

红壤水稻土上双季稻氮素减施增效方法比较^①

吴 萌¹, 李委涛¹, 刘 佳¹, 刘 明¹, 江春玉¹, 李忠佩^{1,2*}

(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)

摘要: 目前我国正在大力推进化肥零增长战略, 各种减肥增效措施的实际应用效果越来越受到关注。本文通过连续3年的田间定位试验, 探索在红壤地区双季稻种植模式下减氮增效的方法。在江西省典型的红壤水稻土上, 设置不施氮肥(CK)、常规施氮量下的农民习惯施氮(C1)、减氮30 kg/hm²下分次施氮(C2)、减氮30 kg/hm²下20%缓释尿素一次施用(H1)、减氮30 kg/hm²下50%缓释尿素一次施用(H2)和减氮30 kg/hm²下80%缓释尿素一次施用(H3)共6个处理。结果表明:C2、H1、H2和H3处理在早晚稻上比C1处理减施氮素30 kg/hm²的情况下, 产量、秸秆生物量、有效穗数、千粒重、籽粒和秸秆的养分含量没有显著性差异($P>0.05$);同样除CK外, 其他处理植株吸氮总量和氮收获指数也没有显著差异($P>0.05$);试验3年后各处理的土壤全氮和速效养分也没有显著性差异($P>0.05$)。但是C2、H1、H2和H3处理的氮肥偏肥生产力和氮肥吸收利用率都显著高于C1处理($P<0.05$), 其中C2、H1、H2和H3处理的氮肥偏生产力6季平均分别提升了19.0%、17.8%、19.9%和24.5%, 而氮肥吸收利用率6季平均分别提升了61.7%、44.9%、57.3%和72.3%。而C2处理的氮肥偏肥生产力和氮肥吸收利用率与H1、H2和H3处理之间无显著差异($P>0.05$)。分次施氮和施用缓释尿素两种方法均是红壤水稻土上减氮增效的有效方法。减氮30 kg/hm²下, 普通尿素配合施用20%比例的缓释尿素可以满足水稻生长的需求, 而施用更高比例的缓释尿素(50%和80%)并不会提高水稻产量和氮肥利用率。综合考虑成本, 一次性施用20%的缓释尿素是更为切实可行的减氮增效方法。

关键词: 减氮增效; 缓释尿素; 水稻产量; 氮肥利用率

中图分类号: S147.3; S511

文献标识码: A

氮肥在作物生产中具有十分重要的作用, 占世界化肥总量中的一半以上。氮肥也是我国消费量最大的化学肥料, 约占化肥总量的2/3。我国单位面积氮肥用量远高于世界平均水平, 各地区水稻施氮量普遍偏高。我国稻田单季氮肥用量平均为180 kg/hm², 比世界平均用量高75%左右^[1]。过高的氮肥用量和不合理的施用方法导致氮肥利用率下降, 损失的氮素大部分进入大气或水体中, 从而加剧大气中氮氧化物的积累, 流入江河及湖泊中加剧了地表水的富营养化及地下水硝酸盐的污染^[2-3], 目前已成为污染环境最重要的氮源。因此, 如何提高氮肥利用率是提高化肥利用率和解决农业环境污染的一个核心问题。

目前我国正在大力推进化肥减施增效计划, 农业部制定了《到2020年化肥使用量零增长行动方案》, 可见减肥增效已经得到了很高的重视, 其中氮素的减

施尤其重要。目前在水稻上减少氮肥投入的措施有测土配方施肥^[4], 加强田间管理如以控肥、控苗、控病虫为核心的水稻“三控”施肥技术^[5], 施用缓释氮肥减少氮肥流失^[6]等几个方面。在生产实践中, 目前水稻常采用氮肥撒施的方法, 施肥过程中稻田表面水体中铵态氮浓度增加, 导致大量的氨挥发损失^[7-8]。农民通常在水稻移栽后很快将大部分氮肥施下, 而此时正值水稻幼苗返青和分蘖初期, 吸氮量很小, 因淋失和挥发会造成大量氮素损失, 而中后期正值水稻吸氮最多的时期往往氮素供应不足^[9]。为了解决这一矛盾, 可以选择氮肥分次施用, 或是使用缓释氮肥, 从而保证在水稻整个生育期都有足够的氮素供应。目前关于增加施肥次数和施用缓释肥的方法均有报道^[10-12], 然而对红壤区双季稻上关于两种方法应用效果的对比非常少见, 本文通过大田试验, 探讨氮肥分次施用和

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2013CB127401)、江苏省青年科学基金项目(BK20131044)和国家青年基金项目(41401258)资助。

* 通讯作者(zhpli@issas.ac.cn)

作者简介: 吴萌(1985—), 男, 山东曲阜人, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤有机质研究。E-mail: mwu@issas.ac.cn

