

# 施氮量对双季稻产量及氮磷钾吸收利用的影响

朱启东<sup>1,2</sup>, 鲁艳红<sup>1,3</sup>, 廖育林<sup>1,3</sup>, 聂军<sup>1,3</sup>, 周兴<sup>1,4</sup>, 聂鑫<sup>1,5</sup>, 程会丹<sup>1,5</sup>

(1. 湖南省土壤肥料研究所,长沙 410125; 2. 湖南农业大学生物科学技术学院,

长沙 410128; 3. 农业部湖南耕地保育科学观测实验站,长沙 410125;

4. 湖南农业大学资源环境学院,长沙 410128; 5. 湖南大学研究生院隆平分院,长沙 410125)

**摘要:** 研究不同施氮量对双季稻产量、氮磷钾积累量及氮磷钾利用率的影响,同时探讨双季稻吸收利用氮、磷、钾三者间的相互关系。通过田间试验研究施氮量不同、磷钾投入量相同条件下的双季稻产量、双季稻氮、磷、钾积累量、双季稻氮、磷、钾素利用效率及磷钾吸收利用与氮吸收利用的关系。结果表明:双季稻产量在一定范围内(早稻 0~105 kg/hm<sup>2</sup>,晚稻 0~146 kg/hm<sup>2</sup>)随施氮量的增加而提高,之后产量随施氮量增加而降低。本试验施氮条件下,早稻产量最高的处理为 75%N(105 kg/hm<sup>2</sup>),比 CK(不施化肥)增产 58.1%;晚稻产量最高的处理为 100%N(146 kg/hm<sup>2</sup>)处理,比 CK 增产 67.6%。施氮水平对双季稻植株氮、磷、钾养分积累量有显著影响,早、晚稻稻谷氮、磷、钾积累量均以 100%N 处理最高。不同施氮水平对氮、磷、钾养分利用效率也有显著影响。适宜的施氮量可以增加双季稻产量,促进水稻对氮、磷、钾养分的吸收,同时提高双季稻的氮、磷、钾素利用效率。综合考虑双季稻产量效应及氮磷钾养分的有效吸收利用,双季稻施氮量为 105~146 kg/hm<sup>2</sup> 较为适宜。

**关键词:** 施氮量; 双季稻; 产量; 氮磷钾; 养分吸收利用

**中图分类号:** S143; S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)02-0183-06

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.02.029

## Effects of Nitrogen Application Rates on Yield and Nitrogen, Phosphorus and Potassium Uptake of Double Cropping Rice

ZHU Qidong<sup>1,2</sup>, LU Yanhong<sup>1,3</sup>, LIAO Yulin<sup>1,3</sup>,

NIE Jun<sup>1,3</sup>, ZHOU Xing<sup>1,4</sup>, NIE Xin<sup>1,5</sup>, CHENG Huidan<sup>1,5</sup>

(1. Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha 410125; 2. College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128; 3. Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation (Hunan), Ministry of Agriculture, Changsha 410125; 4. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128; 5. Long Ping Branch, Graduate School of Hunan University, Changsha 410125)

**Abstract:** A field experiment was conducted to study the yield of double cropping rice and its uptake of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K). The fertilizer utilization efficiencies and the relationships between the absorption and utilization efficiencies of P and K and N uptake and utilization were also measured under the different applications in N but the same in P and K. Our results showed that the rice yield was increased by moderate N application, however, high N showed negative effects on crop production. As for N application, 75% N treatment gained the highest yield for early rice, which was increased by 58.1% compared with CK without fertilizer application. And 100% N treatment had the highest yield for late rice, 67.6% more than CK. The accumulations of N, P and K in rice plants were significantly affected by N application levels. The accumulations of N, P and K in early and late rice grains were the highest under 100% N treatment, and their accumulations in rice plants were also higher than other treatments. Different nitrogen levels also had significant effects on N, P and K nutrient utilization efficiency. Our results showed a significant correlation between the accumulation of P and K and the accumulation of N in the early and late rice plants. The apparent use efficiencies and agronomy efficiencies of P and K were correlated positively with N accumulations in rice plants, respectively. Moderate N application could increase the yield of double

收稿日期: 2018-10-09

资助项目: 国家重点研发计划“粮食丰产增效科技创新”重点专项(2017YFD0301504, 2018YFD03006); 国际植物营养研究所合作项目(IPNI-Hunan); 湖南省农业科技创新项目(2018ZD02-2)

第一作者: 朱启东(1993—), 男, 广西兴业人, 硕士研究生, 主要从事植物营养与作物高效施肥研究。E-mail: zqd3726@126.com

通信作者: 聂军(1972—), 男, 湖南沅江人, 博士, 研究员, 主要从事植物营养与施肥原理研究。E-mail: niejun197@163.com

cropping rice, promote the absorption of N, P and K by rice, and improve their utilization efficiencies. In this research, considering the yield effects of double cropping rice and the fertilizer utilization efficiencies, the suitable N application rate should be between 105 kg N/hm<sup>2</sup> and 146 kg N/hm<sup>2</sup>.

