

氮·磷·钾肥对优质稻 T 香优 557 产量·米质及养分吸收利用的影响

徐娅, 李树杏, 涂敏, 黄佑岗, 朱速松* (贵州省农业科学院水稻研究所, 贵州贵阳 550006)

摘要 [目的]科学调整氮、磷、钾肥比例和用量,同步提高水稻产量、品质及肥料利用率,为建立更科学的施肥模型提供基础。[方法]采用“3413”试验设计,研究不同氮、磷、钾施肥处理对 T 香优 557 水稻籽粒产量、品质、养分吸收利用的影响,建立肥料效应方程,并探讨 3 种肥料间的互作效应。[结果]氮、磷、钾肥的施用均能显著提高水稻产量,且 3 种肥料配施的增产效果最优。其对籽粒产量的作用顺序为 N>K>P。 $N_2P_2K_3$ 处理产量最高,为 9 606 kg/hm²。氮、磷、钾肥的施用可以改善部分米质性状,如提高整精米率、胶稠度,降低垩白度。水稻养分总吸收量和每 100 kg 籽粒养分需求量均随氮、磷肥施用显著增加,同时养分干物质生产效率及养分稻谷生产效率则显著下降,且肥料的吸收利用率、农学利用率也随之下降。氮、磷、钾肥两两互作对水稻产量均有极显著影响,对水稻氮、磷、钾养分吸收影响最大的交互作用分别是氮磷、磷钾和氮钾,互作差异达显著水平。利用肥料效应方程,得出该地区获得最高产量的氮、磷(P_2O_5)和钾(K_2O)肥施用量分别为 202.2、70.2 和 337.0 kg/hm²。[结论]肥料对水稻生长的影响是多方面的,肥料用量及配比应在土壤自身养分的基础上全面考虑水稻产量、品质及肥料利用率而确定。

关键词 水稻;“3413”试验;产量;品质;养分吸收利用

中图分类号 S511 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)20-0151-06

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2020.20.041



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effects of N, P, K Fertilizer Application on Grain Yield, Quality, Nutrient Uptake and Utilization of T Xiangyou 557

XU Ya, LI Shu-xing, TU Min et al (Rice Research Institute, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang, Guizhou 550006)

Abstract [Objective] The rate and ratio of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer should be established with an integrated consideration, to improve rice yield, quality and fertilizer utilization concurrently, further, to provide theory foundation for establishment of a more scientific fertilization model and formulation of fertilization. [Method] A field experiment was conducted to reveal the effects of different nitrogen, phosphorus and potassium treatments on T Xiangyou 557 yield, quality, nutrient absorption-utilization by using the “3413” fertilizer experiment design, and fertilizer effect equations were established, furthermore, the interactive effects among N, P, K were elucidated. [Result] The application of NPK significantly increased grain yield, and the effect of combined application of three fertilizers was optimal. The yield-increasing effect followed the order of N>P>K. The highest yield was obtained in $N_2P_2K_3$ treatment, being 9 606 kg/hm². The application of fertilizer also improved rice quality partially. For example, head rice rate, gel consistency was increased, and chalkiness, chalky rice was decreased due to the application of N, P and K. And, the application of N and P fertilizer increased total nutrient accumulation and nutrient absorption per 100 kg seeds, but nutrient dry matter production efficiency and nutrient grain production efficiency was reduced. Meanwhile, fertilizer recovery efficiency, agronomic efficiency always declined with the increasing N and P application rate. Grain yield was significantly influenced by the interaction between N and P, N and K, P and K, respectively. The most significant interactive effect on total N, P_2O_5 and K_2O accumulation was between N and P, P and K, N and K, respectively. According to the fertilizer effect equations, the N, P_2O_5 and K_2O application amount for the highest grain yield were 202.2, 70.2 and 337 kg/hm². [Conclusion] Taken together, the influence of fertilizer on rice growth was various, which means that fertilizers application rate and ratio should be established with an integrated consideration of several factors including grain yield, grain quality and nutrient uptake, utilization efficiency, based on the soil nutrient.

Key words Rice; “3413” experiment; Yield; Quality; Nutrient absorption-utilization

我国是世界水稻生产大国,同时也是稻米消费大国,生活水平的提高和国际贸易往来的加强使我国稻米生产从简单追求高产转向高产优质并重,水稻产量及品质受遗传特性和环境条件的综合影响^[1]。作为众多环境因子中重要的影响因素。氮、磷、钾是水稻生长发育的三大必需营养元素,三者之间存在复杂的交互作用。故而科学调整氮、磷、钾肥比例及用量,可实现水稻产量、品质及肥料利用率的同步提高^[2]。长期以来,前人就水稻氮磷钾肥的配施问题开展了大量研究。其中,氮肥方面开展的研究较为全面深入。Zhou 等^[3]研究证明相比传统施氮方式(TFA),优化施氮方式

