

# 寒地粳型超级稻最佳施肥量及适宜配比的研究

陈书强<sup>1</sup>, 薛菁芳<sup>1</sup>, 杜晓东<sup>1</sup>, 杨丽敏<sup>1</sup>, 赵海新<sup>1</sup>, 蔡永盛<sup>1</sup>, 周 通<sup>1</sup>, 周明旭<sup>1</sup>,  
刘 辉<sup>1</sup>, 赵广山<sup>2</sup>, 李 想<sup>3</sup>

(1. 黑龙江省农业科学院水稻研究所/农业农村部寒地粳稻冷害科学观测实验站, 黑龙江 佳木斯 154026; 2. 佳木斯市农业技术推广总站, 黑龙江 佳木斯 154003; 3. 黑龙江省农业机械工程科学研究院佳木斯农业机械化研究所, 黑龙江 佳木斯 154004)

**摘 要:**为了探明黑龙江省推广面积较大的超级稻品种龙粳21和常规品种龙粳29的最佳氮、磷、钾肥料配比及最佳施肥水平,建立水稻施肥模型,为高产品种进一步推广提供配套技术支撑,本研究对两个品种进行了“3414”肥料效应试验。结果表明,水稻产量与氮、磷、钾肥的施用量之间呈极显著回归关系,氮素是影响水稻产量的最主要因素。氮、磷、钾三要素对增产效果影响的顺序:龙粳21为氮>钾>磷,龙粳29为氮>磷>钾,过量施用氮、磷、钾肥会造成单位施肥量水稻增产效果下降,从而降低肥料的利用率。常规品种龙粳29的最佳施肥量为:N 149.7 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 61.1 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 62.1 kg/hm<sup>2</sup>, N:P:K=2.45:1:1.05,最佳经济产量为9 577.5 kg/hm<sup>2</sup>;超级稻品种龙粳21的最佳施肥量为:N 161.9 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 63.5 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 83.6 kg/hm<sup>2</sup>, N:P:K=2.55:1:1.32,最佳经济产量为9 489.0 kg/hm<sup>2</sup>。施氮量增加能提高每平方米穗数和穗粒数,但降低了结实率和千粒重,品种间有差异;增加施钾量有提高每平方米穗数和穗粒数的作用,在种植时注重钾肥的施用量。该试验建立的优化施肥方案可作为参考,结合不同积温区具体情况加以调整,实现水稻高产与增效。

**关键词:**寒地;粳稻;施氮量;施肥比例

中图分类号:S511

文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2022)06-0001-06

## Study on Optimum Fertilization Rate and Suitable Proportion of Japonica Super Rice in Cold Region

CHEN Shuqiang<sup>1</sup>, XUE Jingfang<sup>1</sup>, DU Xiaodong<sup>1</sup>, YANG Limin<sup>1</sup>, ZHAO Haixin<sup>1</sup>, CAI Yongsheng<sup>1</sup>, ZHOU Tong<sup>1</sup>,  
ZHOU Mingxu<sup>1</sup>, LIU Hui<sup>1</sup>, ZHAO Guangshan<sup>2</sup>, LI Xiang<sup>3</sup>

(1. Rice Research Institute, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences/Scientific Observing and Experimental Station of Rice Cold Damage in Cold Region, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Jiamusi 154026; 2. Jiamusi Agricultural Technology Extension Station, Jiamusi 154003; 3. Jiamusi Institute of Agricultural Mechanization, Heilongjiang Agricultural Machinery Engineering Research Institute, Jiamusi 154004, China)

**Abstract:** In order to prove nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer optimum ratio and fertilization level of the super rice variety Longjing 21 and conventional variety Longjing 29 which had larger extension area in Heilongjiang Province, to establish rice fertilization model and provide technical support for further promotion of high-yielding varieties. In this study, the "3414" fertilizer effect test was performed on two varieties. The results showed that there was very significant regression relationship between rice yield and application amount of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizer, and nitrogen was the most important factor for affecting rice yield. The sequence of the effects of nitrogen, phosphorus, and potassium on the yield increase effect: the super rice variety Longjing 21 was nitrogen>potassium>phosphorus, and the conventional rice variety Longjing 29 was nitrogen>phosphorus>potassium, excessive application of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizer would decrease the effect of increasing the yield of rice, thereby reduced fertilizer utilization. The optimal fertilization rate of conventional variety Longjing 29 was: N 149.7 kg/ha, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 61.1 kg/ha, K<sub>2</sub>O 62.1 kg/ha, N:P:K was 2.45:1:1.05, and the optimal economic yield was 9577.5 kg/ha.