施用不同比例缓释氮肥在减施氮素条件下对红壤地区双季稻产量及氮肥利用率的影响,以期为该地区双季稻减氮增效提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2013 年 4 月—2015 年 10 月在江西省上高县泗溪镇(115°09'32" E, 28°32'29" N)进行。该地区为典型的季风气候区, 年平均气温 17.6 ℃, 年均无霜期 276 d, 年均降雨量 1700 mm。本区农业生产以双季稻为主。供试土壤类型为红壤性水稻土, 基本理化性质:pH 4.96, 有机质 20.5 g/kg, 全氮 1.75 g/kg, 全磷 0.65 g/kg, 全钾 27.7 g/kg, 碱解氮 191 mg/kg, 有效磷 42.6 mg/kg, 速效钾 92.0 mg/kg。

1.2 试验设计

供试早稻品种为中嘉早 17, 每年 4 月底移栽插

秧, 7 月底收获; 晚稻品种为五丰优 T025, 每年晚稻在早稻收获后立刻移栽, 11 月份收获。试验设 6 个处理, 分别为: 不施氮肥 (CK); 常规施氮量下农民习惯施氮 (C1); 减氮 30 kg/hm² 下分次施氮 (C2); 减氮 30 kg/hm² 下 20% 缓释尿素一次施用 (H1); 减氮 30 kg/hm² 下 50% 缓释尿素一次施用 (H2); 减氮 30 kg/hm² 下 80% 缓释尿素一次施用 (H3)。各处理早晚稻均施 P₂O₅ 90 kg/hm² 和 K₂O 150 kg/hm², 肥料品种分别为钙镁磷肥(含 P₂O₅ 120 g/kg)和氯化钾(含 K₂O 600 g/kg)。各处理施用的普通氮肥为尿素(含 N 460 g/kg)、H1、H2 和 H3 处理施用自制包膜缓释尿素(含 N 417 g/kg, 缓释期为 90 d), 氮肥施用量和施用方法如表 1 所示。插秧时穴距约为 20 cm, 水稻种植密度约为 19 万穴/hm², 各处理重复 4 次, 随机区组排列。小区面积为 42 m²(6 m × 7 m)。小区间用宽 40 cm、高 40 cm 的土埂隔开, 并上覆盖薄膜, 防止串水串肥。

表 1 不同处理的氮肥用量及施用方法
Table 1 Nitrogen fertilizer amounts and application methods under different treatments

处理	缓释氮肥比例 (%)	早稻			晚稻		
		氮肥用量(N, kg/hm ²)	基肥: 分蘖肥: 穗肥		氮肥用量(N, kg/hm ²)	基肥: 分蘖肥: 穗肥	
CK	0	0	—	—	—	—	—
C1	0	165	60-40-0	195	50-50-0		
C2	0	135	40-30-30	165	40-30-30		
H1	20	135	100-0-0	165	100-0-0		
H2	50	135	100-0-0	165	100-0-0		
H3	80	135	100-0-0	165	100-0-0		

1.3 测定项目与方法

每季水稻收获期在每个小区选取 5 穗水稻进行考种, 包括有效穗数以及千粒重。考种后籽粒和秸秆分别烘干、粉碎、过筛待测养分含量。各小区单打单收测定实际产量。2015 年晚稻季收获后在每个小区取 0~20 cm 耕层土壤, 按对角线法取 5 个点组成一个混合样品, 风干, 挑去细根后过 2 mm 筛, 用于土壤养分测定。养分指标分析按照《土壤农业化学分析方法》^[13]进行, 全氮用自动凯氏定氮仪测定, 碱解氮用扩散法测定, 有效磷用 0.5 mol/L 的 NaHCO₃ 浸提测定, 速效钾用 1.0 mol/L 的 NH₄Ac 浸提测定。

本文肥料利用率的计算方法^[14]:

氮素积累量(kg) = 谷粒产量 × 谷粒氮素含量 + 稼秆生物量 × 稼秆氮素含量

氮收获指数(%) = 粒氮积累量 / 植株总氮积累量 × 100%

氮肥偏生产力(kg/kg) = 施氮区产量 / 施氮量

$$\text{氮肥农学利用率}(\text{kg}/\text{kg}) = (\text{施氮区产量} - \text{空白区产量}) / \text{施氮量}$$

$$\text{氮肥吸收利用率}(\%) = (\text{施氮区地上部分含氮量} - \text{空白区地上部含氮量}) / \text{施氮量} \times 100\%$$

1.4 数据分析

所有试验数据用 Excel 2013 进行处理, 采用 SPSS 19.0 软件进行方差分析和 Duncan 显著性检验, 比较不同处理间在 $P < 0.05$ 水平上的显著性差异。