(OFA)可以显著提高水稻氮素吸收利用率,同时 ATM 1:1、 NH_4^+ 、GS 等和氮转运相关的因子表达显著上调^[3];从夕汉等^[4]以 4 个不同基因型的水稻品种为材料研究氮肥水平对水稻产量与品质的影响,结果表明合理施用氮肥可以显著增加水稻的有效穗数和每穗粒数,改善稻米籽粒品质,协同实现水稻的高产和优质;魏海燕等^[5]研究了不同氮肥水平下超级粳稻产量与品质的变化,结果表明随氮肥用量增加超级粳稻产量先上升后下降;5 个超级粳稻品种的糙米率、精米率、整精米率及蛋白质含量均随氮肥用量增加而增加,而直链淀粉含量、胶稠度和食味值均下降。有关钾肥水平对水稻的影响也有研究,王强盛等^[6]研究了钾肥用量对 2 个水稻品种产量、品质及钾素积累利用的影响,适量地增施钾肥可以提高产量,改善米质,同时肥料的生理效率和农艺效率也得到提高;杨曾平等^[7]以 14 个晚稻品种为试验对象,研究不同品种在差异钾供应量情况下产量和对钾肥的吸收利用率。磷肥方面的研究则最少,陈世平等^[8]研究发现,随施磷量的增加,水稻产量显著提高,高水稻淀粉、粗蛋白、氨基酸含量也有所增加,并促进了稻谷、秸秆的磷素吸收。目前的研究中关注

基金项目 贵州省科技计划项目“贵州省优质特色水稻研发与转化及园区技术服务能力建设”(黔科合平台人才[2017]5719);贵州省科技计划项目“国审杂交稻全优 785、成优 498 示范与推广”(黔科合成果[2016]4012);贵州省农业科学院种质资源项目“特色稻种资源收集、保存与创制利用”(〔2020〕11)。

作者简介 徐娅(1991—),女,贵州贵阳人,研究实习员,硕士,从事水稻栽培生理学研究。*通信作者,研究员,博士,从事水稻分子生物学和分子育种研究。

收稿日期 2020-04-13;修回日期 2020-05-28

更多的是氮肥效果,而磷、钾肥方面的研究较少。且氮、磷、钾配施对产量、米质和肥料利用率3个方面的综合研究也相对缺乏。“3414”肥料效应田间试验作为获得作物最佳施肥量的有效方式^[9],目前全国关于水稻的“3414”肥料效应田间试验已有很多报道。但由于不同地区的气候类型、土壤类型、水稻品种等因素,得到的水稻最佳施肥量也各有不同。这说明不能套用已有的试验结果,需要依据实际情况开展当地对应的水稻“3414”肥料效应田间试验,所提供的水稻施肥指导更为科学^[10]。笔者以T香优557水稻品种为试验材料,通过比较不同氮、磷、钾肥配施比例及施用量下水稻的产量、米质和肥料利用率的变化,为水稻的优质高效生产提供全面的施肥参考。同时,在不同类型的土壤基础上实施不同水稻品种的肥效试验,发现诸多试验结果的共性,总结规律特征,从而建立更加科学的施肥模型,也为测土配方施肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料 供试材料优质水稻品种T香优557,该品种于2016年通过贵州省农作物品种审定委员会审定(审定编号:黔审号2016009)。系早熟籼型三系杂交稻,全生育期154 d,米质达国标1级;品种由贵州省水稻研究所提供。

1.2 试验地概况 试验于2018年在贵州省水稻研究所试验田进行。土质为壤土,肥力为中等,冬闲田。土壤含全氮2.102 g/kg、速效氮182.021 mg/kg、速效磷26.347 mg/kg、速效钾214.34 mg/kg、有机质33.308 g/kg。

1.3 试验设计 试验采用裂区设计。采用“3414”完全实施肥料试验,氮、磷、钾3个因素,每个因素4个水平,计14个设计方案。4个水平中0水平指不施肥,2水平为当地最佳施肥量的近似值,1水平为当地最佳施肥量的50%,3水平为过量施肥水平即最佳施肥量的1.5倍。14个处理包括:①N0P0K0,②N0P2K2,③N1P2K2,④N2P0K2,⑤N2P1K2,⑥N2P2K2,⑦N2P3K2,⑧N2P2K0,⑨N2P2K1,⑩N₂P₂K₃,⑪N3P2K2,⑫N1P1K2,⑬N1P2K1,⑭N2P1K1。该地区籼稻的最佳施氮量(纯N)为225 kg/hm²,按基肥:蘖肥:穗肥=3.5:2.5:4.0比例施用,其中穗肥分别于倒4叶和倒2叶叶龄期等量施入。磷肥(P₂O₅)施用量150 kg/hm²,全部用作基肥;钾肥(K₂O)施用量225 kg/hm²,分2次即基肥和拔节肥等量施用。每个小区试验面积20 m²,随机区组排列。按照常规栽培技术要求进行田间管理。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 产量。于成熟期定点观察各小区连续20株植株的有效穗数,按平均有效穗数取3株稻穗进行考种,用水漂法测定实粒数、总粒数,计算结实率。将实粒烘干后测千粒重,重复3次。各小区单打单收,将稻谷晒干后称重并测定水分,换算为含水量为13.5%的稻谷产量。收割的同时,小区随机选取6蔸植株,风干后分为稻谷和稻草两部分称重,计算谷草比,以此换算稻草产量。

1.4.2 品质。取阴干并簸干净的稻谷1 kg测定品质。送农业部稻米及制品质量监督检验测试中心(武汉),参照中华人民共和国国家标准《GB/T 17891—2017》测定检验。