收稿日期:2019-12-01

基金项目:黑龙江省自然科学基金项目(LH2019C063);黑龙江省农业科学院“农业科技创新跨越工程”专项(HNK2019CX12-08);黑龙江省农业科学院院级课题(2020YYF021)

作者简介:陈书强(1976-),男,研究员,博士,主要从事水稻高产高效优质栽培研究。

The optimal fertilization rate of the super rice variety Longjing 21 was: N 161.9 kg/ha, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 63.5 kg/ha, K<sub>2</sub>O 83.6 kg/ha, N:P:K was 2.55:1:1.32, the optimal economic yield was 9489.0 kg/ha. The increase of nitrogen application could increase the number of ears per ear and the number of ears per square meter, but reduce the seed setting rate and thousand-grain weight, there were differences between varieties. The increase of potassium application had the effect of increasing the number of ears and ears per square meter, paying attention to the application of potassium fertilizer when planting. The optimized fertilization scheme established in this experiment could be used as reference and adjusted the specific conditions of different accumulated temperature zones, to achieve rice high yield and efficiency.

**Key words:** Cold region; Japonica rice; Nitrogen application; Fertilization ratio

黑龙江省2017年水稻种植面积达到314.8万hm<sup>2</sup>,总产量2199.7万t,商品量高达1574.7万t,产量与商品量均居全国首位。但是黑龙江的水稻单产水平近些年一直较低,据中国种植业信息网统计数据,2017年黑龙江水稻单产水平为6987.9 kg/hm<sup>2</sup>,略高于全国平均水平的6891.3 kg/hm<sup>2</sup>。合理施肥是实现水稻高产优质高效的主要栽培措施之一,但是农民为了提高水稻产量常常过量施肥,尤其是过量施用氮肥,还经常忽视其他肥料投入,使水稻出现病害、倒伏,导致严重减产,影响水稻的经济效益。此外,施肥不当还会引起土壤板结,生态环境污染,降低水稻对肥料的利用率等问题。因此,许多科研工作者对水稻合理施肥,尤其是氮磷钾适宜配比对水稻产量的影响进行了大量研究<sup>[1-7]</sup>。龙粳21是黑龙江省推广的超级稻品种,其米质较好、抗病性强、产量高,年推广面积在100万亩以上。本研究选用超级稻品种龙粳21和推广面积较大的一个常规品种龙粳29,进行了“3414”肥料效应试验,旨在明确两个品种的最佳氮、磷、钾肥料配比及最佳施肥水平,建立水稻施肥模型,为超级稻品种进一步推广提供配套技术支持。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

氮肥:尿素(含N 46%);磷肥:普通过磷酸钙(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 16%);钾肥:硫酸钾(含K<sub>2</sub>O 50%)。

水稻品种:龙粳29(常规品种,11片叶)、龙粳21(超级稻品种,12片叶)。

### 1.2 试验地点与试验设计

试验在黑龙江省农业科学院水稻研究所试验地进行。采用农业农村部《测土配方施肥技术规范》推荐的“3414”完全试验设计。试验设氮、磷、钾3个因素,每个因素4个水平,共计14个处理,各处理因子编码见表1。4个水平的含义:0水平指不施肥,2水平指当地最佳施肥量,1水平=2水

平×0.5,3水平=2水平×1.5(过量施肥水平)。2水平根据高产栽培实践与经验合理确定,施N量为138 kg/hm<sup>2</sup>。试验小区面积30 m<sup>2</sup>,3次重复,随机区组排列,四周设保护行。

