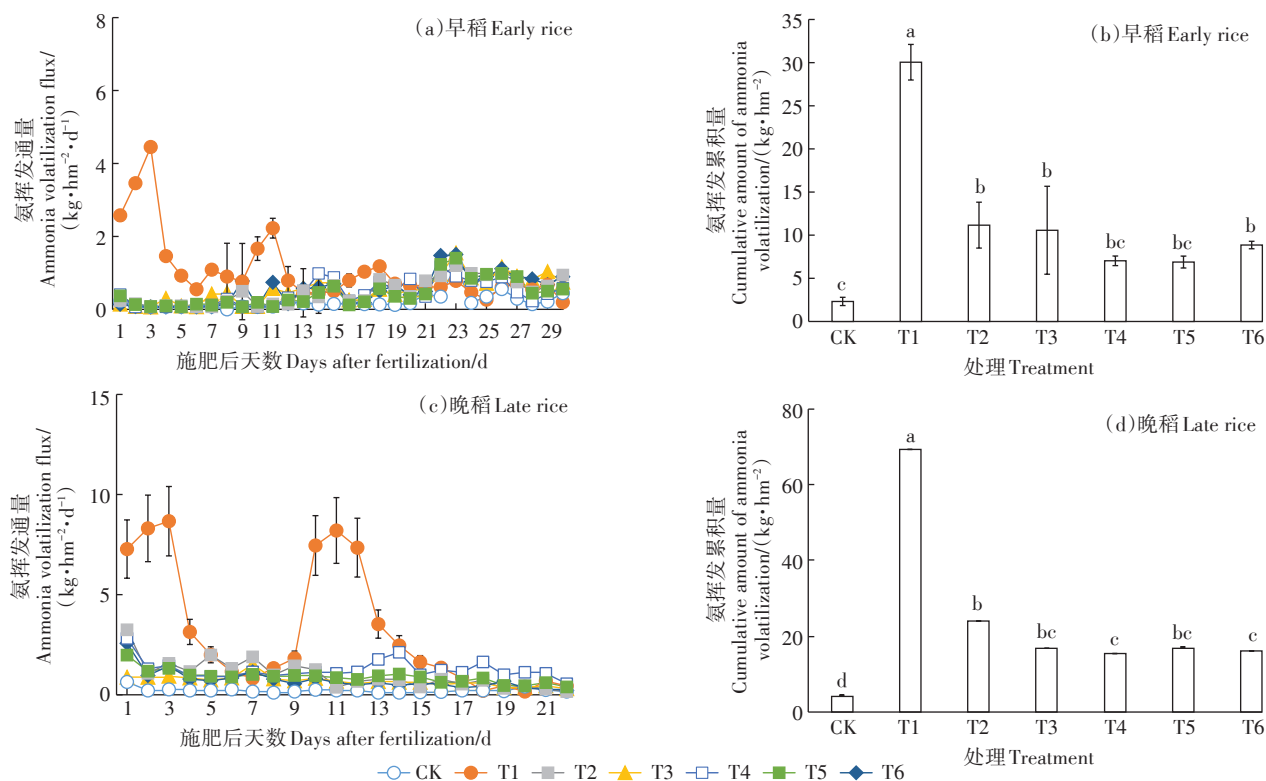
表 5 不同施肥处理下机插双季稻经济效益

Table 5 Economic profit of machine-transplanted double-cropping rice under different fertilization treatments

稻季 Season	处理 Treatment	产值/(元· hm^{-2}) Output/ ($\text{yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$)	肥料成本/(元· hm^{-2}) Fertilizer cost/ ($\text{yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$)	人工费用/(元· hm^{-2}) Labor cost/ ($\text{yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$)	机械费用/(元· hm^{-2}) Machining cost/ ($\text{yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$)	经济效益/(元· hm^{-2}) Economic profit/ ($\text{yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$)	产投比 Output/Input
早稻 Early rice	T1	14 744a	1 487	1 920	0	11 337b	4.33b
	T2	15 110a	1 114	0	1 200	12 796a	6.53a
	T3	14 713a	1 132	0	1 200	12 381a	6.31a
	T4	14 795a	1 155	0	1 200	12 440a	6.28a
	T5	15 090a	1 173	0	1 200	12 717a	6.36a
	T6	14 899a	1 191	0	1 200	12 508a	6.23a
晚稻 Late rice	T1	21 071ab	1 517	1 920	0	17 634b	6.13c
	T2	21 152ab	1 213	0	1 200	18 739ab	8.77ab
	T3	21 141ab	1 238	0	1 200	18 704ab	8.67ab
	T4	22 100a	1 257	0	1 200	19 643a	9.00a
	T5	22 127a	1 276	0	1 200	19 651a	8.94a
	T6	19 906b	1 296	0	1 200	17 410b	7.98b