1.4.3 植株氮、磷、钾含量。收割前各小区取代表性植株6蔸,分稻谷和稻草两部分分别装入纸袋于烘箱内105℃下杀青30 min后,75℃下烘干至恒重,粉碎后测定其氮、磷、钾含量。经硫酸-高氯酸消煮法消煮后,全氮采用半微量开氏定氮法测定,全磷采用钼锑抗比色法测定,全钾采用火焰光度计法测定。

1.4.4 有关参数的计算。养分总吸收量=稻谷产量×稻谷含养分量+稻草产量×稻草含养分量

$$\text{每 100 kg 籽粒所需养分量} = \frac{\text{养分总吸收量}}{\text{稻谷产量}} \times 100$$

$$\text{养分素干物质生产效率} = \frac{\text{干物质积累量}}{\text{养分总吸收量}}$$

$$\text{养分素稻谷生产效率} = \frac{\text{稻谷产量}}{\text{养分总吸收量}}$$

$$\text{养分素收获指数} = \frac{\text{稻谷养分吸收量}}{\text{养分总吸收量}} \times 100\%$$

$$\text{养分肥吸收利用率} = \frac{\text{施肥区养分总吸收量} - \text{未施肥区养分总吸收量}}{\text{施肥量}} \times 100\%$$

$$\text{养分肥农学利用率} = \frac{\text{施养分区稻谷产量} - \text{未施肥区稻谷产量}}{\text{施肥量}}$$

1.5 数据分析 数据统计分析和作图利用DPS 18.10高级版和Excel 2013进行。

2 结果与分析

2.1 氮、磷、钾肥对T香优557干物质质量的影响 由表1可知,施肥处理稻谷和稻草产量均高于空白区(N0P0K0),收获指数均较对照稍低。在磷、钾施用水平不变的基础上(P2K2),稻谷和稻草产量均随氮肥施用显著提高,且稻谷产量随施氮量增加呈先上升后略微下降的趋势,稻草产量则逐渐上升。在氮、钾施用水平不变的基础上(N2K2),适当施用磷肥能显著提高稻谷产量,且N2P1K2及N2P2K2施磷处理产量显著高于N2P0K2及N2P3K2,其产量也呈先上升后下降的趋势;稻草产量在N2P2K2处理时最高。在氮、磷施用水平不变的基础上(N2P2),稻谷和稻草产量均表现为施钾

表1 氮、磷、钾肥不同用量对T香优557干物质质量的影响

Table 1 Effects of N, P and K application rates on dry matter production of rice

处理 Treatment	稻谷产量 Grain yield kg/hm ²	稻草产量 Straw yield kg/hm ²	总干物质 Total dry matter yield kg/hm ²	收获指数 Harvest index
N0P0K0	7 014	4 223	11 237	62.4
N0P2K2	7 406 b	5 157 c	12 564 c	58.9 a
N1P2K2	9 185 a	6 562 b	15 748 a	58.3 b
N2P2K2	9 236 a	6 807 a	16 043 a	57.6 c
N3P2K2	7 445 b	6 990 a	14 435 b	51.6 d
N2P0K2	8 816 b	5 800 bc	14 616 b	60.3 b
N2P1K2	9 373 a	5 963 b	15 336 b	61.1 a
N2P2K2	9 236 a	6 807 a	16 043 a	57.6 d
N2P3K2	8 330 b	5 664 c	13 995 c	59.5 c
N2P2K0	8 574 b	5 854 b	14 429 b	59.4 c
N2P2K1	9 078 ab	6 027 b	15 105 b	60.1 b
N2P2K2	9 236 a	6 807 a	16 043 a	57.6 d
N2P2K3	9 606 a	6 101 ab	15 707 b	61.2 a

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)

Note: Different lowercases in the same column indicated significant difference between different treatments at 0.05 level

处理显著高于不施钾处理,且稻谷产量随施钾量的增加逐渐增加。施用氮、磷、钾肥获得的稻谷增产量最大值分别为1 830、557 和 1 032 kg/hm²,氮肥是影响稻谷产量形成的主导因子。

氮、磷、钾 3 种肥料配施(N2P2K2)以及其中 2 种肥料配施处理(N2P0K2、N0P2K2、N2P2K0)的稻谷产量均较对照(N0P0K0)显著提高(图 1)。其中,N2P2K2 增产 2 222 kg/hm²,N0P2K2、N2P2K0 和 N2P0K2 分别增产 392、1 560 和 1 802 kg/hm²,其中 N2P2K2 处理显著高于 N0P2K2、N2P0K2、N2P2K0 处理,由此可见,氮、磷、钾肥合理配施才能最大限度提高水稻产量。3 种元素中氮素(N0P2K2)缺乏处理对产量的影响最显著。影响籽粒产量最大的因子为氮肥,其次为钾肥,再次为磷肥。

2.2 肥料效应分析 采用三元二次模型、二元二次模型和一元二次模型拟合不同氮、磷、钾处理的籽粒产量,得到 7 个肥料效应方程。舍弃其中未达显著水平的肥效函数,并对剩下的肥效函数进行典型性判别分析^[11],将通过显著性检验及典型性判别的结果列于表 2。利用剩余的氮磷钾三元模型计算得出最高籽粒产量的氮(N)、磷(P₂O₅)和钾(K₂O)施用量分别为202.2、70.2和337.0kg/hm²。氮(N)、磷(P₂O₅)和钾

