

.fbid]

不同氮磷钾肥运筹对水稻产量和肥料利用率的影响

黄璐璐¹, 王站付¹, 金海洋^{1*}, 徐春花¹, 徐培培², 郭栋², 张栋杰², 邓仕俊³ (1. 上海农业技术推广服务中心, 上海 201103; 2. 上海市崇明区农业技术推广服务中心, 上海 202150; 3. 上海市崇明区陈家镇农业综合技术推广服务中心, 上海 202150)

摘要 为研究不同氮磷钾肥运筹对水稻产量及肥料利用效率的影响, 选用“南粳46”进行了常规施肥、常规缺氮、缺磷、缺钾以及不同氮磷钾肥梯度处理试验。结果表明, 当施氮量为 300 kg/hm² 时, 产量仅比施氮肥 225 kg/hm² 提高 2.43% ($P>0.05$), 但氮肥利用率与农学效率减少了 21.9% ($P<0.05$)、27.57% ($P<0.01$), 当施磷量与施钾量为 60 kg/hm² 时, 产量仅比施磷、钾量为 30 kg/hm² 时分别提高了 2.54% ($P>0.05$)、3.15% ($P>0.05$), 但磷、钾肥利用率降低了 10.21% ($P>0.05$)、23.76% ($P<0.01$), 农学效率降低了 96.06% ($P<0.01$)、21.03% ($P>0.05$)。因此, 综合考虑水稻产量与肥料利用效率, 建议氮肥施用量为 225 kg/hm², 磷钾肥施用量均为 30 kg/hm² 为宜。

关键词 水稻; 氮磷钾肥; 产量; 肥料利用率

中图分类号 S511 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)04-0155-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.04.043

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Different Nitrogen, Phosphorus and Potassium Fertilizers on Rice Yield and Fertilizer Utilization Efficiency

HUANG Lu-lu, WANG Zhan-fu, JIN Hai-yang et al (Extension Service Center of Agricultural Technology of Shanghai, Shanghai 201103)

Abstract In order to study the effects of different nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on rice yield and fertilizer utilization efficiency, Nanjing 46 was selected for conventional fertilization, conventional nitrogen, phosphorus and potassium deficiency and gradient treatment of different nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers. Results showed that when N application rate was 300 kg/hm², the yield was only increased by 2.43% ($P<0.05$) compared with N application rate of 225 kg/hm², but N use efficiency and agronomic efficiency was reduced by 21.9% ($P<0.05$) and 27.57% ($P<0.01$). When P and K application levels were 60 kg/hm², the yield was increased by 2.54% ($P>0.05$) and 3.15% ($P>0.05$), respectively, compared with P and K application levels of 30 kg/hm², but the utilization rate of P and K was decreased by 10.21% ($P>0.05$) and 23.76% ($P<0.01$), and the agronomic efficiency was decreased by 96.06% ($P<0.01$) and 21.03% ($P>0.05$). Therefore, considering the rice yield and fertilizer use efficiency, it was recommended to apply nitrogen fertilizer of 225 kg/hm² and phosphorus and potassium fertilizer of 30 kg/hm².

Key words Rice; N, P, K fertilizers; Yield; Fertilizer use efficiency

化肥是当今粮食生产中最主要的投入物质, 粮食的生产越来越依靠化肥的作用^[1]。目前化肥过量施用的现象普遍, 为片面追求作物产量而过度施用化肥容易导致氮磷流失, 地表水体富营养化, 并使得肥料当季利用率降低, 不利于生态环境保护和农业可持续发展^[2], 影响作物产量及品质安全。

氮、磷、钾是化肥中用量最大的三大养分, 在水稻生产中起重要作用, 三者间的交互作用直接影响作物的生长发育^[3-4]。研究表明, 合理配施氮磷钾肥可以提高肥料利用率和作物产量^[5]。笔者以“南粳46”为材料, 通过不同氮磷钾肥的梯度试验, 研究其对水稻植株性状、产量、养分吸收量以及肥料利用率的影响, 为科学合理地施用氮磷钾肥、提高氮磷钾肥当季利用率、减少农业面源污染、提高水稻产量提供一定的理论和实践依据。

