

孙婉菁, 巩宏杰, 李 竹, 等. 化肥减量施用对双季稻氮磷吸收转化及利用率的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(17): 100–106.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.17.017

化肥减量施用对双季稻氮磷吸收转化及利用率的影响

孙婉菁, 巩宏杰, 李 竹, 嵇康轩, 王 波

(苏州大学, 江苏苏州 215123)

摘要:采用田间小区试验, 研究不同化肥水平对双季稻产量、各生育期养分吸收与肥料利用效率的影响。结果表明, 3 个水稻季, 50% 常规氮磷施用水平 (T1)、70% 常规氮磷施用水平 (T2)、100% 常规氮磷施用水平 (T3)、150% 常规氮磷施用水平 (T4) 处理较不施氮磷肥 (T0) 处理的增产率分别为 42.82% ~ 79.62%、24.28% ~ 48.37%、37.85% ~ 77.48%, 其中 T2 处理的边际效应最高; 施肥处理水稻植株氮素和磷素的积累总量 (3 季平均) 分别较 T0 处理显著提高 39.48% ~ 108.40% 和 46.08% ~ 113.90%; 随着化肥投入量的增加, 氮肥、磷肥吸收利用率则呈先上升后下降趋势, 其中 T2 处理最高、T4 处理最低, T2 处理的氮肥、磷肥吸收利用率较 T4 处理显著提高了 21.26% ~ 39.77%、28.25% ~ 53.60%。综合产量、养分吸收和肥料利用率等指标, 与 100% 常规氮磷施用水平 (T3) 相比, 70% 常规氮磷施用水平 (T2) 处理对水稻产量无显著影响, 且氮肥、磷肥吸收利用率最高, 所以双季稻产区有减肥 30% 的潜力。

关键词:化肥减施; 氮磷吸收; 氮磷利用率; 养分管理

中图分类号:S511.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2021)17-0100-07

水稻是我国重要的粮食作物, 在我国的种植面积与产量占粮食作物的 26% 和 32%^[1], 化肥的施用为我国水稻增产作出了巨大贡献, 缓解了粮食需求压力, 保障了我国粮食安全^[2-3]。但近年来, 为了追求高产量常常会施用过量的化肥, 我国水稻种植过程中普遍存在化肥投入高、肥料利用率低、养分流

失大等问题, 并且过量的氮磷流入周围河流、湖泊等水体中, 加剧了农业面源污染, 引发严重的环境问题^[4-5]。

因此, 这种大量施用化肥的生产模式亟待转变, 以满足农业绿色发展的现实需求。大量研究表明, 随着施肥量的增加, 水稻产量和肥料利用率呈先增后降的趋势, 且氮肥的施用有助于稻米提升营养和品质^[6-7], 但化肥施用量增加会加剧氮磷流失^[8-9], 增大温室气体排放的效应值^[10]。鉴于此, 本研究选择丘陵区典型双季稻田, 通过连续 3 个水稻季观测不同化肥水平对双季稻产量、各生育期养分吸收与肥料利用效率的影响, 以期为双季稻产区

收稿日期: 2021-01-13

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2017YFD0800100)。

作者简介: 孙婉菁 (1997—), 女, 陕西安康人, 硕士研究生, 主要从事植物营养与生态修复研究。E-mail: 781398385@qq.com。

通信作者: 王 波, 博士, 副教授, 主要从事植物营养与生态修复研究。E-mail: wangb@suda.edu.cn。

与含油量的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2003, 12(2): 194–197.

[9] 项 璞, 程 婷, 王可法, 等. 江苏省连阴雨过程时空分布特征分析[J]. 气象科学, 2011, 31(增刊 1): 36–39.

[10] 孔海江, 吴胜安, 王 蕊, 等. 2009 年秋季河南一次连阴雨天气成因分析[J]. 气象与环境学报, 2011, 27(2): 39–44.

[11] 林 迢, 简根梅, 裘鹏霄, 等. 浙江早稻播种育秧期连阴雨发生规律分析[J]. 中国农业气象, 2001, 22(3): 10–14.

[12] 朱建强, 张文英, 程伦国, 等. 油菜花果期以持续受渍为特征的排水控制指标试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(4): 34–38.

[13] 陆魁东, 彭莉莉, 黄晚华, 等. 气候变化背景下湖南油菜气象灾害风险评估[J]. 中国农业气象, 2013, 34(2): 191–196.

[14] 刘瑞娜, 杨太明, 陈 鹏, 等. 安徽省油菜花期连阴雨灾害损失评估指标[J]. 中国农业气象, 2016, 37(4): 471–478.