**Keywords:** nitrogen application; double cropping rice; yield; nitrogen, phosphorus and potassium; nutrient absorption and utilization

近年来,我国粮食需求压力越来越大,具体表现在我国居民消费水平的持续增涨,居民饮食日益多样化,人民对生活质量的要求越来越高<sup>[1]</sup>。同时我国可耕地面积不增反减的现实,也将进一步加大粮食安全的压力。在这严峻的情形下,水稻作为我国主要粮食作物,其稳产增产对于满足市场需求、保障我国粮食安全具有重要意义。

我国南方双季稻区降雨较多,水田易发生径流,造成养分流失普遍较快<sup>[2]</sup>,化肥增增效应相对较差。同时,在农业生产中盲目施肥仍然存在<sup>[3]</sup>,尤其是氮肥的施用普遍过量,且表现出不断加重的趋势。不合理施氮不仅影响到作物对氮素的吸收利用,同时也会影响磷<sup>[4-5]</sup>、钾素<sup>[6-7]</sup>在作物体内的积累。在水稻生长发育阶段各养分积累量与籽粒转运存在协同性,对水稻产量的形成影响极大<sup>[8]</sup>。

如何调控氮肥施用量、促进作物对氮素有效吸收利用及提高作物产量是植物营养研究领域的焦点问题。目前大部分研究主要集中在施氮量对粮食产量<sup>[9-10]</sup>与品质<sup>[11]</sup>的效应、施氮量与作物氮素积累转运及利用关系<sup>[9-10,12]</sup>、施氮对土壤氮素肥力<sup>[13]</sup>及农业生态环境<sup>[14]</sup>的影响等方面。在施氮量与作物磷、钾素吸收积累的关系及施氮对作物磷、钾素利用影响上的报道较少,这对于当前我国提倡节能减排的大环境是不利的。而明确氮、磷、钾素三者作物吸收利用时的相互影响关系,对于指导如何保证各种养分的平衡供应,促进各养分元素在作物体内的有效吸收利用,提高作物产量,保证我国粮食安全,减少化肥无效施用,缓解环境压力有重要意义。本研究通过南方双季稻区氮肥量级试验,探讨施氮量对双季稻产量的影响,施氮量对水稻氮、磷、钾吸收利用的关系,旨在为南方双季稻种植区探索出适宜的氮肥用量,减少农业成本,降低农业环境风险,为该地区制定高产高效的养分管理策略提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点与材料

试验于 2017 年 3—11 月在湖南省长沙县高桥镇(28°28′49″N,113°20′50″E)进行。该地处于东亚季风区,属亚热带湿润气候,当地海拔 85 m,年均气温 17.2℃,年日照时间 1 663 h,年降水量 1 422 mm。土壤类型属于河流沉积物发育而成的河沙泥。试验前采集

0—20 cm 耕层土壤测定其基本理化性状:pH 5.4,碱解氮含量 202 mg/kg,有效磷含量 18.4 mg/kg,速效钾含量 83.4 mg/kg。供试早稻品种为常规稻“湘早籼 32 号”,晚稻品种为杂交稻“深优 9586”。

### 1.2 试验设计

试验按随机区组设计,3 次重复,每小区 20 m<sup>2</sup>,共设 7 个处理:(1)CK(不施任何肥料);(2)N0(不施氮,磷、钾肥用量同 100% N 处理);(3)50% N(氮肥按 100% N 处理用量 50% 施用,磷、钾肥用量同 100% N 处理);(4)75% N(氮肥按 100% N 处理用量 75% 施用,磷、钾肥用量同 100% N 处理);(5)100% N(早稻氮肥用量 140 kg/hm<sup>2</sup>,磷肥用量 65 kg/hm<sup>2</sup>,钾肥用量 81 kg/hm<sup>2</sup>;晚稻氮肥用量 146 kg/hm<sup>2</sup>,磷肥用量 68 kg/hm<sup>2</sup>,钾肥用量 108 kg/hm<sup>2</sup>);(6)125% N(氮肥按 100% N 处理用量 125% 施用,磷、钾肥用量同 100% N 处理);(7)150% N(氮肥按 100% N 处理用量 150% 施用,磷、钾肥用量同 100% N 处理)。100% N 处理的施肥量及施肥方案采用养分专家系统(nutrient expert system)<sup>[15]</sup>推荐所得。施用的肥料种类氮肥为尿素(N 含量 46%),磷肥为钙镁磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量 12%),钾肥为氯化钾(K<sub>2</sub>O 含量 60%)。早稻施肥处理氮肥基—蘖—穗肥比例为 30%—35%—35%,钾肥按照基—穗肥比例为 50%—50%;分蘖肥追肥时间为早稻移栽后第 17 天,穗肥追肥为早稻移栽后第 42 天。晚稻氮、钾肥基—蘖—穗肥比例均为 40%—40%—20%;分蘖肥追肥时间晚稻移栽后第 7 天,穗肥追肥为早稻移栽后第 30 天。磷肥均做基肥一次性施用。插秧前 1 天施入基肥,施入后立即用铁齿耙耙入 5 cm 深的土层内。插秧密度为早稻 20 cm×20 cm,晚稻 20 cm×25 cm。其他管理措施与当地田间管理一致。