表1 “3414”肥效试验N、P、K因素水平

编号	处理水平	编码方案			肥料用量(kg/hm <sup>2</sup> )		
		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
1	N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	0	0	0	0	0	0
2	N <sub>0</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	0	2	2	0	69	69
3	N <sub>1</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	1	2	2	69	69	69
4	N <sub>2</sub> P <sub>0</sub> K <sub>2</sub>	2	0	2	138	0	69
5	N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	2	1	2	138	34.5	69
6	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	2	2	2	138	69	69
7	N <sub>2</sub> P <sub>3</sub> K <sub>2</sub>	2	3	2	138	103.5	69
8	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>0</sub>	2	2	0	138	69	0
9	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	2	2	1	138	69	34.5
10	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>3</sub>	2	2	3	138	69	103.5
11	N <sub>3</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	3	2	2	207	69	69
12	N <sub>1</sub> P <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	1	1	2	69	34.5	69
13	N <sub>1</sub> P <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	1	2	1	69	69	34.5
14	N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> K <sub>1</sub>	2	1	1	138	34.5	34.5

### 1.3 试验实施

水稻于4月20日播种,采用大棚早育苗移栽的种植方式,育壮中苗,叶龄3.1~3.5叶,秧龄30~35 d,苗高13 cm左右,地上部茎叶结构为“3、3、1、1、8”。5月20日移栽,行株距为30.0 cm×13.3 cm,确保插植穴数在25穴/m<sup>2</sup>以上。每穴基本苗为5苗。本田施肥具体方法为:基肥氮肥用量占40%、磷肥100%、钾肥50%;分蘖肥氮肥30%;穗肥氮肥20%、钾肥50%;粒肥氮肥10%。采用间歇灌溉和晒田的灌溉方式。病虫害防治及除草措施同生产田。10月1日分小区收获测产。

### 1.4 测定项目与方法

(1)穗部性状及产量构成因素:每个处理3次重复,每个重复调查10穴,计算每穴平均有效穗

数,按平均有效穗数为标准取3穴。将3穴分别称穗干重和谷草干重后,计算经济系数。将3穴的穗混放,从中取出大小一致中等穗10个,测定其每穗长、实粒数、秕粒数和空粒数等性状。

(2)成熟期测产:每个处理3次重复,每个重复割7.5 m<sup>2</sup>,自然晾干脱谷,称重,晒干换算成标准含水量后计算产量,并从测产的样本中取样,测定千粒重。按密度折算面积。

### 1.5 数据处理

采用 Microsoft Office Excel 2003, DPS 7.05 和 SPSS 11.5 软件进行数据整理及差异显著性分析,显著水平为  $P < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 对产量及其构成因素的影响

常规品种龙粳29不施肥处理的产量为6 259.5 kg/hm<sup>2</sup>,缺N区处理N<sub>0</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>、缺P区处理N<sub>2</sub>P<sub>0</sub>K<sub>2</sub>、缺K区处理N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>0</sub>的产量分别为6 393.0、9 118.5、9 253.5 kg/hm<sup>2</sup>(表2)。超级稻品种龙粳21不施肥处理的产量为4 776.0 kg/hm<sup>2</sup>,缺N区处理N<sub>0</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>、缺P区处理N<sub>2</sub>P<sub>0</sub>K<sub>2</sub>、缺K区处理N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>0</sub>的产量分别为4 966.5、8 592.0、8 697.0 kg/hm<sup>2</sup>(表3)。两品种的缺N区相对产量明显低于缺P区和缺K区,结果表明,氮素是影响水稻产量的最主要因素。