(K₂O)按 6、4 和 8 元/kg,稻谷 2.5 元/kg 的价格计算水稻的最佳经济施肥量。当水稻达到最佳经济效益时的氮、磷施用量分别为 90.3、144.1 kg/hm²,不施加钾肥。

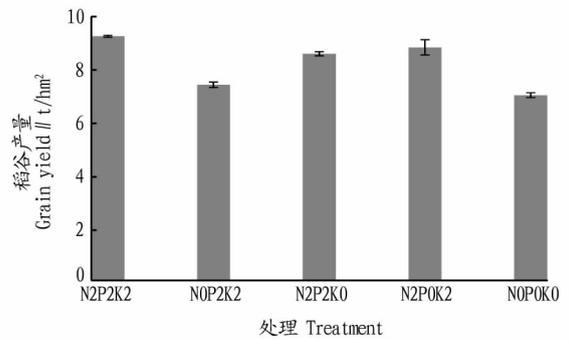


图 1 氮、磷、钾肥配施对 T 香优 557 产量的影响

Fig.1 Effects of application of N,P and K fertilizers on grain yield of rice

2.3 氮、磷、钾肥对 T 香优 557 米质的影响 施肥能明显改善部分米质性状(表 3)。施氮能明显提高稻米胶稠度,与 N0P2K2 相比 N2P2K2 和 N3P2K2 分别提高 32%和 62%。出糙率随施氮量增加而增加,N3P2K2处理的出糙率提高2.1百

表 2 水稻氮、磷、钾肥料效应方程

Table 2 N,P,K fertilizer response equation of rice

肥效模型 Fertilizer effect model	肥料效应方程 Fertilizer response equation	R ² 值 R ² value	养分 Nutrient	最高产量施肥量 Fertilizer application rate for maximum yield//kg/hm ²	最佳经济施肥量 The optimum fertilizer application rate//kg/hm ²
三元二次 Three-factors	$y = 7\ 033.646\ 3 + 16.096\ 5N + 23.259\ 8P + 0.002\ 0K - 0.075\ 1N^2 - 0.074\ 8P^2 - 0.003\ 6K^2 - 0.001\ 0NP + 0.042\ 3NK - 0.037\ 3PK$	0.993**	N P ₂ O ₅ K ₂ O	202.2 70.2 337.5	90.30 144.10 0.00
二元二次 Two-factors	$y = 7\ 056.979\ 1 + 23.578\ 3N + 12.258\ 4P - 0.071\ 6N^2 - 0.061\ 2P^2 - 0.000\ 5NP$	0.908**	N P ₂ O ₅	164.2 99.4	147.51 86.41
	$y = 7\ 148.599\ 4 + 23.391\ 5N + 1.951\ 0K - 0.074\ 0N^2 - 0.001\ 6K^2 + 0.003\ 2NK$	0.855**	N K ₂ O	165.6 337.5	141.81 0.00
一元二次 One-factors	$y = 7\ 352.410\ 1 + 24.458\ 4N - 0.074\ 2N^2$	0.809**	N	150.3	152.70

表 3 氮、磷、钾肥不同用量对 T 香优 557 稻米品质的影响

Table 3 Effects of N,P and K application rates on rice quality of T Xiangyou 557

处理 Treatment	糙米率 Brown rice rate//%	整精米率 Head rice rate//%	垩白粒率 Chalky rice rate//%	垩白度 Chalkiness degree//%	直链淀粉含量 Amylose content//%	胶稠度 Gel consistency mm	碱消值 Alkali spreading value
N0P0K0	80.2	63.8	16	3.8	17.0	43	7.0
N0P2K2	79.7	60.8	18	4.2	17.3	43	7.0
N1P2K2	79.8	59.4	12	3.8	17.1	50	7.0
N2P2K2	80.7	56.6	20	4.2	17.1	57	6.8
N3P2K2	81.8	57.0	25	5.6	17.6	70	7.0
N2P0K2	80.8	57.7	15	3.9	17.2	52	7.0
N2P1K2	79.0	57.9	8	3.0	17.2	55	7.0
N2P2K2	80.7	56.6	20	4.2	17.1	57	6.8
N2P3K2	81.6	58.2	21	4.1	16.2	52	7.0
N2P2K0	77.0	60.5	15	5.4	17.0	62	7.0
N2P2K1	79.7	58.7	20	5.3	16.7	50	7.0
N2P2K2	80.7	56.6	20	4.2	17.1	57	6.8
N ₂ P ₂ K ₃	80.7	60.7	16	3.8	16.3	50	7.0

分点;与此同时整精米率却随施氮量逐步降低,就垩白性状来看,适量氮肥的施用可显著降低垩白粒率、垩白度,而继续施氮(N2P2K2和N3P2K2)则会导致垩白粒率和垩白度重新上升。垩白粒率和垩白度均以N1P2K2最低,分别比N0P2K2低6.0和0.4百分点。磷肥对稻米品质的影响则不如氮肥明显(表3),适度范围内施磷可以起到改善品质的作用,但若继续增加用量则会抑制品质的改善,如胶稠度随着施氮量增加先上升后下降。N2P2K2高于其他3个处理。同时垩白粒率随施磷量增加先下降后上升,N2P2K2显著低于其他3个处理。钾肥对整精米率和垩白度有明显影响,垩白度随施钾量的增加逐渐下降;整精米率则随施钾量的增加先下降后上升,以N2P2K2处理最低,与N2P2K0相比该处理降低3.9百分点。