1 材料与方

1.1 试验材料 试验品种为“南粳46”。供试肥料: 复混肥料含 N、P₂O₅、K₂O 均为 15%, 尿素含 N 46%, 碳铵含 N 17%, 过磷酸钙含 P₂O₅ 12%, 氯化钾含 K₂O 60%。

1.2 试验地概况 试验于 2019 年 5—12 月在上

海市崇明区陈家镇陈西村进行。供试土壤为水稻土, 试验前耕层 0~20 cm 试验地土壤 pH 为 7.79, 养分含量分别为水解性氮 163 mg/kg, 有效磷 76.8 mg/kg, 速效钾 127 mg/kg, 有机质 22.7 g/kg。

1.3 试验设计 设 14 个处理, 3 次重复(表 1)。小区随机区组排列, 小区面积 71 m²。14 个处理分别为 T1: 常规施肥区; T2: 常规施肥缺氮区; T3: 常规施肥缺磷区; T4: 常规施肥缺钾区; T5~T8: 常规施肥氮肥梯度区, 氮肥施用量分别为 150、225、300、375 kg/hm²; T9~T11: 常规施肥磷肥梯度区, 磷肥施用量分别为 30、60、120 kg/hm²; T12~T14: 常规施肥钾肥梯度区, 钾肥施用量分别为 30、60、120 kg/hm²。除肥料处理不同外, 其他田间栽培管理措施同常规。

1.4 样品采集与检测方法

1.4.1 土壤理化性质测定方法。 试验实施前采集 0~20 cm 基础土样, 测定基本理化性状。在施肥之前采集苗床和试验大田土壤样品, 以“S”型的布点方式, 用不锈钢取土器采集耕作层深度 10~20 cm 的土壤 15 点, 混合后去除小石块、植物残根残枝等杂物。自然风干后, 采用四分法留取 1.5 kg 备用待测。参照《土壤农化分析》^[6] 进行土壤指标测定: 土壤 pH 用 pH 计法测定, 有机质用油浴加热-重铬酸钾容量法测定, 全氮用凯氏定氮法测定, 有效磷用钼锑抗比色法测定, 速效钾用乙酸铵浸提-火焰光度法测定, 碱解氮用碱解扩散法测定, 亚硝酸盐用紫外分光光度法测定。

基金项目 上海市市级农口系统青年人才成长计划(沪农青字[2018]第 4-4 号)。

作者简介 黄璐璐(1994—), 女, 浙江温州人, 助理农艺师, 从事土壤肥料与植物营养研究。* 通信作者, 高级农艺师, 从事土壤肥料与植物营养研究。

收稿日期 2020-06-22

1.4.2 田间考察和测产方法。植株考苗:于分蘖盛期和成熟期进行各小区植株生长性状考察记录,其中在分蘖盛期测定植株叶面叶绿素 SPAD 值(5 株/小区)。分蘖盛期(6 月底至 7 月初)每小区采集代表性的 3 穴,考察株高(cm)、单株分蘖

数(个/株)。株高用钢卷尺测量,为植株从露出土壤根部至顶端的距离。叶绿素用 SPAD-502plus 叶绿素仪测量水稻剑叶的叶尖、中部和基部的 SPAD 值,取其平均数作为叶片的 SPAD 值。