表2 不同处理对常规稻品种龙粳29产量及其构成的影响

编号	处理水平	穗数(个/m <sup>2</sup> )	每穗粒数	结实率(%)	千粒重(g)	理论产量(kg/hm <sup>2</sup> )	实际产量(kg/hm <sup>2</sup> )	较空白增产(%)
1	N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	281.7g	85.6e	98.0a	29.1ab	6 862.0f	6 259.5e	0
2	N <sub>0</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	270.4g	90.0e	97.8a	29.2ab	6 959.5f	6 393.0e	2.1
3	N <sub>1</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	331.7f	102.4d	97.9a	29.4a	9 789.7e	8 773.5d	40.1
4	N <sub>2</sub> P <sub>0</sub> K <sub>2</sub>	422.1cd	115.1bc	96.5ab	27.0efg	12 669.2bcd	9 118.5abcd	45.7
5	N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	415.9cd	110.3bcd	94.6ab	27.0efg	11 723.5cde	9 303.0ab	48.6
6	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	384.6de	103.0d	96.3ab	28.4bcd	10 820.7de	9 340.5ab	49.2
7	N <sub>2</sub> P <sub>3</sub> K <sub>2</sub>	387.5de	105.6bcd	96.6ab	28.0cd	11 067.2de	9 232.5abc	47.5
8	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>0</sub>	360.4ef	110.2bcd	97.4a	28.2bcd	10 925.7de	9 253.5abc	47.8
9	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	480.8ab	128.6a	94.5ab	26.9fg	15 702.1a	9 294.0ab	48.5
10	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>3</sub>	443.4bc	128.9a	92.3b	26.6g	14 047.8ab	9 367.5a	49.6
11	N <sub>3</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	513.8a	117.0b	86.7c	25.6h	13 289.8bc	9 487.5a	51.6
12	N <sub>1</sub> P <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	391.7de	110.3bcd	96.9a	28.0cde	11 698.7cde	8 902.5bcd	42.2
13	N <sub>1</sub> P <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	381.7de	104.8cd	97.6a	27.6def	10 767.5de	8 844.0cd	41.3
14	N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> K <sub>1</sub>	345.9ef	108.1bcd	97.2a	28.8abc	10 448.5e	9 231.0abc	47.5

注:同列小写字母不同表示在0.05水平差异显著,下同

表3 不同处理对超级稻品种龙粳21产量及其构成的影响

编号	处理水平	穗数(个/m <sup>2</sup> )	每穗粒数	结实率(%)	千粒重(g)	理论产量(kg/hm <sup>2</sup> )	实际产量(kg/hm <sup>2</sup> )	较空白增产(%)
1	N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	242.1f	90.8bcd	98.0abc	27.5ab	5 939.9d	4 776.0h	0
2	N <sub>0</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	265.0f	86.2d	98.3abc	27.8ab	6 225.4d	4 966.5h	4.0
3	N <sub>1</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	336.7e	100.0ab	98.2abc	28.3ab	9 359.5bc	8 449.5ef	76.9
4	N <sub>2</sub> P <sub>0</sub> K <sub>2</sub>	402.5bcd	96.9abc	97.4c	27.4ab	10 425.5abc	8 592.0de	79.9
5	N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	411.7abc	102.4a	97.7c	27.4ab	11 247.9ab	8 808.0cd	84.4
6	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	389.6bcde	98.1abc	97.4c	28.2ab	10 458.4abc	9 316.5a	95.1
7	N <sub>2</sub> P <sub>3</sub> K <sub>2</sub>	384.2cde	97.8abc	98.2abc	27.6ab	10 167.4bc	8 974.5bc	87.9
8	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>0</sub>	349.2de	96.4abcd	98.4abc	28.2ab	9 358.8bc	8 697.0cde	82.1
9	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	416.7abc	100.3ab	99.5a	27.2b	11 339.1ab	8 830.5cd	84.9
10	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>3</sub>	439.2ab	102.9a	99.4ab	27.0b	12 153.7a	9 231.0ab	93.3
11	N <sub>3</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	455.4a	101.5a	98.6abc	27.0b	12 292.2a	9 381.0a	96.4
12	N <sub>1</sub> P <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	370.4cde	94.8abcd	97.9bc	28.6a	9 898.1bc	8 251.5f	72.8
13	N <sub>1</sub> P <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	354.6de	88.2cd	98.7abc	27.7ab	8 553.3c	7 966.5g	66.8
14	N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> K <sub>1</sub>	379.6cde	94abcd	98.1abc	28.1ab	9 821.6bc	8 683.5cde	81.8

由图1可知,常规品种龙粳29,当磷、钾2水平时(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 69 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 69 kg/hm<sup>2</sup>),4个施氮水平

(N<sub>0</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>1</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>)的产量分别为6 393.0、8 773.5、9 340.5、9 487.5 kg/hm<sup>2</sup>,施用氮肥增产效果