2.4 氮、磷、钾肥对T香优557养分吸收利用的影响 从表4可以看出,氮总吸收量和每100 kg籽粒需氮量均随施氮量的增加而提高;与之相反,氮素干物质生产效率和氮素稻谷生产效率则随施氮量的增加而降低,氮素收获指数也以

N3P2K2水平最低。由此可见,施氮虽然可促进水稻对氮素的吸收,但随用量持续增加,单位氮素生产干物质及稻谷的能力以及稻谷中氮素所占比例都会下降,即多吸收的氮素更多积累在稻草中^[12]。故而施氮量的增加也导致氮肥吸收利用率和氮肥农学利用率的降低。与氮肥结果相似,磷总吸收量和每100 kg籽粒需磷量均随施磷量增加而提高,磷素干物质生产效率和磷素稻谷生产效率以及磷素收获指数则随施磷量的增加而降低;磷肥吸收利用率随施磷量的增加先上升后下降,以N2P2K2水平最高;磷肥农学利用率随施磷量的增加显著下降(表5)。施钾对钾总吸收量和每100 kg籽粒需钾量的影响不明显,钾素干物质生产效率和钾素稻谷生产效率以及钾素收获指数则随施钾量的增加而有所提高;钾肥的吸收利用率一直处于较低水平,且随施钾量的增加先上升后下降,钾肥农学利用率随施钾量的增加而下降(表6)。由表4~6可知,钾素收获指数明显低于氮素收获指数和磷素收获指数。这是因为水稻吸收的钾主要集中在营养器官(稻草)中^[13]。

表4 氮肥不同用量对T香优557氮素吸收利用的影响

Table 4 Effects of N application rates on N uptake and utilization of T Xiangyou 557

处理 Treatment	N总吸收量 TNA kg/hm ²	每100 kg 籽粒需N量 N absorption of 100 kg seeds//kg	N素干物质 生产效率 NDMPE kg/kg	N素稻谷 生产效率 NGPE kg/kg	N素收 获指数 NHI %	N肥吸收 利用率 NRE %	N肥农学 利用率 NAE kg/kg
N0P2K2	104.5 b	1.4 c	120.2 a	70.9 a	68.5 a	—	—
N1P2K2	143.0 a	1.6 b	110.1 b	64.2 b	64.9 b	34.3 a	15.8 a
N2P2K2	148.3 a	1.6 b	108.2 b	62.3 b	69.2 a	19.5 b	8.1 b
N3P2K2	150.2 a	2.0 a	96.1 c	49.6 c	60.5 c	13.6 c	0.1 c

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercases in the same column indicated significant difference between different treatments at 0.05 level

表5 磷肥不同用量对T香优557磷素吸收利用的影响

Table 5 Effects of P application rates on P uptake and utilization of T Xiangyou 557

处理 Treatment	P ₂ O ₅ 总 吸收量 TPA kg/hm ²	每100 kg籽粒 需P ₂ O ₅ 量 P ₂ O ₅ absorption of 100 kg seeds//kg	P素干物质 生产效率 PDMPE kg/kg	P素稻谷 生产效率 PGPE kg/kg	P素收 获指数 PHI %	P肥吸收 利用率 PRE %	P肥农学 利用率 PAE kg/kg
N2P0K2	22.8 c	0.3 c	641.6 a	387.0 a	82.4 b	—	—
N2P1K2	26.6 c	0.3 c	576.5 b	352.3 b	85.7 a	5.1 c	7.4 a
N2P2K2	66.3 b	0.7 b	242.0 c	139.3 c	32.4 c	29.0 a	2.8 b
N2P3K2	78.3 a	0.9 a	178.7 d	106.3 d	26.1 d	24.7 b	-2.2 c

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercases in the same column indicated significant difference between different treatments at 0.05 level

表6 钾肥不同用量对T香优557钾素吸收利用的影响

Table 6 Effects of K application rates on K uptake and utilization of T Xiangyou 557

处理 Treatment	K ₂ O总 吸收量 TKA kg/hm ²	每100 kg籽粒 需K ₂ O量 K ₂ O absorption of 100 kg seeds//kg	K素干物质 生产效率 KDMPE kg/kg	K素稻谷 生产效率 KGPE kg/kg	K素收 获指数 KHI %	K肥吸收 利用率 KRE %	K肥农学 利用率 KAE kg/kg
N2P2K0	153.5 a	1.8 a	94.0 d	55.8 c	16.8 d	—	—
N2P2K1	153.6 a	1.7 ab	98.4 b	59.1 b	19.4 c	0.0 c	4.5 a
N2P2K2	156.0 a	1.7 ab	102.9 a	59.2 b	20.1 b	1.1 a	2.9 c
N ₂ P ₂ K ₃	155.7 a	1.6 b	100.9 b	61.7 a	20.6 a	0.6 b	3.1 b