注:复合肥(20-10-10)为 2.20 元· kg^{-1} ,专用肥(23.1-9.9-19.8)含 0%、10%、20%、30、40% 缓控释氮价格分别是 2.45、2.49、2.54、2.58、2.62 元· kg^{-1} 。复混肥(20-8-12)为 2.20 元· kg^{-1} ,专用肥(27.1-7.4-18.5)含 0%、10%、20%、30、40% 缓控释氮价格分别为 2.49、2.54、2.58、2.62、2.66 元· kg^{-1} 。早、晚稻籽粒价格为 2.60 元· kg^{-1} 。插秧、施肥人工费为 160 元· d^{-1} ,机械一体化费用为 1 200 元· hm^{-2} 。经济效益=水稻产量×单价-肥料成本-人工费用-机械费用,各处理与其他农作费用一致。

Note: Compound fertilizer (20-10-10) is 2.20 yuan· kg^{-1} , special fertilizer (23.1-9.9-19.8) containing 0%, 10%, 20%, 30, 40% slow and controlled release nitrogen prices are 2.45, 2.49, 2.54, 2.58, 2.62 yuan· kg^{-1} . Compound fertilizer (20-8-12) is 2.20 yuan· kg^{-1} , Special fertilizer (27.1-7.4-18.5) containing 0%, 10%, 20%, 30, 40% slow and controlled release nitrogen prices are 2.49, 2.54, 2.58, 2.62, 2.66 yuan· kg^{-1} . The grain price for early- and late-rice is 2.6 yuan· kg^{-1} , the labor cost for transplanting and fertilizing is 160 yuan· d^{-1} , the cost of mechanical integration is 1 200 yuan· hm^{-2} . Economic benefit =rice yield × unit price-fertilizer cost-labor cost-machinery cost.All other farming costs are the same.



柱上不同小写字母代表处理间在 5% 水平上差异显著(LSD)。下同
Different lowercase letters above the bars mean significant difference among treatments at 5% level(LSD). The same below

图2 双季稻田氨挥发通量和氨挥发累积量的动态变化

Figure 2 Dynamic changes of ammonia volatilization flux and ammonia volatilization cumulative amount in double-cropping rice fields

值 $2.22 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $8.02 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 随后快速下降并在一定范围波动。在早稻季中, T2~T6 处理的氨挥发通量未表现出明显的峰值, 一直在 $2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 以下水平, 并整体有缓慢上升的趋势; 在晚稻季中, T2、T4、T6 处理在施肥后第 1 d 就达到峰值, 分别为 3.24 、 $2.81 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $2.56 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 之后一直在 $1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 左右的较低水平波动。监测期间的氨挥发累积损失量见图 2b 和图 2d, T2~T6 处理相比于 T1 处理表面施肥氨挥发累积量早、晚稻分别减少 62.8%~77.1% 和 65.36%~77.68%, T3~T6 处理相比 T2 处理氨挥发累积量减少 5.28%~38.26% 和 29.40%~35.58%。早、晚稻季, T2~T6 处理的氨挥发累积量均显著低于 T1 处理; 在 T2~T6 处理中, 早稻季各处理差异不显著, 晚稻季中 T4 和 T6 处理显著低于 T2 处理。以上说明深施处理能显著减少氨挥发带来的氮素损失, 同时添加缓控释肥能进一步减少氨挥发的损失。

2.6 不同施肥处理对氮素径流损失的影响

田面水总氮浓度的动态变化如图 3a 和 4a 所示, 总氮浓度早、晚稻的变化趋势基本保持一致, T1 处理均在施肥后的 1~3 d 达到第一个峰值 $39.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和

$47.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 随后迅速下降, 并在施肥 7 d 后下降到 $13.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $6.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 分别下降了 66.5% 和 86.7%。第二个峰值出现在追施分蘖肥后的第 2 d, 分别为 $38.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $33.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 之后开始下降, 并在 10 d 左右趋于稳定; 相比于 T1 处理, T2 处理早、晚稻的田面水总氮峰值浓度分别下降了 43.6% 和 68.8%。T2~T6 处理中, 早、晚稻田面水总氮浓度变化趋势基本一致, 早稻的总氮浓度只有一个峰值, 均出现在施肥后的第 3 d, 分别达到 22.15 、 21.68 、 14.38 、 14.73 、 $11.70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 随后总氮浓度在一定范围内波动; 在晚稻季中, T2~T6 处理的峰值出现了不一致, 分别在施肥后的 5、3、3、5、7 d。

田面水中可溶性氮的动态变化如图 3d、图 3f 和图 4d、图 4f, 早、晚稻的铵态氮变化趋势与总氮变化基本一致, 而硝态氮的总体含量较低, 且变化没有呈现出明显的规律。

总氮和铵态氮的平均浓度如图 3b、图 3d 和图 4b、图 4d, 二者变化趋势基本一致, 均为 $\text{T1} > \text{T2} > \text{T3} > \text{T4} > \text{T5} > \text{T6}$ 。田面水总氮和铵态氮平均浓度, 与 T1 处理相比, T2 处理分别降低了 41.78%、43.48% (早稻) 和