[15] 成 林, 刘荣花. 夏玉米生长中后期连阴雨灾害指标研究[J]. 中国农业气象, 2014, 35(2): 221–227.

[16] 赵 辉, 王 媛, 李 刚, 等. 春季低温连阴雨灾害对农作物产量影响评估[J]. 气象科技, 2011, 39(1): 102–105.

[17] 许孟会, 赵 辉, 王 晋, 等. 春季低温连阴雨对农业生产的影响及防御[J]. 湖南农业科学, 2008(6): 63–65.

[18] 韩沁哲, 罗伯良, 周 伟, 等. 湖南省油菜生长期连阴雨气象灾害发生强度的时空特征[J]. 湖南农业科学, 2012(10): 93–96.

[19] 林秀梅. 浅析拉格朗日插值法的原理及其应用[J]. 吉林财贸学院学报, 1990(3): 49–53.

[20] 代立芹, 王 猛, 李春强, 等. 河北省棉花连阴雨灾害定量化评估指标与风险分析[J]. 气象与环境学报, 2019, 35(5): 108–114.

探索适宜的化肥施用水平提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验田位于湖南省长沙县金井镇的中国科学院亚热带农业生态研究所长沙农业环境观测研究站的双季稻稻区(112°56′~113°30′E、27°55′~28°40′N,海拔135 m),多年平均气温17.5℃,无霜期约为274 d,多年平均降水量为1422 mm。土壤类型为花岗岩发育的水稻土,0~20 cm耕层土壤基本理化性质为全氮含量2.54 g/kg,全磷含量0.62 g/kg,全钾含量38.8 g/kg,有机碳含量22.1 g/kg,容重1.07 g/cm³,pH值为5.31。

1.2 试验设计

试验设置5个化肥梯度,即0%F(T₀)、50%F(T₁)、70%F(T₂)、100%F(T₃)、150%F(T₄)。以当地农民的氮、磷肥施用量为100%基准。早稻化肥正常用量为氮肥(N)120 kg/hm²,磷肥(P₂O₅)75 kg/hm²,钾肥(K₂O)100 kg/hm²。晚稻化肥正常用量为氮肥(N)150 kg/hm²,磷肥(P₂O₅)75 kg/hm²,钾肥(K₂O)100 kg/hm²。氮肥采用尿素,磷肥采用钙镁磷肥,钾肥采用氯化钾。氮肥按基肥:分蘖肥=3:1分次施用,磷肥和钾肥作基肥一次性施用。每个化肥梯度设3次重复,共15个处理,小区面积为270 m²。

试验时间为2018年早稻季至2019年早稻季。移栽日期分别为2018年4月28日、2018年7月28日、2019年4月27日,行间距为27 cm×27 cm。移栽前1 d施用基肥,移栽2周后施追肥和除草剂苋丁。移栽1个月后,人工排水晒田。晒田10 d后复水,并施用杀虫剂虫酰肼,在收获前2星期左右再次排水晒田。

1.3 样品采集与分析方法

水稻收获前1 d,在每个小区取5个样方(每个1 m²)估测产量,所获籽粒风干后称质量,折合含13.5%水分的标准产量,即为最后实际产量。

试验期间采集植物样测定生物量和植株含氮量、含磷量。分别于水稻分蘖期、抽穗期和成熟期,各小区取代表性5穴,根据5穴的平均质量和田间小区插秧密度来确定分蘖期、抽穗期植株生物量,收获期生物量则根据小区样方测产来计产。分蘖期、抽穗期分别测定水稻根系和地上部含氮量、含磷量,收获期测定水稻根系、留茬、秸秆和籽粒含氮

量、含磷量。取样后,将各部分分开后用烘箱105℃下杀青30 min,80℃下烘干至恒质量,粉碎并过60目筛备用。植物干样采用H₂SO₄-H₂O₂消煮,流动分析仪测定氮含量,钒钼黄比色法测定磷含量^[11]。

1.4 数据分析与处理

(1)化肥的边际效应计算公式为

$$MU = \frac{\Delta Y}{\Delta F}$$

式中:MU代表边际效应,kg/kg;Y代表产量,kg/hm²;F代表化肥施用量,kg/hm²。

(2)氮(N)、磷(P₂O₅)2种养分的吸收利用效率参数计算公式相同,以氮为例介绍如下:

生育期水稻总吸氮量(kg/hm²)=根系生物量×根系含氮量+秸秆生物量×秸秆含氮量+籽粒生物量×籽粒含氮量;

氮素积累总量(kg/hm²)=籽粒生物量×籽粒含氮量+秸秆生物量×秸秆含氮量;

每100 kg籽粒需氮量(kg/hm²)=氮积累总量/稻谷产量×100;