### 1.3 分析测定项目

试验开始前采集 0—20 cm 耕层土样,用于测定土壤 pH、碱解氮、有效磷和速效钾含量。早、晚稻成熟期各小区单打单晒称重计产,每小区采集 3 株成熟期水稻植株样用于测定稻谷和稻草氮、磷、钾含量。

### 1.4 计算方法<sup>[9]</sup>

稻谷氮(磷、钾)积累量(kg/hm<sup>2</sup>)=稻谷产量×稻谷氮(磷、钾)含量<sup>[10]</sup>

稻草氮(磷、钾)积累量(kg/hm<sup>2</sup>)=稻草产量×

稻草氮(磷、钾)含量<sup>[10]</sup>

植株氮(磷、钾)总积累量(kg/hm<sup>2</sup>) = 稻谷氮(磷、钾)积累量 + 稻草氮(磷、钾)积累量<sup>[10]</sup>

氮肥(磷、钾肥)表观利用率(%) = (施肥区作物吸氮(磷、钾)量 - 不施肥区作物吸氮(磷、钾)量) / 施肥量 × 100%(注:不施肥区为 CK 处理,下同)<sup>[10,16-18]</sup>

氮肥(磷、钾肥)农学效率(kg/kg) = (施肥区稻谷产量 - 不施肥区稻谷产量) / 施氮(磷、钾)肥量<sup>[10,16-18]</sup>

氮肥(磷、钾肥)生理利用率(kg/kg) = (施肥区稻谷产量 - 不施肥区稻谷产量) / (施肥区地上部氮(磷、钾)积累量 - 不施肥区地上部氮(磷、钾)积累量)<sup>[10,16-18]</sup>

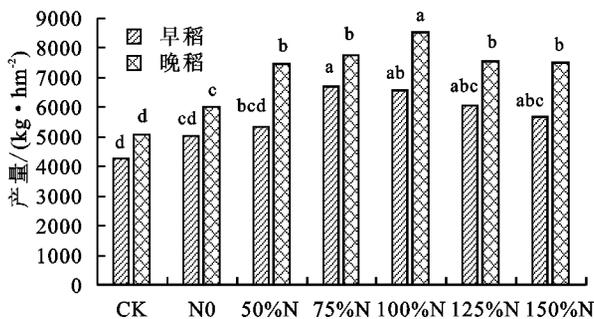
## 1.5 数据处理与统计

数据处理及统计分析采用 Microsoft Excel 2010 和 DPS 7.5 软件数据处理系统。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对双季稻产量的影响

从图 1 可以看出,施用氮肥对早、晚稻产量的影响均有差异,其中早、晚稻最高产量分别为 6 718 kg/hm<sup>2</sup> (75%N,施氮量 105 kg/hm<sup>2</sup>) 和 8 538 kg/hm<sup>2</sup> (100%N,施氮量 146 kg/hm<sup>2</sup>),比 CK 分别增产 58.1% 和 67.6%,均达到显著差异水平( $p < 0.05$ )。75%N(施氮量 105 kg/hm<sup>2</sup>) 与 100%N(施氮量 140 kg/hm<sup>2</sup>) 处理间的早稻产量差异不显著( $p > 0.05$ ),而晚稻差异显著( $p < 0.05$ )。从施氮量与稻谷产量的拟合方程(早稻  $y = -0.1035x^2 + 27.178x + 4574.6, R^2 = 0.7875$ ; 晚稻  $y = -0.1218x^2 + 35.218x + 5543.9, R^2 = 0.9029$ ) 可知,早、晚稻的拟合稻谷产量分别为 6 359, 8 090 kg/hm<sup>2</sup>,对应的施氮量分别为 131.3, 144.6 kg/hm<sup>2</sup>。拟合的施氮量与 100%N 处理(早稻施氮量 140 kg/hm<sup>2</sup>,晚稻施氮量 146 kg/hm<sup>2</sup>) 差距不大,最高产量相差也不大,可以认为拟合效果较好。