表 1 不同处理肥料运筹情况
Table 1 Fertilizer treatment design scheme

编号 No.	处理 Treatment	基肥 Base fertilizer				分蘖肥 Tillering fertilizer			孕穗肥 Booting fertilizer			总用量 Total		
		复混肥	过磷酸钙	氯化钾	碳酸氢铵	尿素	尿素	复合肥	复合肥	尿素	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
T1	常规	45	—	—	420.0	150.0	180	127.5	225	105.0	331.13	59.63	59.63	
T2	缺氮	—	502.5	100.5	—	—	—	—	—	—	0.00	60.30	60.30	
T3	缺磷	—	—	100.5	510.0	94.5	255	—	—	180.0	330.27	0.00	60.30	
T4	缺钾	—	502.5	—	510.0	94.5	255	—	—	180.0	330.27	60.30	0.00	
T5	氮肥 150 kg/hm ²	165	—	—	67.5	60.0	75	97.5	135	37.5	150.45	59.63	59.63	
T6	氮肥 225 kg/hm ²	98	—	—	202.5	105.0	120	105.0	195	60.0	225.15	59.63	59.63	
T7	氮肥 300 kg/hm ²	60	—	—	352.5	150.0	150	120.0	225	90.0	300.08	60.75	60.75	
T8	氮肥 375 kg/hm ²	15	—	—	510.0	180.0	195	135.0	255	120.0	375.15	60.75	60.75	
T9	磷肥 30 kg/hm ²	—	—	49.5	585.0	150.0	180	82.5	120	105.0	329.93	30.38	60.08	
T10	磷肥 60 kg/hm ²	45	—	—	420.0	150.0	180	127.5	225	105.0	331.13	59.63	59.63	
T11	磷肥 120 kg/hm ²	45	502.5	—	420.0	150.0	180	127.5	225	105.0	331.13	119.93	59.63	
T12	钾肥 30 kg/hm ²	—	247.5	—	585.0	150.0	180	82.5	120	105.0	329.93	60.08	30.38	
T13	钾肥 60 kg/hm ²	45	—	—	420.0	150.0	180	127.5	225	105.0	331.13	59.63	59.63	
T14	钾肥 120 kg/hm ²	45	—	100.5	420.0	150.0	180	127.5	225	105.0	331.13	59.63	119.93	

测产:小区单收,考种并测产。成熟期采集有代表性的 5 穴测量株高(cm)、穗长(cm)、有效穗(个/穴、折万/hm²)、成穗率(%)、总粒数(粒/穴、折万粒/hm²)、实粒数(粒/穴、折万粒/hm²)、结实率(%)、千粒重(g)。有效穗数:除每穗结实不满 5 粒不计以外,凡抽穗结实的均为有效穗,以“万穗/hm²”表示;每小区取代表性的 5 株数每穗实粒数,每穗实粒数:包括每穗上的实粒和已脱落的总数,以“粒/穗”表示。千粒重:以晒干扬净(粳谷标准含水率 14.5%)为标准,混匀取样,任取 1 000 粒称重,以 2 次重量相差不大于 3% 为准,计千粒重,以“g”表示。

1.4.3 植株和籽粒养分含量的测定方法。在分蘖期及成熟期分别取 5 株长势均匀一致的植株,分蘖期为地上植株,成熟期为植株和籽粒两部分,105 ℃ 迅速杀青 30 min,然后在 75 ℃ 下烘干至恒重,测定全氮、全磷、全钾含量。全氮用自动定氮仪法^[7]测定,全磷用钼锑抗比色法^[8]测定,全钾用火焰光度计法^[9]测定。

氮(磷、钾)吸收量(kg/hm²)=[籽粒产量×籽粒(磷、钾)含量+秸秆产量×秸秆(磷、钾)含量]/100。

化肥氮肥利用率=(施氮区地上部氮素吸收量-缺氮区地上部氮素吸收量)/施氮量×100%,化学磷肥、钾肥利用率计算同此方法。

氮肥农学效率(kg/kg)=(施氮区籽粒产量-缺氮区籽粒产量)/施氮量,磷、钾肥农学效率计算同此方法。

1.5 数据处理 数据分析采用 Excel 2007,方差分析采用 DPS V7.05,多重比较采用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 不同处理对水稻植株性状的影响 各处理中缺氮处理