2 结果与分析

2.1 不同处理对水稻产量及秸秆生物量的影响

相比于当地农民习惯施氮处理(C1), 分次施用氮肥(C2)和一次施用缓释氮肥(H1、H2、H3)的处理, 早晚稻施氮量均减少了 30 kg/hm² 的用量, 相当于早稻减施氮肥 18.2%, 晚稻减施氮肥 15.4%。3 年的田间小区定位试验结果表明, 各处理早晚稻产量、秸秆生物量和收获指数在试验过程中的变化的规律是一致的。C2 和 C1 处理的产量结果非常相近, 说明减氮

30 kg/hm²下采取分次施氮的方式也可以保持相同的产量水平。H1、H2、H3三个处理6季的产量规律均是随缓释肥比例的增大而升高，并且第一年的早晚稻产量H1、H2、H3处理均高于C1和C2处理，而且H3处理的产量在6季中均是最高的，这均说明缓释氮肥对提高水稻产量有效。统计分析结果表明，除CK处理显著较低外，C2、H1、H2和H3处理的产

量、秸秆生物量和收获指数与C1处理间差异不显著($P > 0.05$, 表2)，说明在减氮30 kg/hm²下，采用分次施氮或施用20%~80%比例的缓释氮肥，均可以维持水稻产量不变，也不会影响光合产物在谷粒和秸秆中的分配。水稻有效穗数和千粒重的结果表明，除CK处理外，其他处理的有效穗数和千粒重差异不显著($P > 0.05$) (图1)。

表2 不同氮肥处理措施对水稻产量及氮素含量的影响
Table 2 Effects of different N treatments on rice yields and N contents

年份	处理	早稻			晚稻		
		产量(kg/hm ²)	秸秆生物量(kg/hm ²)	收获指数(%)	产量(kg/hm ²)	秸秆生物量(kg/hm ²)	收获指数(%)
2013	CK	3343 b	2758 b	54.8 b	4789 b	3126 a	60.6 c
	C1	6098 a	3948 a	60.9 a	6042 a	3695 a	62.2 bc
	C2	6023 a	3583 a	62.6 a	6253 a	3365 a	65.1 ab
	H1	6372 a	3943 a	61.9 a	6590 a	3471 a	65.6 a
	H2	6394 a	3786 a	62.8 a	6495 a	3618 a	63.5 abc
	H3	6694 a	3808 a	63.8 a	6573 a	3437 a	65.7 a
	CK	3842 b	3164 b	54.9 b	4161 c	3490 b	54.4 b
2014	C1	6629 a	4033 a	62.2 a	6654 a	3961 ab	63.1 a
	C2	6505 a	3989 a	62.1 a	6645 ab	4009 a	62.4 a
	H1	6397 a	3739 ab	63.1 a	6196 b	3636 ab	63.1 a
	H2	6599 a	4204 a	61.2 a	6337 ab	3897 ab	61.9 a
	H3	6875 a	4267 a	61.8 a	6660 a	4059 a	61.8 a
	CK	3465 c	2081 c	62.4 b	4656 b	2390 a	66.1 a
	C1	5087 ab	2320 c	68.6 a	6766 a	2848 a	70.5 a
2015	C2	4893 ab	2818 a	63.5 ab	6685 a	2811 a	700.2 a
	H1	4694 b	2386 bc	66.3 a	6113 a	2803 a	69.3 a
	H2	5126 ab	2350 bc	68.6 a	6232 a	2662 a	70.7 a
	H3	5320 a	2671 ab	66.6 a	6642 a	2975 a	69.4 a