氮肥吸收利用率=(施氮区氮积累总量-未施氮区氮积累总量)/施氮量×100%。

采用Excel 2013和SPSS 19.0软件对试验数据进行计算分析,并制作表格。

2 结果与分析

2.1 稻田产量及其构成因素

由表1可以看出,籽粒产量随着化肥施用水平的提高而增多,且T₁、T₂、T₃、T₄处理的籽粒产量均显著高于T₀处理,因此施用化肥能显著提高水稻籽粒产量。3个水稻季,各施肥处理的增产率分别为42.82%~79.62%、24.28%~48.37%、37.85%~77.48%。但T₂、T₃、T₄处理间籽粒产量及籽粒增产量均无显著差异,表明化肥水平高于70%F后,化肥投入量持续增加,但水稻籽粒产量并没有显著增加。其中,T₂处理的边际效应最高,T₁处理次之,随后是T₃与T₄处理,这说明随着化肥施用水平的提高,化肥的边际效应先升高再降低,在70%F水平下化肥的边际效应达到最大。

产量构成因素方面,随着化肥施用水平的提高,株高、结实率、千粒质量均增加。早稻季,T₂、T₃、T₄处理的水稻株高显著高于T₀处理,而晚稻季仅有T₄处理的水稻株高显著高于T₀处理,表明早稻季气温低,化肥施用对水稻株高的影响较为显

表 1 不同施肥处理的产量及其构成因素

水稻季	处理	株高 (cm)	结实率 (%)	千粒质量 (g)	籽粒产量 (kg/hm ²)	增产量 (kg/hm ²)	增产率 (%)	边际效应 (kg/kg)
2018 年早稻	T0	62.00b	71.04b	24.23b	3 174.11c			
	T1	71.67ab	76.28ab	24.83ab	4 533.25b	1 359.14b	42.82	22.65
	T2	73.50a	77.66ab	25.35a	5 289.27a	2 115.16a	66.64	31.50
	T3	75.33a	79.05a	25.88a	5 475.79a	2 301.68a	72.51	5.18
	T4	81.17a	81.99a	26.30a	5 701.35a	2 527.24a	79.62	3.76
2018 年晚稻	T0	102.50b	79.84c	21.40b	4 400.33c			
	T1	108.33ab	84.64bc	24.90ab	5 468.94b	1 068.61b	24.28	14.25
	T2	113.67ab	86.81ab	26.84a	5 967.29a	1 566.97ab	35.61	16.61
	T3	116.33ab	89.42ab	27.66a	6 213.63a	1 813.30ab	41.21	5.47
	T4	120.00a	91.80a	28.12a	6 528.98a	2 128.66a	48.37	4.20
2019 年早稻	T0	59.00b	71.84b	20.60b	3 297.42c			
	T1	67.33ab	83.84a	22.75a	4 545.37b	1 637.95c	37.85	20.80
	T2	70.67a	86.06a	23.14a	5 265.93ab	2 357.51ab	59.70	30.02
	T3	74.00a	86.20a	24.78a	5 573.76a	2 666.34ab	69.03	8.55
	T4	76.67a	88.18a	25.54a	5 852.42a	2 945.00a	77.48	4.64

注:同栏同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下表同。

著,而晚稻季气温高,水稻植株长势良好,化肥施用对水稻株高的影响较小。3 个水稻季,T2、T3、T4 处理的水稻千粒质量均显著高于 T0 处理,所以 70% F 及以上化肥水平能显著提高水稻的千粒质量,从而提高水稻产量。

2.2 不同生育阶段养分积累量

由表 2 可知,2018 年早稻季,分蘖至抽穗期是水稻氮素吸收量占比最高的时期,各处理的占比为 31.89%~40.92%。2018 年晚稻季,移栽至分蘖期

是水稻氮素吸收量占比最高的时期,各处理的占比为 45.90%~56.12%。总体来看,随着施肥水平的提高,水稻的氮素各阶段吸收量及吸收总量均呈上升趋势,其中 T4 处理的水稻氮素吸收总量最高,早稻季为 108.35 kg/hm²,晚稻季为 164.25 kg/hm²。T1、T2、T3、T4 处理的水稻氮素吸收总量均显著高于 T0 处理,说明施用化肥能显著提高水稻的氮素吸收量,但 T2 与 T3 处理各阶段氮素吸收量及总吸收量间差异均不显著。