(T2)生长期的各植株性状均差于其他处理,差异极显著,表明氮肥是影响植株生长的重要因素(表 2)。缺磷处理(T3)分蘖期的株高与叶绿素值均显著低于常规处理,其余植株性状无显著差异。缺钾处理(T4)除成熟期的穗长与常规处理(T1)无显著差异外,其他植株性状均显著高于常规处理,表明磷肥在水稻生长初期能促进水稻生长,在生长后期对水稻植株影响不大,钾肥的缺失对水稻整个生长周期均有一定影响,相对于磷肥对植株的生长作用更大。氮肥梯度区(T5~T8)分蘖期的株高、叶绿素以及成熟期的株高、穗长均随着氮肥的增加而增加,其中在最高施氮量 375 kg/hm² 时分蘖期的株高、叶绿素以及成熟期的株高极显著高于前 3 个梯度处理。水稻植株的分蘖数氮肥梯度处理(T8)显著低于氮肥梯度处理(T7),表明过量施用氮肥会在一定程度上影响植株分蘖。水稻分蘖期的株高、叶绿素以及成熟期的穗长在施磷量达 120 kg/hm² 时,相比前一个梯度有所降低,表明过量施用磷肥不利于植株生长。磷肥梯度区(T9~T11)的分蘖数、叶绿素均随着磷肥的增施而呈增长趋势,但差异不显著,表明磷肥在一定程度上能促进植株分蘖与叶绿素合成,但作用较小。钾肥梯度区(T12~T14)的分蘖数以及分蘖期与成熟期的株高均随着钾肥的增施而下降,钾肥梯度处理(T12)的分蘖数与成熟期的株高显著高于后 2 个处理,表明过量施用钾肥会明显抑制植株生长,使植株相关性状明显减弱。

2.2 不同处理对水稻产量的影响 缺氮处理(T2)的有效穗、实粒数、千粒重最小,其中实粒数极显著低其他处理(表 3),表明氮肥是影响水稻产量构成的重要因素。缺磷处理(T3)与缺钾处理(T4)的实粒数极显著低于常规处理(T1),缺钾处理的有效穗显著低于常规处理,表明在不施磷肥或钾

肥的情况下均会显著影响水稻产量相关构成。氮肥梯度区的有效穗总体呈上升趋势,实粒数随着氮肥的增施逐级升高,最大施氮量处理(T8)极显著高于最低施氮量(T5),千粒重呈先增后降趋势,施氮处理(T8)相比前一梯度有所降低,梯度处理间无显著差异。在磷肥梯度区(T9~T11),水稻植

株的有效穗、实粒数、千粒重均呈同样趋势,梯度处理间无显著差异。钾肥梯度区(T12~T14)的有效穗整体呈上升趋势,实粒数与千粒重均在过量施用钾肥时有所下降,表明过量施用氮磷钾肥均会一定程度上抑制水稻的相关产量构成,从而影响整体产量。

表 2 不同处理下不同生育期水稻生长情况

Table 2 Growth of rice at different growth stages under different treatments

编号 No.	处理 Treatment	分蘖期 Tillering stage			成熟期 Maturity stage	
		分蘖数 Tiller number//万/hm ²	株高 Plant height//cm	叶绿素(SPAD) Chlorophyll	株高 Plant height//cm	穗长 Ear length//cm
T1	常规	284.00±14.57 aA	84.80±1.10 abA	46.63±0.99 aA	101.67±1.53 abA	15.13±0.42 abAB
T2	缺氮	93.50±13.61 iG	64.70±1.11 hG	29.27±1.07 gF	83.67±2.08 fD	13.33±0.58 eC
T3	缺磷	281.50±9.99 abAB	82.06±1.36 dBC	42.28±1.20 deD	101.67±1.53 abA	14.60±0.17 abcdABC
T4	缺钾	200.00±19.58 gE	80.36±1.36 eCD	43.03±1.06 cdCD	93.33±3.06 deC	14.40±0.36 bcdABC
T5	氮肥 150 kg/hm ²	143.50±24.02 hF	72.03±1.00 gF	37.80±1.18 fE	92.33±2.52 eC	14.17±0.76 cdeABC
T6	氮肥 225 kg/hm ²	224.00±15.10 efgDE	72.43±0.85 gF	39.17±0.83 fE	95.00±2.00 cdBC	14.43±0.40 bcdABC
T7	氮肥 300 kg/hm ²	253.00±15.76 dABCD	74.63±0.50 fD	44.27±1.16 bc	97.00±2.65 cB	14.60±0.36 abcdABC
T8	氮肥 375 kg/hm ²	223.00±17.06 fgDE	83.06±0.51 cdAB	46.17±1.00 aAB	100.67±3.06 abA	14.23±1.04 bcdABC
T9	磷肥 30 kg/hm ²	247.50±10.50 defCD	84.13±0.87 abcAB	42.57±0.57 cdD	100.33±1.53 bA	15.27±0.25 abAB
T10	磷肥 60 kg/hm ²	254.00±9.17 cdABCD	85.03±1.01 aA	42.93±0.81 dD	100.00±2.00 bA	15.40±0.17 aA
T11	磷肥 120 kg/hm ²	258.00±9.12 bcdABC	83.40±0.62 bcdAB	43.93±1.11 bcdBCD	100.00±3.00 bA	14.83±0.29 abcdAB
T12	钾肥 30 kg/hm ²	278.50±7.55 abcABC	84.93±0.76 abA	44.30±0.85 bcABCD	102.67±2.52 aA	14.00±1.00 de BC
T13	钾肥 60 kg/hm ²	248.50±14.80 deBCD	84.16±1.00 abcAB	45.10±1.47 abABC	100.33±1.53 bA	15.00±0.50 abcAB
T14	钾肥 120 kg/hm ²	221.00±13.86 gDE	79.93±0.67 eD	44.17±1.05 bcBCD	100.00±2.00 bA	14.93±0.90 abcdAB