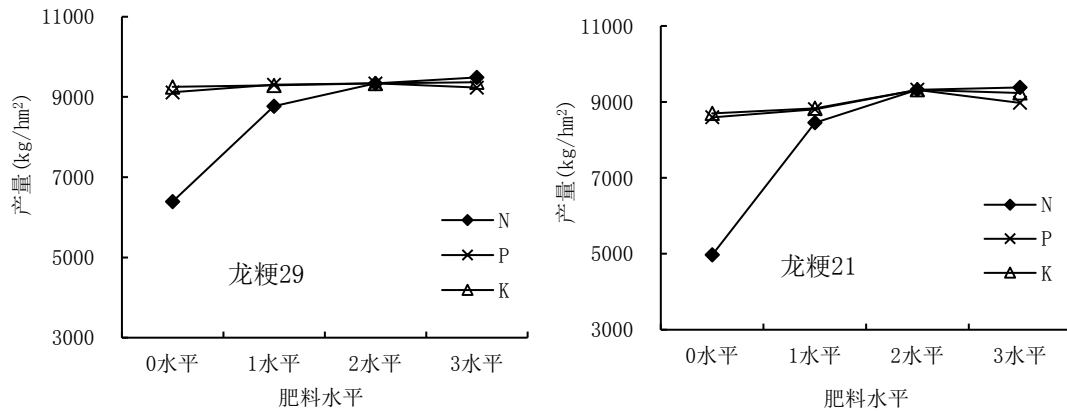


图1 肥料用量对常规品种龙粳29和超级稻品种龙粳21产量的影响

明显,水稻产量随着施氮量的增加而增加;当氮、钾2水平时(N 138 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 69 kg/hm<sup>2</sup>),4个施磷水平(N<sub>2</sub>P<sub>0</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>1</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>3</sub>K<sub>2</sub>)的产量分别为9 118.5、9 303.0、9 340.5、9 232.5 kg/hm<sup>2</sup>,水稻产量随着磷肥用量增加而增加,当达到最大值时,继续增加磷肥用量,产量开始下降;当氮、磷2水平时(N 138 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>69 kg/hm<sup>2</sup>),4个施钾水平(N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>0</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>3</sub>)的产量分别为9 253.5、9 294.0、9 340.5、9 367.5 kg/hm<sup>2</sup>,随着钾肥用量增加水稻产量增加,增加幅度不明显。

由表2可知,随着施氮水平的提高,常规品种龙粳29的每平方米穗数增加,氮3水平达到513.8个/m<sup>2</sup>,所有处理中最多;每穗粒数也随施氮量增加而增加,结实率和千粒重下降。随着施磷量的增加,每平方米穗数和每穗粒数有降低趋势,结实率和千粒重变化不大。随着施钾水平的提高,产量各因素变化不规律,每平方米穗数和每穗粒数以钾3水平较高,结实率和千粒重以钾2水平较高。

由图1可知,超级稻品种龙粳21当磷、钾2水平时(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 69 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 69 kg/hm<sup>2</sup>),4个施氮水平(N<sub>0</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>1</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>)的产量分别为4 966.5、8 449.5、9 316.5、9 381.0 kg/hm<sup>2</sup>,施用氮肥增产效果明显,水稻产量随着施氮量的增加而增加,2水平与3水平间差异不明显;当氮、钾2水平时(N 138 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 69 kg/hm<sup>2</sup>),4个施磷水平(N<sub>2</sub>P<sub>0</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>1</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>3</sub>K<sub>2</sub>)的产量分别为8 592.0、8 808.0、9 316.5、8 974.5 kg/hm<sup>2</sup>,水稻产量随着磷肥用量增

加而增加,当达到最大值时,继续增加磷肥用量,产量开始下降;当氮、磷2水平时(N 138 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 69 kg/hm<sup>2</sup>),4个施钾水平(N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>0</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>3</sub>)的产量分别为8 697.0、8 830.5、9 316.5、9 231.0 kg/hm<sup>2</sup>,随着钾肥用量增加水稻产量增加,达到最大值时,继续增加钾肥用量,产量开始下降。

由表3可知,随着施氮水平的提高,超级稻品种龙粳21的每平方米穗数增加,氮3水平达到455.4个/m<sup>2</sup>,所有处理中最多;每穗粒数、结实率和千粒重变化不大。随着施磷量的增加,每平方米穗数和每穗粒数有降低趋势,结实率和千粒重变化不大。随着施钾水平的提高,产量各因素变化不规律,每平方米穗数和每穗粒数钾3水平较高,结实率钾1水平较高,千粒重钾0水平较高。