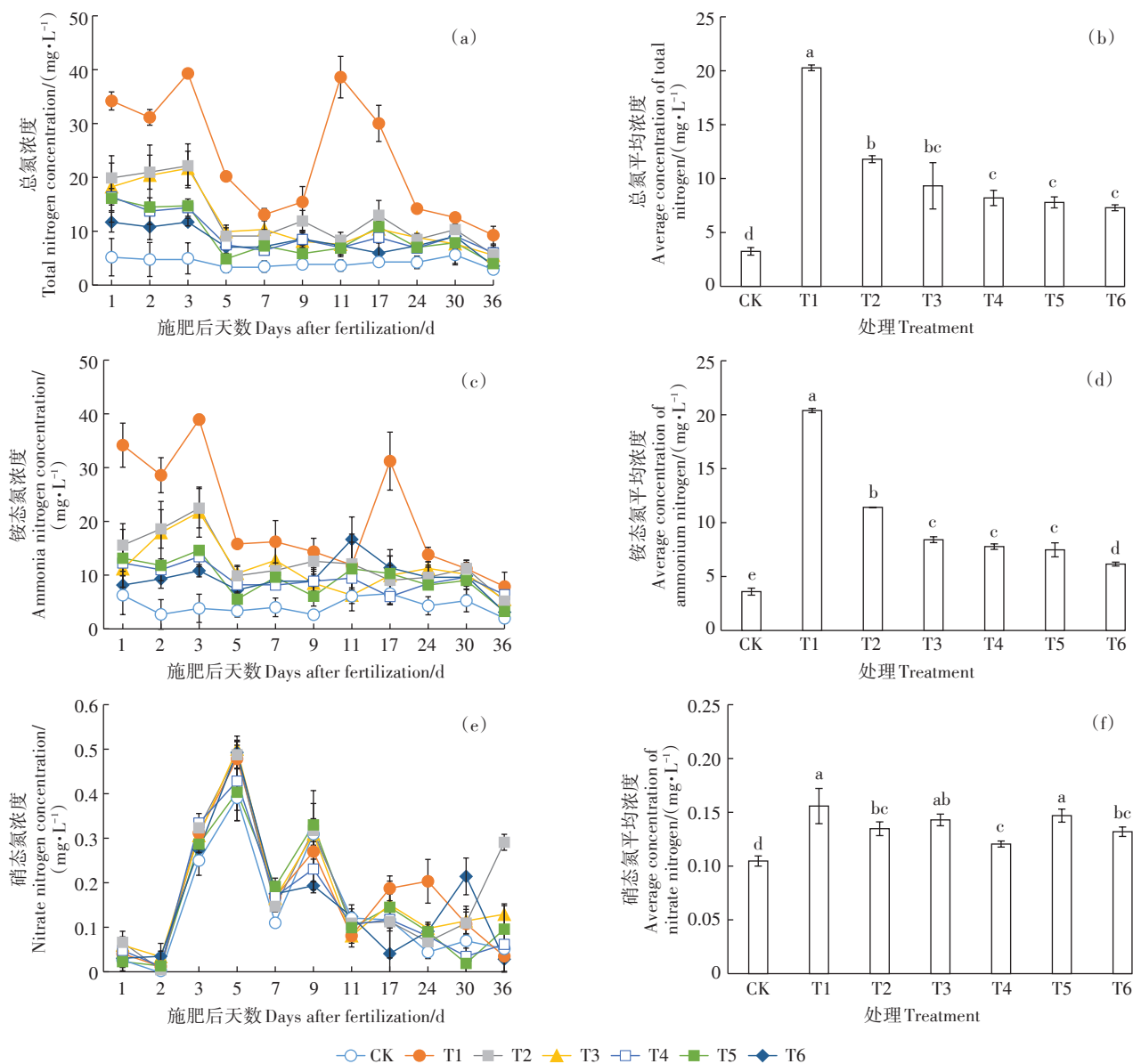


图3 早稻季田面水氮浓度动态变化

Figure 3 Dynamic changes of surface water nitrogen concentration in early-season rice field

62.62%、54.97% (晚稻); 在 T2~T6 处理中, 相比 T2 处理, T3~T6 处理分别降低了 20.90%~38.22%、26.26%~46.09% (早稻) 和 7.39%~29.14%、42.57%~45.61% (晚稻); 其中 T4 处理的早、晚稻田面水总氮和铵态氮平均浓度均显著低于 T2 处理。各处理间硝态氮浓度差异并无明显规律, 且浓度较低。

2.7 不同施肥处理对土壤碱解氮的影响

土壤碱解氮的水平是反映土壤供氮能力的重要指标, 经过早、晚稻耕作后, 各处理的土壤碱解氮含量如图 5 所示。在早稻季 T2~T6 处理中, T3~T6 处理与 T2 处理相比差异不显著。在晚稻季 T2~T6 处理中,