注:同列数据后不同小写字母表示差异达 0.05 显著水平;同列数据后不同大写字母表示差异达 0.01 显著水平

Note: Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different at 0.05 level; values followed by different capital letters in the same column are significantly different at 0.01 level

水稻的产量在各处理间的变化同上述情况相似。缺氮处理的产量极显著低于其他处理,缺磷与缺钾处理的产量显著低于常规处理,表明氮磷钾肥对水稻增产均有显著作用,其中氮肥是影响产量的主要因素。在氮肥与钾肥梯度区间,最后一个梯度处理的产量显著低于前一个处理,氮肥前 3 个梯度处理呈上升趋势,其中最低施氮量梯度处理 T5 的产量

显著低于其他 3 个处理,处理 T6、T7 间无显著差异,钾肥梯度前 2 个处理呈上升趋势,差异不显著。磷肥梯度区的产量随着磷肥的增施而增加,处理 T10 与处理 T9 间增产不明显,梯度处理间无显著差异。表明在一定范围内增施氮磷钾肥能达到增产效果,但过量施用均会导致减产或增产效果减弱。

表 3 不同处理对水稻产量的影响

Table 3 Effects of fertilizer reduction on rice yield

编号 No.	处理 Treatment	有效穗 Effective ear//万/hm ²	实粒数 Actual grain number//粒/穗	千粒重 1 000-grain weight//g	产量 Yield//kg/hm ²
T1	常规	257.00±6.00 aA	113.11±10.30 abcAB	31.24±2.79 aA	7 925.94±98.52 abAB
T2	缺氮	125.33±17.79 gE	81.00±1.73 gE	26.24±1.85 bB	3 523.14±348.01 fF
T3	缺磷	244.33±30.62 abAB	97.22±1.39 fD	30.61±2.61 aAB	7 484.51±225.55 cdBCD
T4	缺钾	221.00±20.88 bcdeABC	99.56±2.83 ef CD	30.34±2.60 aAB	7 426.47±207.27 dCD
T5	氮肥 150 kg/hm ²	159.00±10.39 fgDE	101.00±4.84 defCD	31.23±1.24 aA	6 841.62±257.48 eE
T6	氮肥 225 kg/hm ²	189.67±11.02 defCD	104.89±3.36 cdef BCD	31.64±2.38 aA	7 671.70±192.39 bcdABCD
T7	氮肥 300 kg/hm	183.00±19.29 efCD	108.59±2.34 abcdABCD	32.05±2.07 aA	7 858.29±169.70 abABC
T8	氮肥 375 kg/hm ²	230.33±37.75 abcABC	113.89±5.33 abAB	31.78±1.10 aA	7 376.93±131.47 dD
T9	磷肥 30 kg/hm ²	205.00±10.58 cdeBCD	110.11±7.63 abcABC	30.73±1.75 aAB	7 899.55±52.59 abAB
T10	磷肥 60 kg/hm ²	216.33±32.15 bcdeABC	114.78±3.75 abAB	29.68±1.30 abAB	8 100.14±233.19 aA
T11	磷肥 120 kg/hm ²	209.67±17.01 bcdeABC	113.67±3.85 abcAB	29.49±1.25 abAB	8 143.17±206.44 aA
T12	钾肥 30 kg/hm ²	211.00±5.29 bcdeABC	106.22±6.84 bcdeABCD	30.18±2.54 aAB	7 823.40±416.11 abcABCD
T13	钾肥 60 kg/hm ²	209.67±13.32 bcdeABC	117.22±5.10 aA	29.47±2.97 abAB	8 069.50±456.35 aA
T14	钾肥 120 kg/hm ²	237.67±25.79 abcAB	114.11±4.73 abAB	29.54±2.39 abAB	7 714.94±303.83 bcdABCD