注：表中同列不同小写字母表示同一年份下不同处理间差异显著($P < 0.05$)，下同。

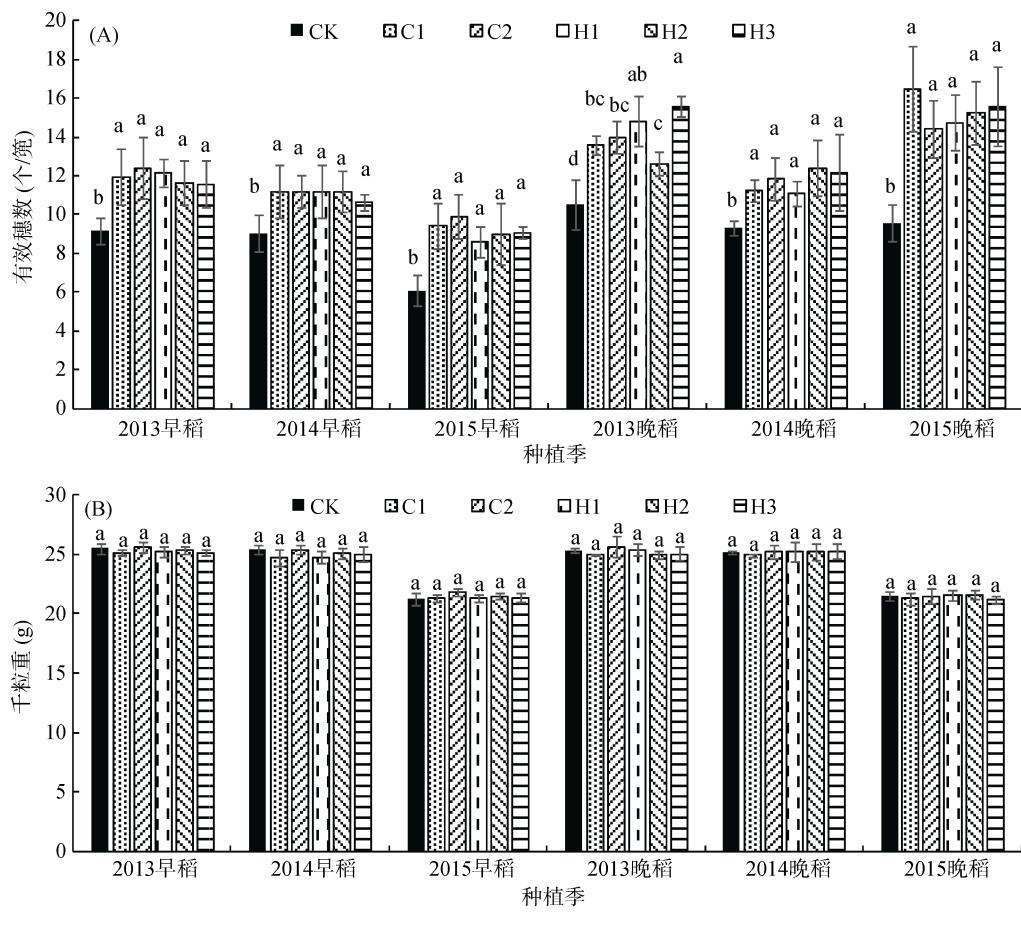
2.2 不同处理对水稻养分含量和氮肥利用率的影响

为了计算不同处理的氮肥利用率，对每一季谷粒和秸秆的氮素含量进行了测定，同时还在第三年晚稻季测定了谷粒和秸秆的全磷和全钾含量(图2)，结果表明各处理的养分含量均没有显著差异($P > 0.05$)，这说明各施氮处理并不会影响水稻的品质。本文采用了多种指标来表征不同处理间氮肥利用率的差异。由表3的统计数据可以看出，C2、H1、H2和H3处理植株吸氮总量均大于C1处理，然而除了CK处理外，其他处理植株吸氮总量和氮收获指数均没有显著差异($P > 0.05$)，这说明各种施肥处理下，氮素进入水稻的总量和在植株中的分配都没有显著差异。而氮肥偏生产力和氮肥吸收利用率两个指标在2013年到2015年间的6季的结果基本一致，均是C1处理显著低于C2、H1、H2和H3处理($P < 0.05$)。和C1处理相比，C2、H1、H2和H3处理的氮肥偏生产力6季平均提升了

19.0%、17.8%、19.9%和24.5%，而氮肥吸收利用率6季平均提升了61.7%、44.9%、57.3%和72.3%。而比较分次施氮和施用缓释肥的处理，发现C2处理与H1、H2和H3处理的氮肥偏生产力和氮肥吸收利用率并没有显著差异($P > 0.05$)。对于农学利用率，第一年早晚稻结果显示，C2、H1、H2和H3处理显著高于C1处理，而第二年和第三年的各施氮处理的差异并不显著($P > 0.05$)，但是变化规律仍然是C2、H1、H2和H3处理高于C1处理。

2.3 不同处理对土壤养分的影响

为了研究不同施氮处理对土壤养分的影响，在3年试验后晚稻收获时，采集土壤样品，分析全氮和速效养分含量。结果表明，各处理间土壤的全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量均没有显著差异($P > 0.05$)，说明各个施氮处理在田间进行3年后不会对土壤养分含量造成影响。



(柱上方不同小写字母表示同一季水稻各处理间的差异显著 ($P < 0.05$)，下同。)

图 1 不同处理水稻有效穗和千粒重

Fig. 1 Rice effective panicle numbers and thousand grain mass under different treatments