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercases in the same column indicated significant difference between different treatments at 0.05 level

2.5 氮、磷、钾肥的交互作用对 T 香优 557 产量、总干物质量及养分吸收量的影响 以二次多项式回归分析“3413”试验的 14 个处理结果,建立 3 种肥料与稻谷产量、稻草产量、总干物质量、氮总吸收量、磷总吸收量及钾总吸收量之间的关系模型,若模型 F 值检验达显著水平,即表明其拟合性较好,也就是说回归理论值与实际值相符。方差分析发现模型拟合性均较好。从表 7 可以看出,除磷对于物质的影响不显著

外,氮、磷、钾及其交互作用对稻谷产量和总干物质量的影响均达极显著水平。对于稻谷产量而言,单因子的影响为 $N>P>K$,双因素互作的影响为 $N\times P>P\times K>N\times K$;对于总干物质量而言,单因子的影响为 $N>K>P$,双因素互作的影响为 $N\times K>N\times P>P\times K$ 。氮及氮磷相互作用对稻草的影响也达显著水平(表 7)。

表 7 氮、磷、钾肥及其交互作用对 T 香优 557 产量、总干物质量及养分吸收量的影响

Table 7 Effect of interactive effects among N,P and K on grain yield,total dry matter yield,TNA,TPA and TKA of T Xiangyou 557

处理 Treatment	稻谷产量 Grain yield	稻草产量 Straw yield	总干物质量 Total dry matter yield	N 总吸收量 TNA	P ₂ O ₅ 总吸 收量 TPA	K ₂ O 总吸 收量 TKA	F _{0.05}	F _{0.01}
N	2 522.53**	16.80**	77.21**	15.09**	0.35	0.72	2.75	4.10
P	1 196.33**	0.61	2.64	0.02	5.31**	4.96**	2.75	4.10
K	17.07**	0.70	5.90**	0.11	0.35	1.46	2.75	4.10
N×P	3 043.88**	1.16	5.01**	0.59	1.39	2.28*	2.03	2.69
N×K	9.65**	2.94**	5.41**	8.24*	0.18	0.64	2.03	2.69
P×K	21.75**	0.54	3.03**	0.44	1.44	3.55**	2.03	2.69

注: * 表示差异显著($P<0.05$); ** 表示差异极显著($P<0.01$)

Note: * indicated significant difference at 0.05 level; ** indicated extremely significant difference at 0.01 level

3 讨论

由土壤养分含量测试结果可知,供试地块氮、钾营养水平偏高(全氮 2.1 g/kg,速效氮 182.0 mg/kg,速效钾 214.3 mg/kg),磷水平中等(有效磷 26.3 mg/kg)。不施肥小区的产量为 7 014 kg/hm²,表明该地块的基础供肥能力属于中等偏高水平。该研究中,随着氮、磷单一养分施用量的增加籽粒产量先升高后下降,这和王伟妮等^[2]的研究结果一致,但施钾使籽粒产量一直增加,并未出现产量随施钾量先上升后下降的现象。其原因可能是试验所设磷推荐用量偏低或是 T 香优 557 水稻品种较耐高钾环境,基于供试地本身钾营养水平高,认为该品种耐钾的可能性更高,尚待进一步验证^[14]。不同氮、磷、钾施用水平显著影响水稻产量,在氮、磷、钾三要素中,氮肥为影响产量的首要因素,施肥效果为氮肥>钾肥>磷肥,这与前人研究结果相同^[15-16]。

该研究发现,氮、磷、钾肥的施用对某些稻米品质也有较大影响。如胶稠度随施氮量增加显著变长,使得稻米蒸煮食味品质显著提高。另外在一定范围内施氮肥可降低垩白粒率及垩白度,而施氮量继续增加时,垩白粒率及垩白度同时上升,从而影响外观品质。该研究中整精米率及出糙率两项加工品质变化趋势相反,黄清龙等^[17]认为糙米率和垩白粒率与垩白度均呈正相关,而整精米率则与垩白粒率及垩白度均呈负相关,这也许能解释出糙率呈上升趋势而整精米率呈下降趋势。同样适量施磷可降低垩白粒率,继续增施则会导致垩白粒率大幅提高,这与王伟妮等^[13]的试验结果一致。施钾则能降低垩白度,且随着施钾量增加逐步下降。该研究条件下各施肥处理间的直链淀粉含量和碱消值均无显著差异,表明该研究条件下直链淀粉含量及碱消值受施肥处理的影响较小。