表 2 不同化肥水平下水稻氮素阶段吸收量及占总吸收量的比例

水稻季	处理	移栽—分蘖		分蘖—抽穗		抽穗—成熟		总量 (kg/hm ²)
		吸收量(kg/hm ²)	比例(%)	吸收量(kg/hm ²)	比例(%)	吸收量(kg/hm ²)	比例(%)	
2018 年早稻	T0	15.71b	30.79	16.27b	31.89	19.04b	37.32	51.02d
	T1	21.88ab	29.51	28.30ab	38.17	23.97a	32.32	74.16c
	T2	23.44ab	26.84	35.74ab	40.92	28.16a	32.24	87.34bc
	T3	25.17ab	27.51	37.13a	40.59	29.19a	31.90	91.49b
	T4	28.53a	26.33	42.84a	39.54	36.98a	34.13	108.35a
2018 年晚稻	T0	40.38b	49.26	17.18b	20.96	24.41c	29.78	81.98c
	T1	62.25a	56.12	19.30ab	17.40	29.37bc	26.48	110.92b
	T2	66.67a	51.62	22.84ab	17.68	39.65bc	30.70	129.16b
	T3	65.47a	46.77	25.79ab	18.42	48.71b	34.80	139.97b
	T4	75.38a	45.90	27.93a	17.01	60.93a	37.10	164.25a

由表 3 可知,分蘖至抽穗期是水稻磷素吸收量占比最高的时期。2018 年早稻季,分蘖至抽穗期,各处理的磷素吸收量占磷素吸收总量的 43.56%~

48.58%。2018 年晚稻季,分蘖至抽穗期,各处理的磷素吸收量占磷素吸收总量的 29.75%~41.75%。总体来看,随着施肥水平的提高,水稻的磷素各阶

段吸收量及吸收总量均呈上升趋势,T4 处理的水稻磷素吸收总量最高,早稻季为 21.47 kg/hm²,晚稻季为 26.55 kg/hm²。T1、T2、T3、T4 处理的水稻磷素吸收总量均显著高于 T0 处理,且 T1、T2、T3 处理的磷素吸收总量均无显著差异。

表 3 不同化肥水平下水稻磷素阶段吸收量及占总吸收量的比例

水稻季	处理	移栽—分蘖		分蘖—抽穗		抽穗—成熟		总量 (kg/hm ²)
		吸收量(kg/hm ²)	比例(%)	吸收量(kg/hm ²)	比例(%)	吸收量(kg/hm ²)	比例(%)	
2018 年早稻	T0	1.65b	16.13	4.46b	43.56	4.13b	40.31	10.24c
	T1	2.62ab	17.14	6.75ab	44.15	5.92a	38.71	15.29b
	T2	2.63ab	14.63	8.75ab	48.58	6.63a	36.79	18.01ab
	T3	2.78ab	14.17	9.47a	48.26	7.38a	37.57	19.63ab
	T4	3.89a	18.14	10.05a	46.81	7.53a	35.05	21.47a
2018 年晚稻	T0	4.91b	40.22	3.63b	29.75	3.67b	30.03	12.21c
	T1	5.69ab	33.50	6.71ab	39.52	4.58b	26.98	16.97b
	T2	6.16ab	30.04	8.56a	41.75	5.78ab	28.20	20.49b
	T3	6.50ab	27.49	9.33a	39.46	7.81ab	33.05	23.64ab
	T4	8.02a	30.21	10.13a	38.16	8.40a	31.64	26.55a

2.3 成熟期养分分配情况

由表 4、表 5 可知,水稻成熟期各部位吸氮量、吸磷量表现为籽粒>秸秆>根>留茬,且籽粒的氮素、磷素吸收量占地上部的大部分。随着施肥量的增加,植株各部位的吸氮量、吸磷量均呈上升趋势。

表 4 不同化肥水平对成熟期水稻不同部位吸氮量的影响

水稻季	处理	根		留茬		秸秆		籽粒	
		吸收量(kg/hm ²)	比例(%)	吸收量(kg/hm ²)	比例(%)	吸收量(kg/hm ²)	比例(%)	吸收量(kg/hm ²)	比例(%)
2018 年早稻	T0	3.93c	7.70	1.74c	3.41	19.01c	37.26	26.34c	51.63
	T1	5.66bc	7.63	2.50bc	3.37	22.15bc	29.87	43.85b	59.13
	T2	6.65b	7.61	3.15b	3.61	26.02ab	29.79	51.52ab	58.99
	T3	7.25ab	7.92	3.22b	3.52	24.98ab	27.30	56.04ab	61.25
	T4	9.39a	8.67	4.26a	3.93	31.57a	29.14	60.13a	58.26
2018 年晚稻	T0	5.58b	6.81	3.36c	4.10	28.62c	34.91	44.42c	54.18
	T1	6.72b	6.06	5.44bc	4.90	38.41b	34.63	60.35b	54.41
	T2	7.92ab	6.13	6.15ab	4.76	50.80a	39.33	64.29b	49.78
	T3	10.14a	7.24	6.28ab	4.49	53.45a	38.19	70.10b	50.08
	T4	10.21a	6.22	7.30a	4.44	60.17a	36.63	86.57a	52.71
2019 年早稻	T0	4.77d	8.60	2.54c	4.58	19.70d	35.53	28.43d	51.28
	T1	5.68c	7.45	3.04b	3.99	25.90c	33.98	41.61c	54.58
	T2	7.44b	8.11	3.71ab	4.04	31.10b	33.88	49.54bc	53.97
	T3	8.33ab	7.87	3.97a	3.75	36.00b	34.01	57.56ab	54.37
	T4	8.93a	7.51	4.38a	3.68	43.10a	36.25	62.48a	52.55