3 讨论

当地习惯施肥量是农民经过多年的施肥尝试优化而形成的，如果为了提高氮肥利用率，简单地减少氮肥的施用量，会造成产量的下降。因此，在减施氮肥的前提下要通过改变施肥管理方式或是改变肥料种类才能保证产量不会降低。从目前的研究成果来看，氮肥后移和施用缓释肥是两个有效的途径。如单玉华等^[15]通过¹⁵N微区法发现水稻含氮率随氮肥施用时期推迟有提高的趋势；王维金^[16]的研究表明幼穗分化始期和孕穗期施肥，氮素利用率要显著高于基肥和分蘖肥；刘汝亮等^[17]在减氮20%的基础上，通过增加一次施肥次数，使氮肥后移，显著提高了黄灌区水稻的氮肥利用率。研究也表明水稻生育中、后期氮肥需求量增大，氮肥后移能有效降低稻田的氨挥发，从而提高水稻的氮肥利用率^[18-19]。关于缓释氮肥在小麦、玉米、水稻和蔬菜种植中应用的报道有很多^[20-22]，目前发现有很多缓释氮肥，如亚丁烯二脲(CDU)、亚异丁基二脲(IBDU)、草酰胺(OM)、硫酸

脒基脲(GUS)等可以提高水稻产量和氮素利用率，如IBDU(氮源)作为水稻基肥一次施用，比施用尿素增产6.24%，氮素利用率提高了14.62%^[23]。然而这些特殊的缓释氮肥由于成本太高，无法真正应用于水稻田间生产。而对常规尿素水溶性进行控制，有效地延缓或控制尿素氮的释放，以使肥料养分释放时间与作物养分吸收规律相吻合^[24-25]，由此得到的缓释尿素成本较低，才可能有实际的应用前景。很多研究也表明缓释尿素可以大大提高氮素的利用率^[26-27]。有些田间试验证明施用缓释尿素可以提高水稻产量^[28]，但是也有些田间示范试验表明缓释尿素对水稻增产效果并不显著^[29]，具体增产效果与当地的气候，土壤条件和当地习惯施肥水平息息相关。

本研究通过红壤地区3年6季的双季稻田间试验，发现通过增加一次孕穗期施肥或是一次性配施20%~80%比例的缓释尿素，在早稻和晚稻减氮30 kg/hm²的情况下，均可以保证产量不下降，甚至略有增长，但统计分析显示差异并不显著。相比于习惯施氮处理，分次施氮和施用缓控肥的处理并不会显著影