注:图中不同字母表示各处理差异显著( $P < 0.05$ )。

图 1 不同处理早、晚稻谷产量

### 2.2 不同处理对双季稻氮、磷、钾积累量的影响

2.2.1 不同处理的双季稻氮、磷、钾含量 从表 1 可以看出,施氮均显著提升两季稻谷和稻草的氮含量,但氮含量并没有表现出随施氮量增加而升高的显著

趋势。从早稻来看,在施氮量超过 100%N 处理(施氮量 140 kg/hm<sup>2</sup>) 稻谷氮含量所占比重呈下降趋势。施氮量可提升水稻磷含量,尤其是稻谷磷含量,其中早稻施氮处理磷含量高于不施氮处理。早稻稻谷磷含量最高为 100%N 处理,晚稻的 100%N 处理的磷含量(2.87 g/kg) 也较高,与最高的磷含量(2.94 g/kg) 差异不显著( $p > 0.05$ )。施氮量对水稻的钾含量具有波动降低的作用。

表 1 不同处理早、晚稻稻谷和稻草的氮、磷、钾含量

双季稻	处理	稻谷			稻草		
		氮(N)	磷(P)	钾(K)	氮(N)	磷(P)	钾(K)
早稻	CK	11.32d	3.15e	8.14a	5.60e	2.77b	39.06a
	N0	10.67e	3.14e	6.48b	5.56e	2.74b	39.28a
	50%N	14.20a	3.28d	6.13c	7.80c	2.24c	37.85c
	75%N	12.89c	3.22de	5.47d	6.22d	3.03a	37.47c
	100%N	13.52b	4.46a	6.40b	7.59c	2.75b	36.07d
晚稻	125%N	14.01a	4.20b	5.88c	8.09b	2.69b	35.48e
	150%N	13.01c	3.56c	6.50b	10.13a	2.24c	38.54b
	CK	9.53b	2.73b	6.18a	5.42d	1.42c	42.31a
	N0	8.35d	2.72b	6.13a	5.20e	1.34c	38.24b
	50%N	9.59b	2.91a	5.76b	5.69c	1.74a	37.19c
	75%N	9.62b	2.56c	5.50cd	7.34a	1.53b	36.11d
	100%N	9.57b	2.87a	5.35d	7.33a	1.55b	36.03d
125%N	10.27a	2.94a	5.60bc	7.01b	1.75a	37.05c	
150%N	9.28c	2.94a	5.32d	7.00b	1.79a	37.07c	

注:差异显著性检验采用 Duncan 新复极差法,同列不同字母表示各处理差异达显著水平( $p < 0.05$ )。下同。

2.2.2 不同处理的双季稻氮、磷、钾积累量 从表 2 可以看出,施氮量对早、晚稻籽粒氮素积累的影响趋势较为一致,均随施氮量的增加而增加,在 100%N 处理(早稻施氮量 140 kg/hm<sup>2</sup>,晚稻施氮量 146 kg/hm<sup>2</sup>) 中达到最高。两季水稻植株氮积累量的趋势与稻谷氮积累量基本相似,但最高点不同,其中早稻的 125%N 处理(施氮量 175 kg/hm<sup>2</sup>) 植株的氮积累量最高,晚稻 100%N 处理最高,这可能是由于早稻 125%N 处理中的稻草氮素积累较多所致。施氮量对早、晚稻磷素积累的影响趋势与氮素积累相似,两季稻谷磷素积累量同样在 100%N 处理中最高。两季水稻植株磷素积累量均在 100%N 处理最高,与稻谷的相一致。早、晚稻钾素最高积累量分别为 41.98, 45.68 kg/hm<sup>2</sup>,均出现在 100%N 处理,这与氮、磷素相一致。两季水稻植株钾素最高积累量出现在不同的处理(早稻为 150%N,晚稻 100%N),但与相邻施氮水平平均差异不显著( $p > 0.05$ )。

### 2.3 不同处理对双季稻氮、磷、钾养分利用效率的影响

从表 3 可以看出,施氮量对早、晚稻肥料表观利用率的影响表现为早、晚稻氮素表观利用率趋势相同,均随着施氮量的升高而降低;磷素表观利用率在

两季水稻中的表现也基本一致,受施氮量影响显著,均在 100%N 处理达最高;钾素表观利用率在两季水稻的趋势则不同,早稻表现为随施氮量的增加,钾表

观利用率升高,但相邻施氮水平间差异不显著( $P > 0.05$ );晚稻则在一定施氮范围内先升高达最高点,而后降低,晚稻最高钾素表观利用率为 100%N 处理。