与 T2 处理相比, T6 处理提高了土壤中碱解氮含量, 但 T3~T6 处理与 T2 处理差异不显著。

3 讨论

3.1 缓控释氮与速效氮配比对水稻产量及产量构成的影响

肥料深施与缓控释肥都能延长肥效, 减少肥料施用量, 提升肥料利用率^[8], 并减少农田氨挥发和氮素淋溶损失^[15-16]。有研究表明, 采用缓控释氮肥一次性侧深施, 减氮 16.2%~20% 处理比农民习惯施肥处理增产 6%~12.26%^[17-19]。采用缓控释氮部分代替速效氮,

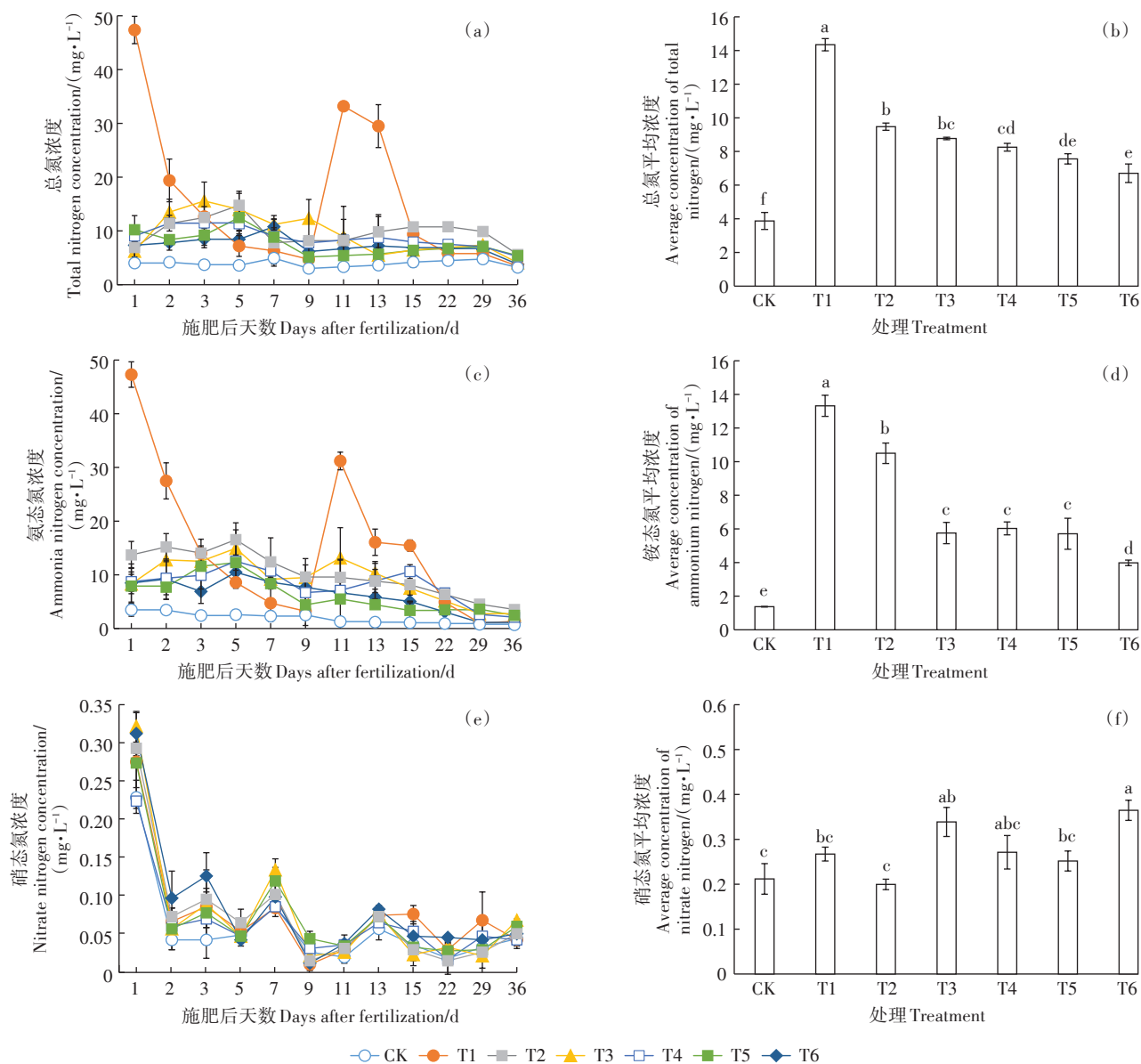


图4 晚稻季田面水氮浓度动态变化

Figure 4 Dynamic change of surface water nitrogen concentration in late-season rice field