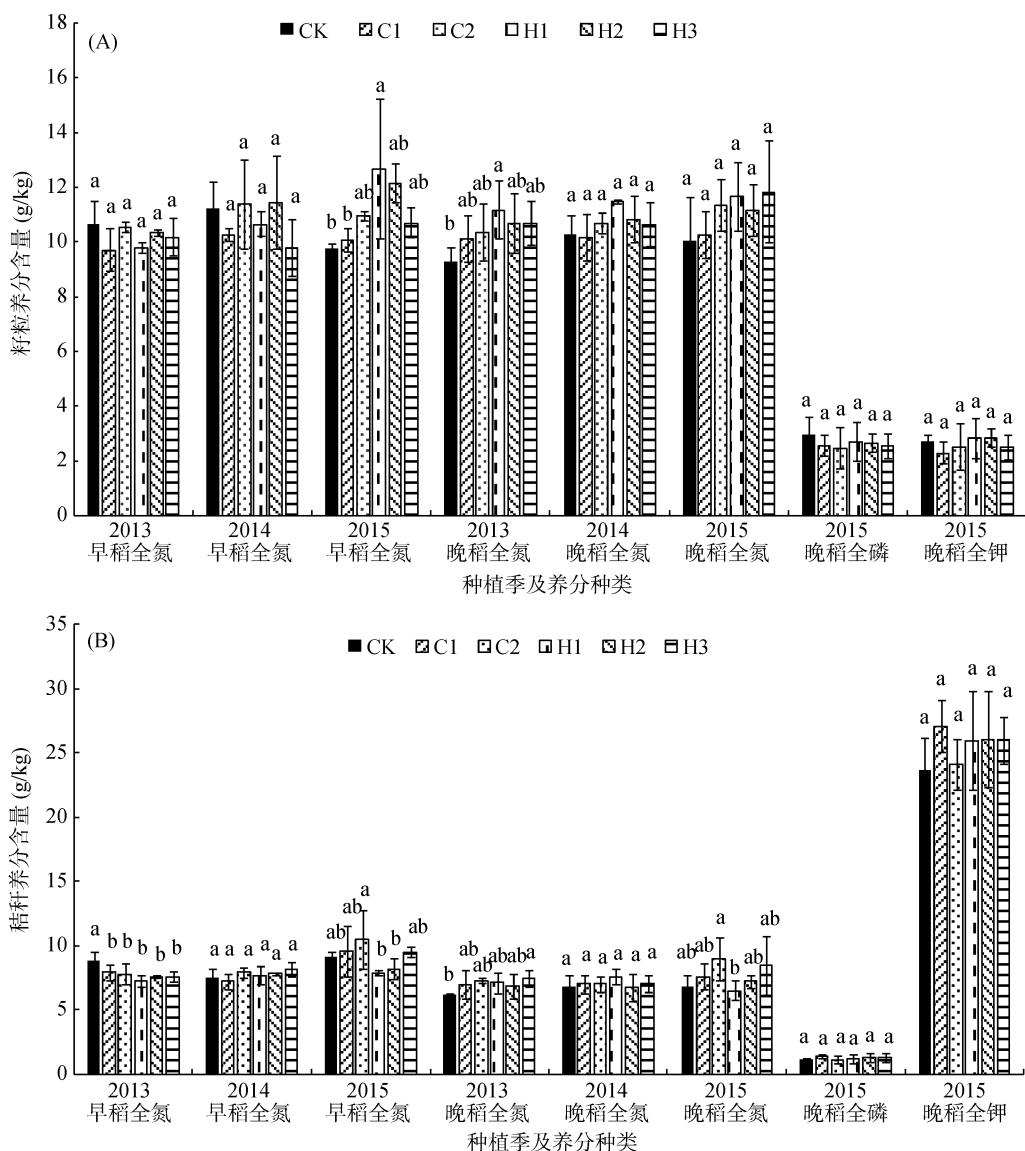


图2 不同处理谷粒和秸秆养分含量

Fig. 2 Nutrient contents in grains and straws under different treatments

表3 不同氮肥处理措施对氮肥利用率的影响

Table 3 Effects of different N treatments on nitrogen use efficiencies

年份	处理	早稻					晚稻				
		植株吸氮总量(kg/hm ²)	氮收获指数(%)	氮肥偏生产力(kg/kg)	氮肥农学利用率(kg/kg)	氮肥吸收利用率(%)	植株吸氮量(kg/hm ²)	氮收获指数(%)	氮肥偏生产力(kg/kg)	氮肥农学利用效率(kg/kg)	氮肥吸收利用率(%)
2013	CK	60.1 b	59.4 b	—	—	—	63.9 b	69.9 b	—	—	—
	C1	90.3 a	65.5 a	37.0 b	16.7 b	18.3 c	86.5 a	70.5 ab	31.0 b	6.4 c	11.7 b
	C2	91.6 a	69.4 a	44.6 a	19.9 ab	23.4 ab	89.2 a	72.5 ab	37.9 a	8.9 ab	15.4 a
	H1	90.8 a	68.8 a	47.2 a	22.4 a	22.8 b	98.6 a	75.0 a	39.9 a	10.9 a	17.2 a
	H2	94.9 a	69.7 a	47.4 a	22.6 a	25.8 ab	92.2 a	73.1 ab	38.2 a	9.1 ab	19.4 a
	H3	97.0 a	70.2 a	49.6 a	24.8 a	27.4 a	95.8 a	73.4 ab	39.8 a	10.8 ab	21.1 a
2014	CK	66.9 c	64.6 a	—	—	—	66.2 b	64.6 b	—	—	—
	C1	97.4 b	70.1 a	40.2 b	16.9 b	18.5 c	96.5 a	71.1 a	34.6 b	13.3 a	15.5 b
	C2	105.5 ab	69.9 a	48.2 a	19.7ab	28.6 ab	99.2 a	71.6 a	40.3 a	15.1 a	20.0 a
	H1	97.0 b	70.4 a	47.4 a	18.9 ab	22.3bc	98.7 a	72.2 a	37.6 a	12.3 a	19.7 a
	H2	107.7 a	69.6 a	48.9 a	20.4 ab	30.2 a	95.1 a	72.2 a	38.4 a	13.2 a	17.5 ab
	H3	101.9 a	68.2 a	50.9 a	22.5 a	25.9 ab	98.3 a	71.0 a	39.8 a	14.6 a	19.5 a

续表

年份	处理	早稻						晚稻					
		植株吸氮总 量(kg/hm ²)	氮收获 指数(%)	氮肥偏生产 力(kg/kg)	氮肥农学利 用率(kg/kg)	氮肥吸收 利用率(%)	植株吸氮总 量(kg/hm ²)	氮收获指 数(%)	氮肥偏生产 力(kg/kg)	氮肥农学利用 率(kg/kg)	氮肥吸收 利用率(%)	氮肥吸收 利用率(%)	
2015	CK	53.8 b	62.1 c	-	-	-	62.8 c	74.2 a	-	-	-	-	
	C1	72.49 a	68.9 b	30.8 c	8.6 a	11.4 b	90.8 b	76.4 a	34.7b	10.8 a	14.4 c		
	C2	82.8 a	64.8 bc	36.3 ab	9.1 a	21.5 a	100.8 ab	75.2 a	40.5 a	12.3 a	23.0 ab		
	H1	78.1 a	75.5 a	34.8 b	8.9 a	18.0 a	91.9 ab	80.1 a	38.3 ab	10.0 a	17.7abc		
	H2	82.0 a	76.3 a	38.0 ab	10.8 a	20.5 a	90.7 b	78.8 a	38.8 ab	10.6 a	16.9 bc		
	H3	82.5 a	68.8 b	39.4 a	12.3 a	21.9 a	102.4 a	75.3 a	39.7 ab	11.4 a	24.0 a		