表 2 不同处理早晚稻稻谷、稻草及植株氮、磷、钾积累量

单位:kg/hm<sup>2</sup>

双季稻	处理	稻谷			稻草			植株		
		氮(N)	磷(P)	钾(K)	氮(N)	磷(P)	钾(K)	氮(N)	磷(P)	钾(K)
早稻	CK	48.11b	13.39e	34.60ab	12.36d	6.11b	86.22c	60.47b	19.50e	120.82c
	N0	53.87b	15.85de	32.72b	14.49d	7.14b	102.34bc	68.35b	22.35de	125.89bc
	50%N	75.90a	17.53cde	32.77b	24.29c	6.98b	117.89ab	100.19a	24.51de	150.66ab
	75%N	86.60a	21.63bc	36.75ab	20.74c	10.11a	124.96ab	107.34a	31.74bc	161.71a
	100%N	88.69a	29.26a	41.98a	25.51bc	9.24a	121.23ab	114.20a	38.50a	163.21a
	125%N	84.77a	25.41ab	35.58ab	29.62ab	9.85a	129.90a	114.39a	35.26ab	165.48a
	150%N	73.67a	20.16cd	36.81ab	34.16a	7.55b	129.96a	107.83a	27.71cd	166.77a
晚稻	CK	48.54d	13.90e	31.48d	18.06d	4.73b	140.95b	66.60e	18.64e	172.43c
	N0	50.16d	16.34d	36.83c	19.44cd	4.26b	142.98b	69.61e	21.35d	179.81bc
	50%N	71.42c	21.67b	42.90ab	24.36c	7.45a	159.21ab	95.78d	29.12bc	202.11abc
	75%N	74.64bc	19.86c	42.67ab	34.88ab	7.27a	171.58ab	109.52b	27.13c	214.26a
	100%N	81.71a	24.50a	45.68a	37.64a	7.96a	185.04a	119.35a	32.46a	230.71a
	125%N	77.51ab	22.19b	42.27ab	31.46b	7.85a	166.28ab	108.98bc	30.04b	208.55ab
	150%N	69.74c	22.09b	39.98bc	31.20b	7.98a	165.25ab	100.94cd	30.07b	205.22ab

施氮量对早、晚稻肥料生理利用率的影响有差异(表 3)。100%N 处理的氮素生理利用率较高,但与相邻氮肥水平差异不显著( $P > 0.05$ )。磷素生理利用率在低氮水平(N0, 50%N, 75%N)较高,在高氮水平(150%N)则相对较低。同时 100%N 处理也表现出较高的钾素生理利用率,这与氮素类似。

施氮量对早、晚稻肥料农学效率的影响表现为早、晚稻氮素农学效率随施氮量以相对波动的趋势达到最高值后以平稳趋势降低。早、晚稻磷素农学效率随着施氮量的增加先升后降,早稻的 75%N 处理最高,晚稻 100%N 处理最高(表 3)。早稻钾素农学效率最高为 75%N 处理,与氮、磷一致;晚稻最高为 100%N 处理,与磷类似。

表 3 不同处理早晚稻的氮、磷、钾元素利用效率

双季稻	处理	表观利用率/%			生理利用率/(kg·kg <sup>-1</sup> )			农学效率/(kg·kg <sup>-1</sup> )		
		氮(N)	磷(P)	钾(K)	氮(N)	磷(P)	钾(K)	氮(N)	磷(P)	钾(K)
早稻	CK	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	N0	—	12.3d	21.2b	—	227.06a	140.91a	—	28.11b	11.88b
	50%N	56.7a	17.6d	44.4ab	26.66b	212.37a	52.97a	15.64ab	38.56ab	16.29ab
	75%N	44.6ab	43.1bc	60.9ab	52.13a	199.82a	59.81a	23.50a	86.89a	36.72a
	100%N	38.3b	66.9a	63.1ab	40.55ab	114.79a	54.57a	16.50ab	81.31a	34.37a
	125%N	30.8bc	55.5ab	66.5a	31.88ab	109.17a	41.43a	10.29b	63.39ab	26.79ab
	150%N	22.5c	28.9cd	68.4a	21.89b	98.56a	22.33a	6.73b	49.73ab	21.02ab
晚稻	CK	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	N0	—	9.1d	8.2b	—	341.24a	-45.65a	—	30.79c	10.19c
	50%N	40.0a	35.3bc	33.1ab	81.66a	226.56b	142.06a	32.25a	79.27b	26.25b
	75%N	39.2a	28.6c	46.6ab	62.13b	313.82a	64.96a	24.34b	89.74b	29.71b
	100%N	36.1a	46.6a	65.0a	65.44b	249.46b	63.55a	23.59b	115.97a	38.40a
	125%N	23.2b	38.4ab	40.3ab	57.33b	213.08b	67.92a	13.45c	82.64b	27.36b
	150%N	15.7b	38.5ab	36.6ab	70.51ab	211.33b	107.42a	11.06c	81.53b	26.99b