3 个水稻季,收获时各施肥处理根、留茬、秸秆和籽粒的吸氮量分别为 5.66 ~ 10.21 kg/hm²、2.50 ~ 7.30 kg/hm²、22.15 ~ 60.17 kg/hm² 和 41.61 ~ 86.57 kg/hm²,其中秸秆和籽粒带走的总氮量为 66.00 ~ 146.74 kg/hm²。2018 年早稻季,T2、T3、T4 处理的根、留茬、秸秆和籽粒氮素吸收量均显著高于 T0 处理。2018 年晚稻季,T1、T2、T3、T4 处理的

秸秆和籽粒氮素吸收量均显著高于 T0 处理。2019 年早稻季,T1、T2、T3、T4 处理的根、留茬、秸秆和籽粒氮素吸收量均显著高于 T0 处理,说明化肥施用可以显著提高水稻成熟期各部分的吸氮量。3 个水稻季,T2、T3 处理的根、留茬、秸秆和籽粒氮素吸收量均无显著差异。

3 个水稻季,收获时各施肥处理根、留茬、秸秆

表 5 不同化肥水平对成熟期水稻不同部位吸磷量的影响

水稻季	处理	根		留茬		秸秆		籽粒	
		吸收量 (kg/hm ²)	比例 (%)	吸收量 (kg/hm ²)	比例 (%)	吸收量 (kg/hm ²)	比例 (%)	吸收量 (kg/hm ²)	比例 (%)
2018 年早稻	T0	0.56b	5.47	0.22d	2.15	2.45c	23.93	7.01b	68.46
	T1	0.87b	5.69	0.35c	2.29	3.60b	23.54	10.47a	68.48
	T2	1.13b	6.27	0.46bc	2.55	3.90b	21.65	12.52a	69.52
	T3	1.20ab	6.11	0.58b	2.95	4.36b	22.21	13.49a	68.72
	T4	1.56a	7.27	0.74a	3.45	5.32a	24.78	13.85a	64.51
2018 年晚稻	T0	0.68c	5.57	0.33c	2.70	2.36c	19.33	8.84c	72.40
	T1	0.88c	5.19	0.52bc	3.06	3.80bc	22.39	11.77bc	69.36
	T2	1.01bc	4.93	0.54b	2.64	4.62b	22.55	14.32ab	69.89
	T3	1.56ab	6.60	0.58b	2.45	6.25a	26.44	15.25a	64.51
	T4	1.78a	6.70	0.87a	3.28	7.67a	28.89	16.23a	61.13
2019 年早稻	T0	0.71c	6.60	0.36b	3.35	2.76d	25.65	6.93d	64.41
	T1	0.83c	5.21	0.38b	2.39	4.08cd	25.63	10.63c	66.77
	T2	1.13b	6.09	0.45b	2.42	4.97bc	26.78	12.01bc	64.71
	T3	1.33ab	6.09	0.56a	2.57	6.21ab	28.45	13.73ab	62.90
	T4	1.37a	5.75	0.57a	2.39	7.51a	31.54	14.36a	60.31

和籽粒的吸磷量分别为 0.83 ~ 1.78 kg/hm²、0.35 ~ 0.87 kg/hm²、3.60 ~ 7.67 kg/hm² 和 10.47 ~ 16.23 kg/hm²,其中秸秆和籽粒带走的总磷量为 14.07 ~ 23.90 kg/hm²。3 个水稻季,T2、T3、T4 处理的秸秆和籽粒磷素吸收量均显著高于 T0 处理;T2、T3 处理根和籽粒的磷素吸收量无显著差异。

2.4 氮素磷素利用率

由表 6、表 7 可知,随着化肥投入量的增加,双季稻植株的氮素、磷素积累总量及 100 kg 籽粒吸氮量、吸磷量均呈上升趋势;而氮肥、磷肥吸收利用率则呈先上升后下降趋势。