表 4 施肥 3 年后土壤养分状况

Table 4 Status of soil nutrition after three years fertilization

处理	全氮 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
CK	1.61 a	147.46 a	29.18 a	66.56 a
C1	1.65 a	138.68 a	28.18 a	54.06 a
C2	1.49 a	140.57 a	21.91 a	60.63 a
H1	1.70 a	132.76 a	24.38 a	61.56 a
H2	1.64 a	141.49 a	27.52 a	63.43 a
H3	1.57 a	134.14 a	25.54 a	62.50 a

响植株的有效穗数和谷粒的千粒重 ,也不会显著影响谷粒和秸秆的养分含量 ,对土壤的全量和速效养分也不会造成显著影响 ,然而由于施氮量的降低 ,这两种减肥方法的氮肥偏生产力和氮肥吸收利用率都显著高于习惯施氮方式 ,农学利用率也是高于习惯施氮方式。本研究还表明分次施氮处理与 3 个比例的缓释尿素处理的各种水稻养分指标和土壤养分指标均没有显著差异。在如今农村劳动力越来越少的背景下 ,施肥次数增多会造成费工费时、劳动生产效率降低等问题 ,很难吸引更多农民来进行分次施肥。因此 ,相比于增加施氮次数 ,使用一定比例的缓释尿素作为基肥一次施用更容易得到农民的认可。本研究还表明 20%、50% 和 80% 比例的缓释尿素的施用 ,虽然水稻产量和氮肥偏生产力、氮肥农学利用率及氮肥吸收利用率均随着缓释尿素比例的增大而呈现升高趋势 ,但是统计分析发现 3 种比例缓释尿素对水稻产量和氮肥利用率的影响没有显著差异 ,而考虑到缓释肥较高的价格 ,因此 20% 的缓释尿素一次性基施处理更符合现实状况 ,更容易被农民接受 ,可以作为减氮增效的措施进行推广。

4 结论

在我国红壤地区双季稻种植模式下 ,相比于习惯施氮处理 ,分次施氮和施用缓释尿素两种方法均可以显著提高氮肥利用率 ,均是红壤水稻土上减氮增效的有效方法。综合考虑劳动力成本和缓释尿素价格 ,一次性施

用 20% 的缓释尿素是更为切实可行的减氮增效方法。

参考文献 :

- [1] 申建波, 高彧, 张福锁. 对氮素优化管理 提高吸收利用率——解读水稻养分资源综合管理技术体系[J]. 中国农资, 2005, 11: 54–55
- [2] 李生秀. 植物营养与肥料学科的现状与展望[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(3): 193–205
- [3] 王敬, 程谊, 蔡祖聪, 张金波. 长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响 [J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 292–304
- [4] 张福锁. 测土配方施肥技术要览[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006
- [5] 黄农荣, 胡学应, 钟旭华, 等. 水稻“三控”施肥技术的示范推广进展[J]. 广东农业科学, 2010, 37(12): 21–23
- [6] 高豫汝. 包膜控释氮肥在水稻上的应用效果研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2005
- [7] 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
- [8] 敖玉琴, 张维, 田玉华, 等. 脲胺氮肥对太湖地区稻田氮挥发及氮肥利用率的影响 [J]. 土壤, 2016, 48(2): 248–253
- [9] 张志兴, 李忠, 陈军, 等. 氮肥运筹对大穗型水稻品种金恢 809 灌浆期叶片蛋白质表达的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(5): 842–854
- [10] 林洪鑫, 肖运萍, 刘方平, 等. 水分管理与氮肥运筹对超级早稻“两优 287”产量和氮素吸收的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012, 6: 34–40
- [11] 杨安中, 吴文革, 李泽福, 等. 氮肥运筹对超级稻库源关系、干物质积累及产量的影响[J]. 土壤, 2016, 48(2): 254–258
- [12] 徐明岗, 李菊梅, 李冬初, 等. 控释氮肥对双季水稻生长及氮肥利用率的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 1010–1015
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999
- [14] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915–924
- [15] 单玉华, 王余龙, 黄建晔, 等. 中后期追施 N15 对水稻氮素积累与分配的影响[J]. 江苏农业研究, 2000, 21(4): 18–21
- [16] 王维金. 关于不同籼稻品种和施肥时期稻株对 N15 的吸收及其分配的研究[J]. 作物学报, 1994, 20(4): 169–172