该研究中,水稻养分积累总量表现为 $K>N>P$,养分收获

指数表现为 $N>P>K$,大部分氮与磷进入了籽粒中,而钾却留在了营养器官中。氮、磷肥施用后,水稻养分总吸收量和每 100 kg 籽粒养分需求量均明显增加,养分收获指数下降,表明高养分水平虽然促进了水稻养分吸收,但高养分水平的养分利用率较低,故而随着施用量持续增加,其利用率逐渐下降。一些学者认为,这主要源于植株的“奢侈”吸收^[18]。该研究结果表明,氮、磷和钾肥料吸收利用率分别为 19.5%、29.0%和 1.1%(以 N2P2K2 处理的结果计算),其中钾肥吸收利用率远低于全国平均水平^[19]。水稻对钾的反应因季节、品种、土壤肥力及气候条件等因素影响而差异很大^[20]。推测原因可能是因为该研究中土壤的供钾水平高于全国平均水平^[21],因而施钾效果不好。另一方面从养分吸收积累到稻谷生产经过一系列复杂的生理、生化过程,也可能是该品种利用体内钾的能力较弱^[22],这也可以解释该研究条件下,每生产 100 kg 籽粒的需钾量对比前人研究稍低(以 N2P2K2 的标准计算)。由于不同处理间氮、磷、钾肥的用量不同且单价不一,使得肥料的总投入差别较大,任何一种肥料施用过多,均会增加肥料成本,从而影响经济效益。该研究中,最高经济效益下建议不施钾肥。

研究表明,氮、磷、钾肥的互作对作物产量具有显著影响^[23-25],且氮磷、氮钾和磷钾的互作效应各不相同。有研究指出氮磷交互作用较大,当其中一种肥料投入较低时,增加另一种肥料的投入能提高作物产量^[26]。这在该研究中也再次得到验证,3 个互作效应中最高的是氮磷互作。

4 结论

氮、磷、钾的施用可以调控水稻品种 T 香优 557 的生长,从而影响产量和品质的形成。其中增施氮、磷、钾肥显著提高总干物质量,对收获指数影响并不显著;对于品质中的胶稠度、垩白粒率、垩白度、出糙率、整精米率都有明显影响。

在氮、磷、钾三要素中,氮肥为影响产量的首要因素,施肥效果为氮肥>钾肥>磷肥。该研究中,施肥同样影响该品种对养分的吸收及分配,随施肥量增加,氮、磷肥的吸收利用率、农学利用率均呈下降趋势,由于土壤养分充足,钾肥的吸收利用率也一直在极低水平。说明肥料施用越多损失越多,合理施肥是提高肥料利用率的主要措施。氮、磷、钾肥的互作对水稻产量具有显著影响,其中氮磷交互作用最大。该研究为水稻的优质高效生产提供全面的施肥参考。