### 3 讨论

#### 3.1 施氮量对双季稻的增产效应

氮素作为水稻生长发育过程中所必需的大量元素之一,且由于“养分的不可替代性”,想要保证水稻稳产、高产,氮肥的施用必不可少。虽然施用氮肥可以显著提高水稻产量,如鲁艳红等<sup>[10]</sup>通过研究不同形态氮肥对水稻产量的影响,发现在我国南方双季稻区施用控释氮肥或尿素均可显著增加水稻产量,其中尿素增产 41.9%~70.9%,控释氮肥增产 45.6%~

77.3%。但是过量施用氮肥不仅会降低氮肥的增效效应<sup>[1,3]</sup>,甚至会导致作物减产<sup>[19]</sup>。合理施用氮肥可以使氮肥在提高双季稻产量中发挥更大的作用,有学者<sup>[20]</sup>在不同施氮量下,对江西省双季稻区高、中、低产田进行研究,认为随着施氮量增加,早、晚产量均呈先升高后降低的趋势,低、中、高产田获得最高产的施氮量分别为 120, 180, 240 kg/hm<sup>2</sup>。也有研究<sup>[21]</sup>表明,在当前的栽培技术和产量水平下,双季稻最适宜施氮量为 120~200 kg/hm<sup>2</sup>,超过一定的施氮量后,

水稻产量开始下降<sup>[22]</sup>。本文研究结果表明,在双季稻早稻季,稻谷产量最高处理为施氮量 105 kg/hm<sup>2</sup> 的 75%N, 曲方程线拟合结果得出,施氮量为 131.3 kg/hm<sup>2</sup> 时,达到最高产量 6 359 kg/hm<sup>2</sup>,与 100%N (施氮量 140 kg/hm<sup>2</sup>,产量 6 560 kg/hm<sup>2</sup>)处理相近;晚稻稻谷产量最高为 146 kg/hm<sup>2</sup> 的 100%N 处理,这与其他学者的研究结果相比略低,原因可能是本试验所在地区稻田土壤氮素速效成分相对较高。另外,本研究早、晚稻最佳产量处理不同,但是根据拟合方程的结果来看,根据该田块连续 3 年的产量水平、农民施肥习惯和目标产量等调查数据,通过养分专家系统推荐所得,得出早稻 100%N 处理施氮量为 140 kg/hm<sup>2</sup>,晚稻推荐施氮量 146 kg/hm<sup>2</sup> 在该试验区较为适宜。

### 3.2 施氮量对双季稻氮素吸收利用的影响

如何调控土壤养分的投入量,减少养分的无效损失,对促进养分的有效吸收与利用具有重要意义。氮素是土壤肥力中最活跃的组成部分,施用氮肥显著提高水稻氮素吸收量,合理施氮更促进氮素向稻谷积累<sup>[23]</sup>。王秀斌等<sup>[24]</sup>对机插双季稻进行研究认为,施氮与不施氮相比,显著增加早、晚稻氮素积累量,增幅分别为 43.7%~67.4%和 63.8%~107.7%。本试验中氮素吸收量最高的施氮处理比不施氮的 CK 处理早稻增幅 89.2%,晚稻增幅 79.2%,在达到最高的增幅后,随着施氮量的增加,水稻的氮吸收量随之下降,施氮的促进作用降低甚至转化为抑制作用,如早稻稻谷氮含量在施氮量超过 100%N 处理(施氮量 140 kg/hm<sup>2</sup>)后所占比重有所下降;段云佳等<sup>[25]</sup>也指出,适宜的施氮量有利于棉花氮素的快速积累,氮肥用量过多或不足均不利于棉花生长发育,从而影响氮素的吸收。

增施氮肥虽然促进水稻氮素吸收,但是高氮水平的氮素利用率较低氮水平处理低。两季水稻的氮素表观利用率均表现出随施氮量升高而降低的趋势。Artacho 等<sup>[26]</sup>在智利地区的研究指出,随着氮肥施用量的增加,氮肥利用率会逐渐下降。为此一些学者<sup>[27]</sup>认为,这主要是由于增施氮肥虽然促进水稻营养器官中氮素向稻谷中转移,但是转移率相对降低,过多氮素滞留在营养器官中,造成植株“奢侈”吸氮,从而影响氮素利用率。