## 2.2 肥料与产量及利用率间关系

应用“3414”分析软件分析水稻产量Y与氮、磷、钾肥料用量关系,建立产量Y与施氮量X<sub>1</sub>(N)、施磷量X<sub>2</sub>(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)、施钾量X<sub>3</sub>(K<sub>2</sub>O)的多元回归方程(表4)。两个品种的回归方程回归系数F值(29.87、24.09)均达极显著水平(F<sub>0.01</sub>=14.659),表明水稻产量与氮、磷、钾肥的施用量之间呈极显著的回归关系。模型拟合效果好,可以用来指导同等肥力和生产条件下水稻的氮、磷、钾肥运筹及产量预测。

当边际产量为0时,产量达到最高点,可求出最高产量时的施肥量;当边际产值等于边际成本时,可获得施肥的最大利润,据此可求得经济最佳施肥量。根据“3414田间试验设计与数据分析

表4 两个品种的氮磷钾肥料效应方程

品种	肥料效应方程	F值	R值
龙粳29(常规稻)	$Y=419.0992+25.1984X_1-1.7780X_1^2+20.3711X_2-2.1930X_2^2+17.8098X_3-1.3372X_3^2+1.6033X_1X_2+1.2450X_1X_3-4.0902X_2X_3$	29.87	0.99
龙粳21(超级稻)	$Y=319.1476+35.1325X_1-2.3422X_1^2+17.8064X_2-2.8970X_2^2+24.5811X_3-1.6408X_3^2+2.6033X_1X_2+1.0420X_1X_3-3.5596X_2X_3$	24.09	0.99

管理系统”计算出常规品种龙粳29的最高产量为9 586.5 kg/hm<sup>2</sup>,最大施肥量为:纯N 160.6 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 81.0 kg/667 hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 50.9 kg/hm<sup>2</sup>;超级稻品种龙粳21的最高产量为9 513.0 kg/hm<sup>2</sup>,最大施肥量为纯N: 168.0 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 59.3 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 101.4 kg/hm<sup>2</sup>(表5)。按目前市场价N 3.9元/kg、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 4.4

元/kg、K<sub>2</sub>O 7.0元/kg和水稻2.8元/kg计,确定常规品种龙粳29的最佳施肥量为:N 149.7 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 61.1 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 62.1 kg/hm<sup>2</sup>,最佳经济产量为9 577.5 kg/hm<sup>2</sup>;超级稻品种龙粳21的最佳施肥量为:N 161.9 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 63.5 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 83.6 kg/hm<sup>2</sup>,最佳经济产量为9 489.0 kg/hm<sup>2</sup>。

表5 两个品种的最佳施肥量与最佳经济产量

kg/hm<sup>2</sup>

品种	最高产量施肥量			最高产量	最佳施肥量			最佳经济产量
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	
龙粳29(常规稻)	160.7	81.0	50.9	9 586.5	149.7	61.1	62.1	9 577.5
龙粳21(超级稻)	168.0	59.3	101.4	9 513.0	161.9	63.5	83.6	9 489.0

常规品种龙粳29的回归方程中常数项为419.099 2,与处理1(空白)产量6 259.5 kg/hm<sup>2</sup>非常接近,说明数学模型与实际非常吻合,N、P、K的一次项系数为正值,大小表现为N>P>K,表明对水稻增产效果的影响依次为氮>磷>钾,一次项系数大于二次项和交互项系数,说明主效应很明显;N、P、K的二次项系数皆为负值,表明过量施用氮、磷、钾肥会造成单位施肥量水稻增产效果下降,从而降低肥料的利用率。超级稻品种龙粳21的回归方程中常数项为319.147 6,与处理1(空白)产量4 776.0 kg/hm<sup>2</sup>非常接近,说明数学模型与实际非常吻合,N、P、K的一次项系数为正值,大小表现为N>K>P,表明对水稻增产效果的影响依次为氮>钾>磷,一次项系数大于二次项和交互项系数,说明主效应很明显;N、P、K的二次项系数皆为负值,表明过量施用氮、磷、钾肥会造成单位

施肥量水稻增产效果下降,从而降低肥料的利用率。两个品种的氮、磷交互效应系数为正值,即二者之间存在正交互作用,氮、钾的交互效应也如此,磷、钾交互效应系数为负值,即二者之间存在负交互作用,3个交互效应系数不是很大,说明交互作用较弱。