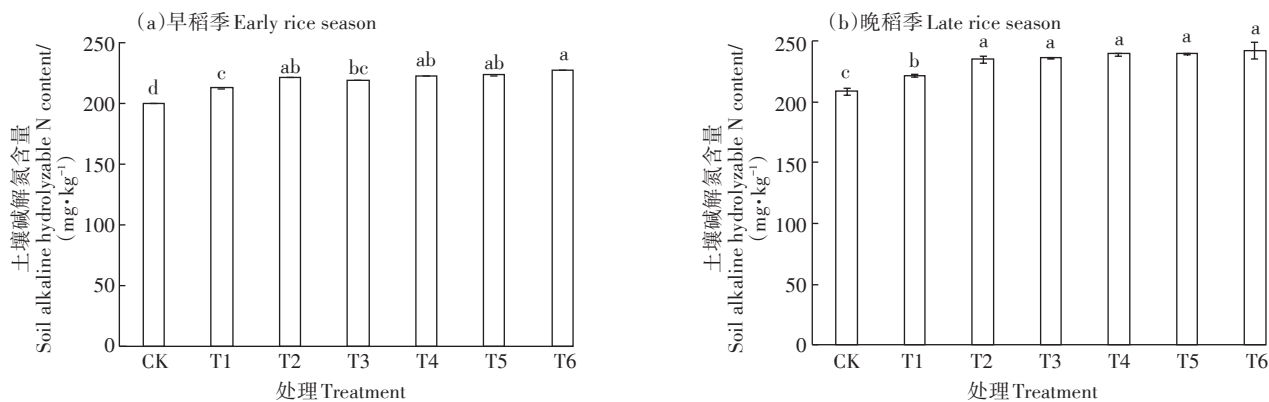


图5 不同施肥处理间收获期土壤中碱解氮的含量

Figure 5 The content of alkali-hydrolyzable nitrogen in the soil during the harvest period between different fertilization treatments

在兼顾成本的同时能有效增加土壤中无机氮含量,促进土壤微生物繁殖,优化产量构成因子,达到水稻增产目标^[20-21]。在本研究中,早、晚稻T1~T5处理间产量差异均不显著(表2),这与王海月等^[22]的研究结果相似。

研究表明^[23-24],速效氮与缓控释氮比例为6:4,一次性表施时的水稻增产效果和提高氮素利用率最好。而本研究中,晚稻T6处理的产量显著低于T4和T5处理。原因可能是深施肥条件下减少肥料损失,延长了速效肥的肥效,从而添加较少的缓控释氮也能达到较好的产量。但不同地区作物的缓控释肥与速效肥的比例有差异^[25-26],这可能与不同地区的土壤类型和缓控释肥的种类有关。在本研究的经济效益中(表5),早、晚稻T2~T5处理间产投比差异均不显著,即在同样的深施肥处理中,添加缓控释氮(T3~T5)处理与只添加速效氮(T2)处理的经济效益差异不显著。

本研究产量构成中,与T2处理相比,早、晚稻季T3~T6处理的结实率和千粒质量各处理间差异不显著,说明添加缓控释肥处理对水稻的结实率和千粒质量没有显著影响,这与前人的研究结果一致^[9];但是晚稻季中,CK处理的千粒质量和结实率均高于T1~T6处理。其原因可能是:(1)CK处理水稻秸秆的生物量较低,使得植株透气和透光性好,产量较低但结实率高。(2)较大的生物量不利于水稻的干湿交替,陆大克等^[27]认为,轻度适宜的干湿交替灌溉能促进强健根系形态的建成,提高养分吸收利用,从而促进水稻的结实。

3.2 缓控释氮与速效氮配比对氮肥利用率和土壤碱解氮的影响

与农民习惯施肥相比,尿素深施的氮素利用率提高18%左右^[28]。采用机插一次性侧深施控释氮肥的NRE高于单一的控释氮表施和速效氮深施,早、晚稻NRE达到了48%、63%^[29];采用缓控释肥与速效氮配比深施,早、晚稻的肥料利用率可达到50%~60%,但添加缓控释氮肥的比例,不同地区存在差异^[21,30]。在本研究中,T2~T6处理的NRE为35.00%~41.02%(早稻)和41.39%~61.32%(晚稻),其中T4处理早、晚稻的NRE分别为37.93%和61.32%,T5处理早、晚稻的NRE分别为41.02%和59.86%,均表现较好。说明在机插同步一次性侧深施肥作业方式下,同时添加30%缓控释肥的施肥模式,能最大限度地提高水稻NRE。

钟雪梅等^[8]的研究表明,在普通化肥减量深施条件下,随着氮肥施用量的减少,土壤中的碱解氮含量有下降趋势,这可能造成下一季水稻的减产。有研究结果表明^[23-24,31],在控释氮与速效氮比例为4:6时,能

提高土壤的无机氮水平。在本试验结果中,与T2~T5处理相比,T6处理土壤的碱解氮只在早稻季中显著高于T3处理,而与早、晚稻其他处理均无显著差异。其次,晚稻T6处理产量显著低于T4和T5处理(表2),导致这样的原因可能是:缓控释氮肥代替部分速效氮深施进一步减少了氮素损失,使土壤一直保持较高的无机氮水平,使水稻贪青,不利于水稻的高产。