- [17] 刘汝亮, 李友宏, 张爱平, 等. 氮肥后移对引黄灌区水稻产量和氮素淋溶损失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 16–20
- [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] 马玉华, 刘兵, 张枝盛, 等. 免耕稻田氮肥运筹对土壤 NH_3 挥发及氮肥利用率的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5556–5564
- [20] 张洪程, 吴桂成, 戴其根, 等. 水稻氮肥精确后移及其机制[J]. 作物学报, 2011, 37(10): 1837–1851
- [21] 司贤宗, 韩燕来, 王宜伦, 等. 缓释氮肥与普通尿素配施提高冬小麦-夏玉米施肥效果的研究[J]. 中国农业科学, 2013, 46(7): 1390–1398
- [22] 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
- [23] 全智, 秦红灵, 李明德, 等. 氮肥优化减施对土壤氮磷累积及蔬菜产量品质的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3), 103–112
- [24] 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
- [25] Mikkelsen R L. Using hydrophilic polymers to control nutrient release[J]. Fertilizer Research, 1994, 38(1): 53–59
- [26] 符建荣. 控释氮肥对水稻的增产效应及提高肥料利用率的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(2): 145–152
- [27] 戴平安, 聂军, 郑圣先, 等. 不同土壤肥力条件下水稻控释氮肥效应及其氮素利用的研究[J]. 土壤通报, 2003, 34(2): 115–119
- [28] 宋付朋, 张民, 史衍玺, 等. 控释氮肥的氮素释放特征及其对水稻的增产效应[J]. 土壤学报, 2005, 42(4): 619–627
- [29] 胡续丽, 任春梅, 谢加义, 等. 水稻施用缓释尿素免追肥试验、示范初报[J]. 垦殖与稻作, 2005, 5: 39–41

Comparison of Nitrogen Fertilizer Reduction with Efficiency Increase Methods in Double-rice System in Reddish Paddy Soil

WU Meng¹, LI Weitao¹, LIU Jia¹, LIU Ming¹, JIANG Chunyu¹, LI Zhongpei^{1,2*}

(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)

Abstract: For now, China gives great impetus to the strategy of fertilizer zero growth. The actual application effects of many fertilizer reduction with efficiency increase methods have attracted more and more attentions. In this study, the nitrogen fertilizer reduction with efficiency increase methods in double-rice system in red soil region of South China were explored through field experiments carried out in a typical reddish paddy soil in Jiangxi Province. Six treatments were designed, including none N fertilizer control (CK), conventional N application rate(C1), N application with more times with $30 \text{ kg}/\text{hm}^2$ N reduction(C2), 20% slow-release urea application at one time with $30 \text{ kg}/\text{hm}^2$ N reduction (H1), 50% slow-release urea application at one time (H2) with $30 \text{ kg}/\text{hm}^2$ N reduction and 80% slow-release urea application at one time with $30 \text{ kg}/\text{hm}^2$ N reduction (H3). The results showed that C2, H1, H2, H3 with $30 \text{ kg}/\text{hm}^2$ nitrogen reduction had no significant difference in rice yields, effective panicle numbers, thousand-grain mass, nutrient contents in grains and straws, soil total and available nutrients compared with C1 ($P>0.05$). The total N absorption and N harvest index of C1, C2, H1, H2 and H3 also showed no significant differences ($P>0.05$). However, C2, H1, H2 and H3 displayed significant higher nitrogen partial factor productivity and nitrogen recovery efficiency than C1 ($P<0.05$). Compared with C1, the nitrogen partial factor productivity of C2, H1, H2 and H3 averagely increased by 19.0%, 17.8%, 19.9% and 24.5% and the nitrogen recovery efficiency of C2, H1, H2 and H3 averagely increased by 61.7%, 44.9%, 57.3% and 72.3% in three years, respectively. While there were no significant differences in nitrogen partial factor productivity and nitrogen recovery efficiency among H1, H2, H3 and C2 ($P>0.05$). According to this study, applying nitrogen fertilizer for more times and applying a proportion of slow-release urea at one time increase the nitrogen use efficiency in the same degree and are both effective nitrogen fertilizer reduction methods. Considering the high labor cost and the expensive slow-release urea, application 20% slow-release urea at one time is more operable nitrogen fertilizer reduction method. In the circumstances of $30 \text{ kg}/\text{hm}^2$ reduction, ordinary urea applied with 20% slow-release urea can meet the needs of rice growth, and more percentage of slow-release urea (50% and 80%) cannot further increase rice yield and nitrogen use efficiency.

Key words: Nitrogen reduction with efficiency increase; Slow-release urea; Rice yield; Nitrogen use efficiency