由表6可知,常规品种龙粳29的氮肥利用率1水平为34.5%、2水平为21.4%、3水平为14.9%;磷肥利用率1水平为5.4%、2水平为3.2%、3水平为1.1%;钾肥的利用率1水平为1.2%、2水平为1.3%、3水平为1.1%。超级稻品种龙粳21的氮肥利用率1水平为50.5%、2水平为31.5%、3水平为21.3%;磷肥利用率1水平为6.2%、2水平为10.5%、3水平为3.7%;钾肥利用率1水平为3.9%、2水平为9.0%、3水平为5.2%。过量施肥造成利用率下降,在生产中,氮肥宜选择2水平用量,磷、

表6 不同处理对两个水稻品种肥料农学利用率的影响

编号	处理水平	龙粳29			肥料农学利用率(%)			龙粳21			肥料农学利用率(%)		
		产量(kg/hm <sup>2</sup> )	缺素相对产量(%)		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	产量(kg/hm <sup>2</sup> )	缺素相对产量(%)		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
1	N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	6 259.5e			-	-	-	4 776.0h			-	-	-
2	N <sub>0</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	6 393.0e	68.44		-	-	-	4 966.5h	53.31		-	-	-
3	N <sub>1</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	8 773.5d			34.5	-	-	8 449.5ef			50.5	-	-
4	N <sub>2</sub> P <sub>0</sub> K <sub>2</sub>	9 118.5abcd	97.62		-	-	-	8 592.0de	92.22		-	-	-
5	N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	9 303.0ab			-	5.4	-	8 808.0cd			-	6.2	-
6	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	9 340.5ab			21.4	3.2	1.3	9 316.5a			31.5	10.5	9.0
7	N <sub>2</sub> P <sub>3</sub> K <sub>2</sub>	9 232.5abc			-	1.1	-	8 974.5bc			-	3.7	-
8	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>0</sub>	9 253.5abc	99.07		-	-	-	8 697.0cde	93.35		-	-	-
9	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	9 294.0ab			-	-	1.2	8 830.5cd			-	-	3.9
10	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>3</sub>	9 367.5a			-	-	1.1	9 231.0ab			-	-	5.2
11	N <sub>3</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	9 487.5a			14.9	-	-	9 381.0a			21.3	-	-
12	N <sub>1</sub> P <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	8 902.5bcd			-	-	-	8 251.5f			-	-	-
13	N <sub>1</sub> P <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	8 844.0cd			-	-	-	7 966.5g			-	-	-
14	N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> K <sub>1</sub>	9 231.0abc			-	-	-	8 683.5cde			-	-	-

钾肥宜选择1水平用量。常规品种龙粳29相对产量为缺氮区68.44%、缺磷区97.62%、缺钾区99.07%；超级稻品种龙粳21相对产量为缺氮区53.31%、缺磷区92.22%、缺钾区93.35%。由此也表明该土壤速效养分含量丰富，磷、钾化肥的利用率不高，主要是维持土壤现有养分的平衡。

### 3 结论与讨论

本试验结果显示，水稻产量与氮、磷、钾肥的施用量之间呈极显著的回归关系，氮素是影响水稻产量的最主要因素。氮、磷、钾三要素对增产效果影响的顺序：超级稻品种龙粳21为氮>钾>磷，常规品种龙粳29为氮>磷>钾，过量施用氮、磷、钾肥会造成单位施肥量水稻增产效果下降，从而降低肥料的利用率。大量研究表明，氮、磷、钾肥的互作对作物产量具有显著影响<sup>[8]</sup>，且氮磷、氮钾和磷钾的互作效应各不相同。本试验中氮、磷和氮、钾二者之间存在正交互作用，磷、钾二者之间存在负交互作用，交互作用较弱。实际上，多种肥料共同施用的情况下，某一肥料养分在土壤中的转化过程往往受其他肥料养分施用的直接或间接影响，并在一定条件下表现为显著的交互作用。这种交互作用不仅影响土壤的化学性质，如pH<sup>[9]</sup>，还会影响肥料养分的生物有效性，以及肥料养分向环境中的迁移<sup>[10]</sup>。肥料氮在土壤中的转化，一定条件下会受磷或钾肥共施的影响。如钾肥可影响土壤中铵的固定<sup>[11]</sup>、释放<sup>[12]</sup>、硝化作用以及氨挥发<sup>[13-14]</sup>，磷肥也会影响某些土壤中铵的固定<sup>[15]</sup>，以及尿素的水解等<sup>[16]</sup>。