T0 处理平均氮素、磷素积累总量分别为 55.51、10.12 kg/hm²,T1、T2、T3、T4 处理的平均氮素、磷素积累总量与 T0 相比分别提高了 39.48%、64.11%、

79.04%、108.40% 和 46.13%、72.45%、95.35%、113.97%。T1、T2、T3、T4 处理的氮素、磷素积累总量均显著高于 T0 处理,表明施用化肥能显著提高水稻的氮素、磷素积累总量。

3 个水稻季,氮肥、磷肥吸收利用率均以 T2 处理最高、T4 处理最低,这表明在 50% ~ 70% F 梯度,随着化肥水平的提高,氮肥、磷肥吸收利用率呈上升趋势;而在 70% ~ 150% F 梯度,随着化肥水平的提高,氮肥、磷肥吸收利用率呈下降趋势。2018 年晚稻季,各施肥处理的氮肥、磷肥吸收利用率均无显著差异;2018 年和 2019 年早稻季,T2 处理的氮肥、磷肥吸收利用率显著高于 T4 处理,说明早稻季化肥水平从 70% F 提高到 150% F 会显著降低氮肥、磷肥吸收利用率。

表 6 不同化肥水平下氮肥利用率

处理	氮素积累总量(kg/hm ²)			100 kg 籽粒吸氮量(kg/hm ²)			氮肥吸收利用率(%)		
	2018 年早稻	2018 年晚稻	2019 年早稻	2018 年早稻	2018 年晚稻	2019 年早稻	2018 年早稻	2018 年晚稻	2019 年早稻
T0	45.35c	73.04d	48.13d	1.43a	1.66b	1.46c			
T1	66.00b	98.76c	67.51c	1.46a	1.81b	1.49c	34.42a	34.29a	32.30ab
T2	77.54ab	115.09bc	80.64bc	1.47a	1.93b	1.53bc	38.32a	40.05a	38.70a
T3	81.02a	123.55ab	93.56b	1.48a	1.99b	1.68ab	29.73ab	33.67a	37.86a
T4	94.70a	146.74a	105.58a	1.66a	2.25a	1.80a	27.42b	32.76a	31.92b

3 讨论与结论

氮磷是水稻植株生长发育及产量形成的关键

限制因素^[12-13]。本研究中,连续 3 个水稻季的试验结果表明,T0 处理籽粒产量显著低于其他施肥处理,表明肥料的施用可以显著提高籽粒产量。增

表 7 不同化肥水平下磷肥利用率

处理	磷素积累总量(kg/hm ²)			100 kg 籽粒吸磷量(kg/hm ²)			磷肥吸收利用率(%)		
	2018 年早稻	2018 年晚稻	2019 年早稻	2018 年早稻	2018 年晚稻	2019 年早稻	2018 年早稻	2018 年晚稻	2019 年早稻
T0	9.46c	11.20d	9.69d	0.30a	0.25c	0.29b			
T1	14.07b	15.57c	14.71c	0.31a	0.28c	0.32b	12.29a	11.65a	13.39a
T2	16.42ab	18.94bc	16.98bc	0.31a	0.32bc	0.32b	13.26a	14.74a	13.89a
T3	17.85a	21.50ab	19.94ab	0.33a	0.35ab	0.36ab	11.19ab	13.73a	13.67a
T4	19.17a	23.90a	21.87a	0.34a	0.37a	0.37a	8.63b	11.29a	10.83b

加施氮量、施磷量可以促使水稻有效分蘖,增加成熟期穗数,提高每穗粒数和结实率,进而获得高产^[14-16]。杨建等在吉林地区的研究表明,水稻产量会随着施氮量的增加而先增加后下降,当氮肥施用量超过 180 kg/hm²,水稻产量反而会下降^[17]。而本研究 T4 处理晚稻季施氮肥 225 kg/hm²,但产量并未下降,可能是由于红土 N、P 比较缺乏^[18],土壤自身养分供应不足。晚稻季的产量高于早稻季,一是由于晚稻氮肥施用量更高,二是晚稻种植期间气温较高,利于作物生长。

水稻本身对氮磷有吸收和固定作用^[19]。本研究中,随化肥投入的增加,水稻植株总吸氮量、总吸磷量及成熟期各部分吸氮量、吸磷量均呈上升趋势,说明施肥可以提高水稻各个生育期氮素、磷素的积累量。有研究表明,施肥可以提高各生育期的氮素积累量^[20],并增加水稻各部分的干物质及养分积累量^[21]。而氮素、磷素积累总量的增加,会提高水稻干物质积累总量,进而增加产量^[22-23]。