3.3 缓控释氮与速效氮配比深施对氨挥发以及氮素径流损失的影响

有效降低施肥后7~9 d内的田面水中氮素浓度是减少氮素损失的关键^[32-33]。与农民习惯施肥相比,一定比例速效氮与缓控释氮减氮配施,可显著降低田面水中氮浓度,减少氨挥发损失^[34-35]。

氮素肥料的深施和条施能有效降低氮素损失^[36-37]。在机插同步一次性侧深施肥作业方式下,采用不同的缓控释氮混合施用,在减氮20%~30%时,显著降低了田面水氮浓度^[38]。在本研究中,与农民习惯施肥相比,T2~T6处理显著降低了施肥后田面水的总氮和铵态氮浓度,且没有二次峰值,这与前人的研究结果一致^[39]。在T2~T6处理中,与T2处理相比,添加缓控释氮能有效降低氨挥发损失量,但是差异不显著。而田面水总氮和铵态氮平均浓度有随着缓控释氮比例升高而下降的趋势,其中T4~T6处理均显著低于T2处理(图3和图4),即当缓控释氮比例为20%时的田面水总氮、铵态氮的平均浓度均已显著低于T2处理,而田面水的硝态氮浓度各处理均低且差异不显著。说明在机插一次性侧深施肥作业方式下,添加20%缓控释氮,比单一的速效氮处理,能显著降低氮素径流损失和氨挥发损失。

T4与T5处理在产量、氨挥发、氮素径流损失之间的差异均不显著,结合经济效益,综合考虑下推荐适宜的缓控释氮配比为20%。

4 结论

与农民习惯施肥相比,采用机插同步一次性侧深施肥作业方式,早稻氮肥减量30%,晚稻氮肥减量20%,早、晚稻不减产。添加10%~40%的缓控释氮对早、晚稻产量的影响不显著。添加0%~30%的缓控释肥,处理间土壤中碱解氮含量差异不显著。添加20%的缓控释氮能够显著降低水稻氨挥发和氮素径流损失,对水稻绿色生产具有重要意义。因此,推荐湖南洞庭湖双季稻生产区,在机插同步一次性侧深施肥作业方式下,采用速效氮与缓控释氮8:2的配比施用。

参考文献:

- [1] 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 S B, HUANG J L, ZHONG X H, et al. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(9): 1095-1103.
- [2] 刘立军, 杨立年, 孙小淋, 等. 水稻实地氮肥管理的氮肥利用效率及其生理原因[J]. 作物学报, 2009, 35(9): 1672-1680. LIU L J, YANG L N, SUN X L, et al. Fertilizer-nitrogen use efficiency and its physiological mechanism under site specific nitrogen management in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(9): 1672-1680.
- [3] 国家统计局. 关于我国近20年农用肥料用量统计[DB/OL]. (2018-11-29) [2020-08-20]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&z=0A0D06&sj=2018>. National Bureau of Statistics. Statistics on my country's agricultural fertilizer consumption in the past 20 years [EB/OL]. (2018-11-29) [2020-08-20]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&z=0A0D06&sj=2018>.
- [4] 李秀芬, 朱金兆, 顾晓君, 等. 农业面源污染现状与防治进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(4): 81-84. LI X F, ZHU J Z, GU X J, et al. Current situation and control of agricultural non-point source pollution[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(4): 81-84.
- [5] 王科, 李浩, 张成, 等. 化肥过量施用的危害及防治措施[J]. 四川农业科技, 2017(9): 33-35. WANG K, LI H, ZHANG C, et al. Harm of excessive application of chemical fertilizers and control measures[J]. *Sichuan Agricultural Science and Technology*, 2017(9): 33-35.
- [6] 傅国海, 辛景树, 吴远帆, 等. 湖南晚稻"机插秧同步侧深施肥+病虫害绿色防控"技术大面积示范及效果[J]. 中国稻米, 2020, 26(5): 94-96, 101. FU G H, XIN J S, WU Y F, et al. Demonstration and effects of "synchronized side-deep fertilization technology of machine-transplanted rice + green prevention and control of diseases and insect pests" technology in Hunan Province[J]. *China Rice*, 2020, 26(5): 94-96, 101.
- [7] 罗翔, 药林桃, 舒时富, 等. 机插秧同步精量侧深施肥对水稻生长及产量的影响[J]. 江西农业学报, 2020, 32(2): 1-8. LUO X, YAO L T, SHU S F, et al. Effects of machine insertion synchronous precision side deep fertilizing on growth and yield of rice[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2020, 32(2): 1-8.
- [8] 钟雪梅, 黄铁平, 彭建伟, 等. 机插秧同步一次性精量施肥对双季稻养分累积及利用率的影响[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(5): 436-446. ZHONG X M, HUANG T P, PENG J W, et al. Effects of machine-transplanting synchronized with one-time precision fertilization on nutrient uptake and use efficiency of double cropping rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2019, 33(5): 436-446.
- [9] KE J, HE R C, HOU P F, et al. Combined controlled-released nitrogen fertilizers and deep placement effects of N leaching, rice yield and N recovery in machine-transplanted rice[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 265: 402-412.
- [10] 柯健. 氮肥种类和施肥方式对水稻产量及氮素去向的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2017. KE J. Effects of nitrogen fertilizer types and fertilization methods on rice yield and nitrogen fate[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.
- [11] 张欢, 潘贤, 刘晓霞, 等. 侧深施肥搭配缓控释肥对水稻生长及其产量的影响[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(7): 1323-1325. ZHANG H, PANG X, LIU X X, et al. The effect of side-depth fertilization combined with slow and controlled-release fertilizer on rice growth and yield[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2020, 61(7): 1323-1325.
- [12] 陈剑秋. 几种新型缓控释肥工艺及养分释放特征研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012. CHEN J Q. Study on technology and nutrient release characteristics of new slow/controlled release fertilizers[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2012.
- [13] 南京农业大学. 土壤农化分析[M]. 二版. 北京: 农业出版社, 1986. Nanjing Agricultural University. Soil agrochemical analysis[M]. Second Edition. Beijing: Agriculture Press, 1986.
- [14] 惠大丰, 姜长鉴. 统计分析系统SAS软件实用教程[M]. 北京: 航空航天大学出版社, 1996: 27-52. HUI D F, JIANG C J. Statistical analysis system SAS software practical course[M]. Beijing: University of Aeronautics and Astronautics Press, 1996: 27-52.
- [15] WANG B, YU E L, WAN Y F, et al. Modifying nitrogen fertilizer practices can reduce greenhouse gas emissions from a Chinese double rice cropping system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 215: 100-109.
- [16] JI Y, LIU G, MA J, et al. Effects of urea and controlled release urea fertilizers on methane emission from paddy fields: A multi-year field study[J]. *Pedosphere*, 2014, 24(5): 662-673.
- [17] 沈欣, 辛景树, 徐洋, 等. 以减氮为核心的水稻侧深施肥技术集成示范[J]. 中国农技推广, 2020, 36(5): 48-51. SHEN X, XIN J S, XU Y, et al. Side deep fertilization of rice with nitrogen reduction as the core technology integration demonstration[J]. *China Agricultural Technology Extension*, 2020, 36(5): 48-51.
- [18] 丁艳锋, 李刚华, 李伟伟, 等. 水稻机插缓混一次施肥技术的研发与示范[J]. 中国稻米, 2020, 26(5): 11-15. DING Y F, LI G H, LI W W, et al. Introduction to the one-time fertilization technology for mechanized transplanting rice: Side deep application of controlled-release blend fertilizer[J]. *China Rice*, 2020, 26(5): 11-15.
- [19] 汤海涛, 马国辉, 罗锡文, 等. 水稻机械精量穴直播定位深施肥节氮栽培效果研究[J]. 农业现代化研究, 2011, 32(1): 111-114. TANG H T, MA G H, LUO X W, et al. Effects of mechanical precise hill-drop drilling and located depth-fertilization on rice nitrogen-saving[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2011, 32(1): 111-114.
- [20] 李玉洁, 何杰, 王昌全, 等. 控释氮肥配施尿素对土壤无机氮、微生物及水稻生长的影响[J]. 土壤, 2018, 50(3): 469-475. LI Y H, HE J, WANG C Q, et al. Effects of controlled release nitrogen fertilizer combined with urea on soil inorganic nitrogen, microorganism and rice growth[J]. *Soils*, 2018, 50(3): 469-475.
- [21] 钟雪梅, 吴远帆, 彭建伟, 等. 控释掺混肥机插侧深施实现双季稻增产与增效[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 256-262. ZHONG X M, WU Y F, PENG J W, et al. Machine-transplanting with side-deep fertilization of controlled-release blended fertilizer improved yield and nitrogen use efficient of double-cropping rice[J]. *Journal of Soil*