如何保证水稻尽可能地吸收氮素养分,保持稳产增产的同时,提升氮素利用效率,众多学者对此看法不一。廖育林等<sup>[28]</sup>认为,通过减少 20%常规尿素与绿肥紫云英配施或者减 40%控释尿素与紫云英配施可以使早稻增产并促进植株氮素吸收,从而提高氮肥利用效率和农学效率;鲁艳红等<sup>[16]</sup>的研究结果表明,在南方双季稻种植区,氮肥减量下添加氮素抑制剂在保证水稻稳产的同时,有利于氮素利用效率的提升及

土壤氮素平衡的保持。本研究发现,适宜的施氮量可在保证双季稻稳产增产条件下,进一步稳定提升氮肥利用效率,如早稻产量最高的 75%N 处理氮素表观利用率较高,农学效率最高;晚稻 100%N 处理产量最高,氮素表观利用率和农学效率也处于较高水平。

### 3.3 施氮量对磷、钾吸收利用的影响

在相同的土壤类型、水分管理及其他栽培措施条件下,养分平衡状况对养分效应高低有明显作用。比如,当某种养分供应过量时,可能会造成其他养分的缺乏或毒害,而导致减产。陆景陵<sup>[29]</sup>认为,单施大量氮肥会破坏植物体内激素的平衡,使植物的生长受到严重影响,配合施用磷、钾肥则可使植物生长得到改善;闫湘等<sup>[30]</sup>也提出缺乏某种养分会限制其他养分发挥作用而影响产量,保证作物生长期所需的各种养分均衡供给可以避免此种状况发生。本试验结果表明,氮肥施用不足,双季稻氮素表观利用率虽然很高,氮、磷、钾积累量却相对较低,双季稻产量同样处于低水平状态,这造成氮、磷、钾素利用效率不高;施氮过量,水稻氮吸收量增加,但是籽粒的氮积累却相应降低,稻草中的钾素积累偏高,产量有所下降,同样的氮、磷、钾素利用效率也下降。双季稻植株对氮、磷、钾养分吸收利用均表现出随施氮量增加而先增后降的趋势,这与杂交棉<sup>[31]</sup>、甜瓜<sup>[32]</sup>和加工番茄<sup>[33]</sup>的养分吸收规律相一致。

从生理生化上看,氮是植物体内许多化合物的物质基础,氮素供应状况关系到植物体内各种物质及能量的转化。氮肥合理施用可以保证作物体内积累充足的氮素,使作物更好地进行各种代谢过程,进而促进对磷、钾素的吸收利用。由此可知,氮、磷、钾素间是相互影响的。王伟妮等<sup>[34]</sup>的研究发现,当施肥量处于低、中水平时,氮、磷、钾间互作效应均表现为协同促进作用;施肥量超过一定水平后则表现为拮抗作用。本研究发现,适宜施氮处理的水稻籽粒氮素积累量最高,说明施氮虽然降低氮素表观利用率,但合理的施用氮肥可以促使双季稻中的氮素向稻谷转运,且磷、钾积累量均随着氮积累量的增加而增加。由此可以推测,氮肥合理施用可促进双季稻对氮、磷、钾的吸收并使其向籽粒积累,从而增加双季稻产量。

## 4 结论

合理施用氮肥可增加双季稻产量,施氮过量或不足均可能导致双季稻不同程度的减产,综合考虑养分专家系统推荐及拟合方程等各方面因素的影响,认为本试验条件下,为保证水稻达到稳产、高产目的,双季稻施氮量为 105~146 kg/hm<sup>2</sup> 较为适宜,这时双季稻氮、磷、钾积累量和利用效率均处于较高或最高水平。然而,本研究只是针对施氮量对双季稻产量,氮、磷、钾养分吸收积累量及氮、磷、钾养分利用效率的部