施肥处理水稻植株氮素和磷素的积累总量(3 季平均)分别较 T0 处理显著提高 39.48%~108.40% 和 46.08%~113.90%,施肥显著提高了水稻植株氮磷吸收量。这表明自然条件下土壤提供的氮素和磷素不能充分满足水稻生长需求,施肥能提高植株氮磷吸收量,但并非施肥量越高植株氮磷吸收量就越高。冯涛等的研究中,当施氮量在 0~225 kg/hm² 时,水稻植株的氮素吸收量随施氮量的增加而增加,但当施氮量超过 225 kg/hm² 后植株的氮素吸收量基本保持稳定^[24]。本研究中,T2 与 T3 处理氮素、磷素积累总量和 100 kg 籽粒吸氮量、吸磷量的差异均不显著,说明 70% F 处理的氮磷施用量短期内不会对水稻植株的氮磷吸收量产生显著影响。

氮磷肥吸收利用方面的研究相对较多,如张洪程等就不同化肥施用量对干物质积累量及氮磷吸收特性的影响进行了相关研究,发现植株吸氮量和

吸磷量、干物质积累量、每 100 kg 籽粒需氮量均随施肥量的增加而增加,但氮磷肥吸收利用率及农学利用率均随着施肥量的增加而先增加后减少^[25-27],这与本研究得到的结果一致。适量施肥可以促进水稻增加侧生根数量,同时使根毛变密变长,进而提高水稻植株的养分吸收表面积及吸收能力,但是过量的氮肥反而会促进茎部生长,抑制根部延长^[28-29]。施肥可以促进水稻对养分的吸收,但超过一定限度,化肥施用量越高,损失越多,利用率下降,所以应该合理施肥,以提高肥料利用率。而本研究中各施肥处理的氮肥利用率和磷肥利用率分别达到 27.42%~40.05% 和 8.63%~14.74%,与张福锁等的研究结果^[3]相似。

我国 45% 的稻田施用了过量的氮肥^[30],已有研究表明,减肥 10~20% 并不会显著影响水稻籽粒产量,能保证高产稳产,并且对植株地上部的氮、磷、钾含量无显著影响^[31-32]。本研究结果也表明,70% F 处理(即减肥 30%)对水稻产量无显著影响,且氮肥、磷肥吸收利用率最高,所以双季稻产区有减肥 30% 的潜力。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴:2019[M]. 北京: 中国统计出版社,2019.
- [2] 章秀福,王丹英,方福平,等. 中国粮食安全和水稻生产[J]. 农业现代化研究,2005,26(2):85-88.
- [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] Peng S B, Tang Q Y, Zou Y B. Current status and challenges of rice production in China[J]. Plant Production Science, 2009, 12(1): 3-8.
- [5] 习斌,翟丽梅,刘申,等. 有机无机肥配施对玉米产量及土壤氮磷淋溶的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(2):326-335.
- [6] 徐春梅,王丹英,邵国胜,等. 施氮量和栽培密度对超高产水稻中早 22 产量和品质的影响[J]. 中国水稻科学,2008,22(5):507-512.
- [7] 刘代银,伍菊仙,任万军,等. 氮肥运筹对免耕高留茬抛秧稻氮素