- and Water Conservation, 2020, 34(4):256-262.
- [22] 王海月, 李玥, 孙永健, 等. 不同施氮水平下缓释氮肥配施对机插稻氮素利用特征及产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2017, 31(1): 50-64. WANG H Y, LI Y, SUN Y J, et al. Effects of slow-release urea on nitrogen utilization and yield in mechanically-transplanted rice under different nitrogen application rates[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2017, 31(1):50-64.
- [23] 张敬昇, 李冰, 王昌全, 等. 控释氮肥与尿素掺混比例对作物中后期土壤供氮能力和稻麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 110-118. ZHANG J S, LI B, WANG C Q, et al. Effects of the blending ratio of controlled release nitrogen fertilizer and urea on soil nitrogen supply in the mid-late growing stage and yield of wheat and rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(1):110-118.
- [24] 付月君. 控释氮肥与尿素配施对水稻生长及氮素吸收累积的影响研究[D]. 成都:四川农业大学, 2016. FU Y J. Effect of controlled release nitrogen fertilizer combined with urea on rice growth and nitrogen accumulation[D]. Chengdu:Sichuan Agricultural University, 2016.
- [25] 钱银飞, 邵彩虹, 邱才飞, 等. 包膜缓释尿素与普通尿素配施对双季超级稻产量及氮肥利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015(5): 27-32. QIAN Y F, SHAO C H, QIU C F, et al. Effects of the different mixture rates of coated slow-release urea and prilled urea on the growth of double-cropping super rice and the utilizing rate of nitrogen [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2015(5):27-32.
- [26] 姬景红, 李玉影, 刘双全, 等. 控释掺混肥对春玉米产量、光合特性及氮肥利用率的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(3): 669-675. JI J H, LI Y Y, LIU S Q, et al. Effects of different mixing rates of controlled-release urea and common urea on grain yield and nitrogen use efficiency of spring maize[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(3):669-675.
- [27] 陆大克, 段骥, 王维维, 等. 不同干湿交替灌溉与氮肥形态耦合下水稻根系生长及功能差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(8): 1362-1372. LU D K, DUAN H, WANG W W, et al. Comparison of rice root development and function among different degrees of dry-wet alternative irrigation coupled with nitrogen forms[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(8):1362-1372.
- [28] 苏正义, 韩晓日, 李春全, 等. 氮肥深施对作物产量和氮肥利用率的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 1997(4):292-296. SU Z Y, HAN X R, LI C Q, et al. Effect of deep placement N fertilizers on crop yields and use efficiency of nitrogen[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 1997(4):292-296.
- [29] 朱从桦, 张玉屏, 向镜, 等. 侧深施氮对机插水稻产量形成及氮素利用的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(23):4228-4239. ZHU C H, ZHANG Y P, XIANG J, et al. Effects of side deep fertilization on yield formation and nitrogen utilization of mechanized transplanting rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(23):4228-4239.
- [30] 王孟兰, 孙婷, 苏舜. 控释BB肥侧深施对水稻产量、氮肥利用率及经济效益的影响[J]. 上海农业科技, 2019(5):99-101. WANG M L, SUN T, SU S, et al. Deep application of controlled-release BB fertilizer on rice yield, Nitrogen utilization rate and economic benefits[J]. *Shanghai Agricultural Science and Technology*, 2019(5):99-101.
- [31] 王晓琪, 朱家辉, 陈宝成, 等. 控释尿素不同比例配施对水稻生长及土壤养分的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 178-182. WANG X Q, ZHU J H, CHEN B C, et al. Effects of different proportion of controlled-release urea on rice growth and soil nutrient[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(4):178-182.
- [32] 田昌, 周旋, 黄思怡, 等. 控释尿素减施对稻田CH₄和N₂O排放及经济效益的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(11):2223-2230. TIAN C, ZHOU X, HUANG S Y, et al. Effects of controlled-release urea reduction on CH₄ and N₂O emissions and its economic benefits in double cropping paddy fields[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 28(11):2223-2230.
- [33] 黄思怡, 田昌, 谢桂先, 等. 控释尿素减少双季稻田氨挥发的主要机理和适宜用量[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(12):2102-2112. HUANG S Y, TIAN C, XIE G X, et al. Mechanism and suitable application dosage of controlled-release urea effectively reducing ammonia volatilization in double-cropping paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(12):2102-2112.
- [34] 张英鹏, 李洪杰, 刘兆辉, 等. 农田减氮调控施肥对华北潮土区小麦-玉米轮作体系氮素损失的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4):1179-1187. ZHANG Y P, LI H J, LIU Z H, et al. Effect of reducing N and regulated fertilization on N loss from wheat-maize rotation system of farmland in Chao soil region of North China Plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4):1179-1187.
- [35] LIU X D, CHEN L Y, HUA Z L, et al. Comparing ammonia volatilization between conventional and slow-release nitrogen fertilizers in paddy fields in the Taihu Lake region[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(2):8386-8394.
- [36] 周平遥, 张震, 王华, 等. 不同深施肥方式对稻田氨挥发及水稻产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(11):2683-2691. ZHOU P Y, ZHANG Z, WANG H, et al. Effects of deep fertilization methods on ammonia volatilization and rice yield in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(11):2683-2691.
- [37] 段然. 施肥方式对稻田氮素转化的影响及其微生物学机制[D]. 北京:中国农业科学院, 2018. DUAN R. Effects of fertilization methods on nitrogen transformation in paddy fields and their microbiological mechanisms[D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018.
- [38] 侯朋福, 薛利祥, 周玉玲, 等. 掺混控释肥侧深施对稻田田面水氮素浓度的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(1):16-21. HOU P F, XUE L X, ZHOU Y L, et al. The effect of side deep fertilization for resin blending controlled-release fertilizer on nitrogen concentration in surface water of paddy field[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(1):16-21.
- [39] 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. JIN S Q, CHEN R X, WANG F, et al. Effect of different nitrogen fertilizer application modes on the variation of nitrogen concentration in paddy field surface water and the yield of rice[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(1):242-248.