参考文献

- [1] 马玉银,王如平,左示敏,等.环境因子对稻米品质性状的影响[J].安徽农业科学,2008,36(19):8032-8034.
- [2] 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.
- [3] ZHOU W, YANG Z P, WANG T, et al. Environmental compensation effect and synergistic mechanism of optimized nitrogen management increasing nitrogen use efficiency in indica hybrid rice[J]. Frontiers in plant science, 2019, 10: 1-12.
- [4] 从夕汉,施伏芝,阮新民,等.氮肥水平对不同基因型水稻氮素利用率、产量和品质的影响[J].应用生态学报,2017,28(4):1219-1226.
- [5] 魏海燕,王亚江,孟天瑶,等.机插超级粳稻产量、品质及氮肥利用率对氮肥的响应[J].应用生态学报,2014,25(2):488-496.
- [6] 王强盛,甄宏宏,丁艳锋,等.钾肥用量对优质粳稻钾素积累利用及稻米品质的影响[J].中国农业科学,2004,37(10):1444-1450.
- [7] 杨曾平,聂军,廖育林,等.钾对不同晚稻品种产量及钾素吸收利用的影响[J].中国农学通报,2017,33(2):7-15.
- [8] 陈世平,陈金团.不同施磷量对水稻产量、品质及磷肥利用率的影响[J].安徽农学通报,2019,25(13):57-58,109.
- [9] 廖佳丽.测土配方施肥水稻3414肥料效应的研究[J].中国农学通报,2010,26(13):213-218.
- [10] 吴寿华,范晓晖,吴国灿,等.福建省福安市水稻“3414”肥料效应试验[J].湖南农业科学,2019(8):42-45.
- [11] 丁玉萍.水稻“3414”肥效试验[J].福建农业科技,2017(5):1-3.
- [12] 邹应斌,敖和军,夏冰,等.不同氮肥施用对杂交稻产量及其氮素利用效率的影响[J].作物研究,2008,22(4):214-219.
- [13] 王伟妮,李小坤,鲁剑巍,等.氮磷钾配合施用对水稻养分吸收、积累与分配的影响[J].华中农业大学学报,2010,29(6):710-714.
- [14] 董作珍,吴良欢,柴婕,等.不同氮磷钾处理对中浙优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.
- [15] 胡春花,谢良商,符传良,等.不同施肥水平对超级稻产量和肥料利用率的影响[J].中国农学通报,2012,28(24):106-110.
- [16] 卜容燕,李小坤,鲁剑巍,等.中稻氮磷钾肥的施肥效果及推荐用量[J].中国农学通报,2010,26(14):218-221.
- [17] 黄清龙,马均,蔡光泽.粳、粳稻米垩白与品质的相关性研究进展[J].中国农学通报,2006,22(1):81-84.
- [18] 叶家宝,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.
- [19] 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.
- [20] 王伟妮,鲁剑巍,鲁明星,等.湖北省早、中、晚稻施钾增产效应及钾肥利用率研究[J].植物营养与肥料学报,2011,17(5):1058-1065.
- [21] 周健民.土壤钾素动态与钾肥管理[M].南京:河海大学出版社,2008:37-43.
- [22] 刘建祥,杨尚娥.水稻钾营养基因型差异与生产的关系[J].植物生理学通讯,2000,36(4):384-389.
- [23] 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, 2005, 96(2):216-223.
- [24] 陈学贞,罗运选,刘国华.氮磷钾及其交互作用对移栽棉花产量的影响[J].棉花学报,1988,1(1):55-64.
- [25] TAN P S, AHN T N, VAN LUAT N, et al. Yield trends of a long-term NPK experiment for intensive rice monoculture in the Mekong River Delta of Viet Nam [J]. Field Crops Res, 1995, 42(2/3):101-109.
- [26] 王峰,王顺霞,王占军,等.不同施肥水平与组合对玉米生产性能的影响研究[J].干旱区资源与环境,2005,19(4):167-171.
- [3] 袁志平.迎接竹柳造纸的新时代[J].天津造纸,2015,37(4):8-10.
- [4] 郭泰.竹柳化学组分分析及制浆性能的研究[D].济南:齐鲁工业大学,2016.
- [5] 董葛平,邓玉和,王新洲,等.竹柳材性及其刨花板制造工艺研究[J].西南林业大学学报,2013,33(3):92-96.
- [6] 吴金斌,邓玉和,侯天宇,等.竹柳枝丫材性能及重组木制造[J].浙江农林大学学报,2014,31(6):947-953.
- [7] 何爽爽,王新洲,邓玉和,等.竹柳枝丫材与小径材中密度纤维板的研究[J].林产工业,2015,42(11):31-35.
- [8] 孔红岭.杨树无性品种速生机理及早期选择的研究[D].泰安:山东农业大学,2008.
- [9] 吴小龙.南酸枣生长进程研究[J].江苏林业科技,2003,30(6):6-8,19.
- [10] 范辉华.杉木、拟赤杨混交对杉木持续生长的影响[J].林业科学研究,2001,14(4):455-458.
- [11] 苏雪辉,赵自成.杨树新无性系造林生长节律观测初报[J].江苏林业科技,2003,30(4):10-12.
- [12] 尹建道,吴春森,李庆臣,等.农户型窄冠黑杨、窄冠黑白杨新品种引种试验[J].东北林业大学学报,2007,35(11):7-8.
- [13] 刘振廷,郭延凯,王书军,等.窄冠白杨株行距配置对间作小麦产量的影响[J].河北林业科技,2000(1):8-10.
- [14] 卢胜西,刘国兴,朱西存,等.窄冠白杨间作效益的研究[J].山东林业科技,1995(5):32-36.
- [15] JACOB H B. Breeding experiments of apple varieties with columnar growth and low chilling requirements [J]. Acta horticulturae, 2010, 872: 159-164.
- [16] 庞金宣,张友朋,李际红,等.窄冠黑杨窄冠黑白杨的选育(I)田间试验及结果分析[J].山东林业科技,2003(5):1-7.
- [17] STEEVES T A, SUSSEX I M. Patterns in plant development [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1989: 124-146.
- [18] SHIMIZU-SATO S, MORI H. Control of outgrowth and dormancy in axillary buds [J]. Plant Physiol, 2001, 127(4): 1405-1413.
- [19] BEVERIDGE C A, WELLER J L, SINGER S R, et al. Axillary meristem development. Budding relationships between networks controlling flowering, branching, and photoperiod responsiveness [J]. Plant Physiol, 2003, 131(3): 927-934.
- [20] TAKEDA T, SUWA Y, SUZUKI M, et al. The *OstB1* gene negatively regulates lateral branching in rice [J]. Plant journal, 2003, 33(3): 513-520.
- [21] HUBBARD L, MCSTEEN P, DOEBLEY J, et al. Expression patterns and mutant phenotype of teosinte branched1 correlate with growth suppression in maize and teosinte [J]. Genetics, 2002, 162: 1927-1935.
- [22] 蔡铁,徐海成,尹燕祥,等.外源 IAA、GA₃ 和 ABA 影响不同穗型小麦分蘖发生的机制[J].作物学报,2013,39(10):1835-1842.
- [23] 郝琳.独角金内脂在缺磷条件下影响菊花侧枝伸长的研究[D].北京:中国农业大学,2015.
- [24] 赵亚波,卜贤盼,李培刚,等. *OsPIN1a* 基因在水稻植株不同组织表达与定位研究[J].生物技术,2014,24(1):27-32.
- [25] LI X Y, QIAN Q, FU Z M, et al. Control of tillering in rice [J]. Nature, 2003, 422: 618-621.
- [26] ZHAO H, HUAI Z X, XIAO Y J, et al. Natural variation and genetic analysis of the tiller angle gene *MtTAC1* in *Miscanthus sinesis* [J]. Planta, 2014, 240: 161-175.
- [27] KU L X, WEI X M, ZHANG S F, et al. Cloning and characterization of a putative TAC1 ortholog associated with leaf angle in maize (*Zea mays* L.) [J]. PLoS One, 2011, 6(6): 1-7.
- [28] MORIYA S, OKADA K, HAJI T, et al. Fine mapping of *Co*, a gene controlling columnar growth habit located on apple (*Malus × domestica* Borkh.) linkage group 10 [J]. Plant breeding, 2012, 131(5): 641-647.

(上接第126页)