- 吸收、运转和子粒品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(3): 514–521.
- [8] 田 昌, 周 旋, 杨俊彦, 等. 化肥氮磷优化减施对水稻产量和田面水氮磷流失的影响[J]. 土壤, 2020, 52(2): 311–319.
- [9] Liu J, Ouyang X Q, Shen J L, et al. Nitrogen and phosphorus runoff losses were influenced by chemical fertilization but not by pesticide application in a double rice – cropping system in the subtropical hilly region of China[J]. The Science of the Total Environment, 2020, 715: 136852.
- [10] 朱利群, 王春杰, 杨曼君, 等. 施肥对长江中下游稻田温室气体排放的影响——基于 Meta 分析[J]. 资源科学, 2017, 39(1): 105–115.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 农业出版社, 2000: 1–495.
- [12] Daniel T C, Sharpley A N, Lemunyon J L. Agricultural phosphorus and eutrophication: a symposium overview [J]. Journal of Environmental Quality, 1998, 27(2): 251–257.
- [13] 蒋伟勤, 马中涛, 胡 群, 等. 缓控释氮肥对水稻生长发育及氮素利用的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(3): 777–784.
- [14] 黄元财, 王伯伦, 王 术, 等. 施氮量对水稻产量和品质的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2006, 37(5): 688–692.
- [15] 郭鑫年, 孙 娇, 梁锦秀, 等. 施磷对宁夏引黄灌区水稻产量、氮磷吸收利用及氮素残留的影响[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 49–54, 61.
- [16] 董作珍, 吴良欢, 柴 婕, 等. 不同氮磷钾处理对中亚优 1 号水稻产量、品质、养分吸收利用及经济效益的影响[J]. 中国水稻科学, 2015, 29(4): 399–407.
- [17] 杨 建, 樊慧梅, 刘笑笑, 等. 施氮对水稻产量氮素吸收及其品质的影响[J]. 农业与技术, 2015, 35(17): 16–19.
- [18] 杨苞梅, 林 电, 吴多能, 等. 海南省蕉园燥红土养分状况及其限制因子研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(10): 168–172.
- [19] 郭海瑞, 赵立纯, 窦超银. 稻田人工湿地氮磷去除机制及其研究进展[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(6): 23–26.
- [20] 陈梦楠, 高志强, 孙 敏, 等. 休闲期耕作配施磷肥对旱地小麦氮素吸收与转运的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(11): 1569–1575.
- [21] 唐海明, 肖小平, 李 超, 等. 长期施肥对双季稻区水稻植株养分积累与转运的影响[J]. 生态环境学报, 2018, 27(3): 469–477.
- [22] 江立庚, 甘秀芹, 韦善清, 等. 水稻物质生产与氮、磷、钾、硅素积累特点及其相互关系[J]. 应用生态学报, 2004, 15(2): 226–230.
- [23] 马 鹏, 张宇杰, 林 邯, 等. 油—稻轮作下前茬氮肥投入与稻季氮肥运筹对稻田土壤养分、碳库及作物产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(4): 896–904.
- [24] 冯 涛, 杨京平, 施宏鑫, 等. 高肥力稻田不同施氮水平下的氮肥效应和几种氮肥利用率的研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2006, 32(1): 60–64.
- [25] 张洪程, 王秀芹, 戴其根, 等. 施氮量对杂交稻两优培 9 产量、品质及吸氮特性的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(7): 800–806.
- [26] 王伟健, 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.
- [27] 易 均, 谢桂先, 刘 强, 等. 磷肥减施对双季稻生长和产量及磷肥利用率的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2016, 42(2): 197–201.
- [28] Stitt M. Nitrate regulation of metabolism and growth[J]. Current Opinion in Plant Biology, 1999, 2(3): 178–186.
- [29] 樊剑波, 张亚丽, 王东升, 等. 水稻氮素高效吸收利用机理研究进展[J]. 南京农业大学学报, 2008, 31(2): 129–134.
- [30] Zhang D, Wang H Y, Pan J T, et al. Nitrogen application rates need to be reduced for half of the rice paddy fields in China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 265: 8–14.
- [31] 刘红江, 郑建初, 郭 智, 等. 太湖地区氮肥减量对水稻氮素吸收利用的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(11): 2960–2965.
- [32] 康洪灿, 李国生, 钊兴宽, 等. 水稻化肥减量增效施用技术试验初探[J]. 中国稻米, 2017, 23(4): 176–179.

(上接第 95 页)

- [20] O'Leary B, Park J, Plaxton W C. The remarkable diversity of plant PEPC (phosphoenolpyruvate carboxylase): recent insights into the physiological functions and post – translational controls of non – photosynthetic PEPCs [J]. The Biochemical Journal, 2011, 436(1): 15–34.
- [21] Chen P B, Li X, Huo K, et al. Promotion of photosynthesis in transgenic rice over – expressing of maize *C₄ phosphoenolpyruvate carboxylase* gene by nitric oxide donors [J]. Journal of Plant Physiology, 2014, 171(6): 458–466.
- [22] Li X, Wang C, Ren C G. Effects of butanol neomycin and Calcium on the photosynthetic characteristics of *pepc* transgenic rice [J]. African Journal of Biotechnology, 2011, 76(10): 17466–17476.
- [23] Huo K, Li X, He Y F, et al. Exogenous ATP enhance signal response of suspension cells of transgenic rice (*Oryza sativa* L.) expressing maize *C₄ – pepc* encoded phosphoenolpyruvate carboxylase under PEG treatment [J]. Plant Growth Regulation, 2017, 82(1): 55–67.
- [24] Zhang C, Li X, He Y, et al. Physiological investigation of *C₄ phosphoenolpyruvate carboxylase* introduced rice line shows that sucrose metabolism is involved in the improved drought tolerance [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2017, 115: 328–342.
- [25] He Y F, Xie Y F, Li X, et al. Drought tolerance of transgenic rice overexpressing maize *C₄ – pepc* gene related to increased anthocyanin synthesis regulated by sucrose and calcium [J]. Biologia Plantarum, 2020, 64: 136–149.