分组成参数进行分析研究,想要明确施氮量对双季稻磷、钾利用的关系还需对施氮量与养分利用效率其他各参数的关系进行更深一步的研究。

#### 参考文献:

- [1] 朱兆良,金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273.
- [2] 王晓龙,李辉信,胡锋,等. 红壤小流域不同土地利用方式下土壤 N,P 流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 31-34.
- [3] 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.
- [4] 曹彬彬,周丕生,史益敏. 不同氮素水平对风信子磷素与钾素累积的影响[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2010, 28(4): 373-378.
- [5] 齐田锋,吕守忠,于振文. 不同施氮量对冬小麦吸磷特性和产量的影响[J]. 山东农业科学, 1994(6): 10-12.
- [6] 高磊,李余良,李高科,等. 施氮量对南方甜玉米钾素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(3): 609-616.
- [7] Zhang F S, Niu J F, Zhang W F, et al. Potassium nutrition of crops under varied regimes of nitrogen supply [J]. Plant and Soil, 2010, 335(1/2): 21-34.
- [8] 侯云鹏,韩立国,孔丽丽,等. 不同施氮水平下水稻的养分吸收、转运及土壤氮素平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 836-845.
- [9] 鲁艳红,廖育林,汤海涛,等. 不同施氮量对水稻产量、氮素吸收及利用效率的影响[J]. 农业现代化研究, 2010, 31(4): 479-483.
- [10] 鲁艳红,聂军,廖育林,等. 不同控释氮肥减量施用对双季水稻产量和氮素利用的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 155-161.
- [11] 赵福成,景立权,闫发宝,等. 施氮量对甜玉米产量、品质和蔗糖代谢酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(1): 45-53.
- [12] 左青松,杨海燕,冷锁虎,等. 施氮量对油菜氮素积累和运转及氮素利用率的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(3): 511-518.
- [13] 侯云鹏,杨建,李前,等. 施氮对水稻产量、氮素利用及土壤无机氮积累的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(1): 118-124.
- [14] 朱坚,石丽红,田发祥,等. 湖南典型双季稻田氨挥发对施氮量的响应研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1129-1138.
- [15] 何萍,金继运, Pampolino, 等. 基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 499-505.
- [16] 鲁艳红,聂军,廖育林,等. 氮素抑制剂对双季稻产量、氮素利用效率及土壤氮平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 95-104.
- [17] 鲁艳红,廖育林,聂军,等. 紫云英与尿素或控释尿素配施对双季稻产量及氮钾利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 360-368.
- [18] 董桂春,陈琛,袁秋梅,等. 氮肥处理对氮素高效吸收水稻根系性状及氮肥利用率的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(3): 642-651.
- [19] 陈晓光,丁艳锋,唐忠厚,等. 氮肥施用量对甘薯产量和品质性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 979-986.
- [20] 王秀斌,徐新朋,孙刚,等. 氮肥用量对双季稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1279-1286.
- [21] 刘桃菊,朱冰,江绍琳,等. 施氮量对双季稻氮素吸收和产量的影响及其优化[J]. 浙江农业学报, 2014, 26(4): 1004-1009.
- [22] Aslam M M, Zeeshan M, Irum A, et al. Influence of seedling age and nitrogen rates on productivity of rice (*Oryza sativa* L.): A review[J]. American Journal of Plant Sciences, 2015, 6(9): 1361-1369.
- [23] 郭晨,徐正伟,李小坤,等. 不同施氮处理对水稻产量、氮素吸收及利用率的影响[J]. 土壤, 2014, 46(4): 618-622.
- [24] 王秀斌,徐新朋,孙静文,等. 氮肥运筹对机插双季稻产量、氮肥利用率及经济效益的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1167-1176.
- [25] 段云佳,谭玲,张巨松,等. 施氮量对枣棉间作系统棉花干物质和氮素积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1441-1448.
- [26] Artacho P, Bonomelli C, Meza F. Nitrogen application in irrigated rice grown in mediterranean conditions: Effects on grain yield, dry matter production, nitrogen uptake, and nitrogen use efficiency[J]. Journal of Plant Nutrition, 2009, 32(9): 1574-1593.
- [27] 叶全宝,张洪程,魏海燕,等. 不同土壤及氮肥条件下水稻氮利用效率和增产效应研究[J]. 作物学报, 2005, 31(11): 1422-1428.
- [28] 廖育林,鲁艳红,谢坚,等. 紫云英配施控释氮肥对早稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 190-195.
- [29] 陆景陵. 植物营养学(上)[M]. 2版. 北京: 中国农业大学出版社, 2003: 211-212.
- [30] 闫湘,金继运,何萍,等. 提高肥料利用率技术研究进展[J]. 中国农业科学, 2008, 41(2): 450-459.
- [31] 李伶俐,房卫平,马宗斌,等. 施氮量对杂交棉氮、磷、钾吸收利用和产量及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 663-667.
- [32] 胡国智,冯炯鑫,张炎,等. 不同施氮量对甜瓜养分吸收、分配、利用及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 760-766.
- [33] 汤明尧,张炎,胡伟,等. 不同施氮水平对加工番茄养分吸收、分配及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1238-1245.
- [34] 王伟妮,鲁剑巍,何予卿,等. 氮、磷、钾肥对水稻产量、品质及养分吸收利用的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(6): 645-653.