本试验结果表明，施氮量增加能提高每平方米穗数和穗粒数，但降低了结实率和千粒重，品种间有差异；增加施磷量有降低每平方米穗数和穗粒数的趋势，对结实率和千粒重影响不大；施钾量对产量各因素影响不规律，有提高每平方米穗数和穗粒数作用。常规品种龙粳29的最佳施肥量为：N 149.7 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 61.1 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 62.1 kg/hm<sup>2</sup>，N：P：K=2.45：1：1.05，最佳经济产量为9 577.5 kg/hm<sup>2</sup>；超级稻品种龙粳21的最佳施肥量为：N 161.9 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 63.5 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 83.6 kg/hm<sup>2</sup>，N：P：K=2.55：1：1.32，最佳经济产量为9 489.0 kg/hm<sup>2</sup>。因黑龙江省水稻种植区域横跨四个积温区，不同积温区间活动积温相差200℃·d，超级稻龙粳21主要种植在第二积温带下限和第三积温带全域，试验所在

地佳木斯市为第二积温带地区，所以在不同地区气候条件及不同土壤推广种植时，该试验建立的优化施肥方案可作为参考，结合不同生产区具体情况加以调整，实现水稻高产与增效。

### 参考文献：

- [1] 彭建伟,刘 强,荣湘民,等.氮磷钾配比及氮用量对水稻光合特性及产量的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2004,30(2):123-127.
- [2] 孙爱华,朱士江,张忠学.不同灌溉模式下氮磷钾配比及追施比例对水稻生长特征及产量的影响[J].灌溉排水学报,2016,35(10):31-35.
- [3] 耿 培,曹国璠,丁 飞.水稻氮磷钾高产施肥模式研究[J].安徽农业科学,2008,36(27):11852-11854.
- [4] 钟胜仁.水稻测土配方施肥“3414”肥效试验研究[J].福建稻麦科技,2011,29(4):43-45.
- [5] 陈宝琢,张艳洁.水稻测土配方施肥3414试验研究[J].安徽农学通报,2010,16(7):107-108.
- [6] 马 巍,齐春艳,刘 亮,等.氮肥减量后移对超级稻吉粳88氮素利用效率及产量的影响[J].东北农业科学,2016,41(1):23-27.
- [7] 杨春刚,王金明,邱志刚,等.氮肥用量和栽插密度对吉粳513产量及品质的影响[J].东北农业科学,2017,42(2):6-9.
- [8] Saito K, Linquist B, Atlin G N, et al. Response of traditional and improved upland rice cultivars to N and P fertilizer in northern Laos[J]. Field Crops Research, 2006, 96: 216-223.
- [9] Wang H Y, Zhou J M, Chen X Q, et al. Interaction of NPK fertilizers during their transformation in soils: I. Dynamic changes of soil pH[J]. Pedosphere, 2003, 13(3): 257-262.
- [10] 马茂桐.钾氮配施对土壤氮钾渗漏损失的影响[J].土壤,1999(3):136-168.
- [11] Drury C F, Beauchamp E G, Evans L J. Fixation and immobilization of recently added <sup>15</sup>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> in selected Ontario and Quebec soils[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1989, 69: 391-400.
- [12] Chen C C, Turner F T, Dixon J B. Ammonium fixation by high-charge smectite in selected Texas Gulf Coast soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53: 1035-1040.
- [13] Heilman P. Effect of added salts on nitrogen release and nitrate levels on forest soils of the Washington coastal area[J]. Soil Science Society of America Journal, 1975, 39: 778-782.
- [14] Christianson C B, Carmona G, Klein M O, et al. Impact on ammonia volatilization losses of mixing KCl of high pH with urea[J]. Fertilizer Research, 1994, 4(2): 89-92.
- [15] Mandal B, Mukhopadhyay A K. Ammonium fixation in soils from application of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-producing fertilizers[J]. Journal of the Indian Society of Soil Science, 1984, 32: 486-487.
- [16] Fan M X, Mackenzie A F. Interaction of urea with triple superphosphate in a simulated fertilizer band[J]. Fertilizer Research, 1993, 36(1): 35-44.

(责任编辑:刘洪霞)