注:同列数据后不同小写字母表示差异达 0.05 显著水平;同列数据后不同大写字母表示差异达 0.01 显著水平

Note: Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different at 0.05 level; values followed by different capital letters in the same column are significantly different at 0.01 level

2.3 不同处理对水稻养分吸收量的影响 缺氮处理(T2)的

水稻氮磷钾吸收量均极显著低于各施肥处理(表 4),缺磷处

理(T3)与缺钾处理(T4)的吸氮量与常规施肥处理无显著差异,表明氮肥主要影响植株对氮磷钾的吸收,磷钾肥对促进植株对氮素的吸收作用不大。缺磷处理(T3)的吸磷量显著低于常规处理(T1),缺磷处理(T3)与缺钾处理(T4)的吸钾量显著低于常规处理(T1)。表明在施用氮肥的情况下,单施钾肥影响植株磷素积累,单施磷肥或钾肥均不利于钾素的积累,磷钾肥在植株钾素的积累上存在交互作用。植株的吸氮量在磷肥梯度区(T9~T11)逐级升高,在氮肥梯度区(T5~T8)与钾肥梯度区(T12~T14)氮的养分积累均呈先增后降的趋势,处理T5~T7与处理T12~T13逐级增加,当施氮量与施钾量分别达到处理T8与T14水平时,氮素的吸收量有所下

降,但差异不显著,表明过量施用氮肥与钾肥会抑制氮的吸收积累。植株的磷素积累量在氮磷钾梯度区均随着肥料的增施而增加,其中在磷肥梯度区(T9~T11),最高施磷量处理(T11)的吸磷量极显著高于最低施磷量处理(T9),表明增施氮磷钾肥均能在一定程度上增加植株磷素的积累,增施磷肥能显著提高植株吸磷量。在氮肥梯度区(T5~T8)植株的吸钾量整体呈先增后降趋势,在磷肥梯度区(T11~T13)呈上升趋势,区间处理均无显著差异,在钾肥梯度区(T12~T14)处理T14显著低于处理T13,表明过量施用氮肥与钾肥在一定程度上会影响植株的吸钾量,其中过量施用钾肥会明显抑制植株对钾素的吸收积累。

表4 不同处理对水稻养分吸收量的影响

Table 4 Effects of different treatments on nutrients uptake of rice

kg/hm²

编号 No.	处理 Treatment	吸氮量 N uptake	吸磷量 P ₂ O ₅ uptake	吸钾量 K ₂ O uptake
T1	常规	154.15±10.61 abcABC	88.58±1.14 abcAB	290.79±17.05 abcABC
T2	缺氮	54.38±4.62 fE	42.06±6.91 eD	107.66±12.27 gF
T3	缺磷	146.09±1.35 bcdABC	77.03±1.43 dC	258.74±13.11 deCDE
T4	缺钾	156.88±13.60 abcABC	87.72±4.85 bcABC	227.50±12.08 fE
T5	氮肥 150 kg/hm ²	114.26±4.48 eD	94.69±2.04 abA	274.52±25.58 bedABCD
T6	氮肥 225 kg/hm ²	141.36±4.06 cdBC	94.71±8.63 abA	279.13±12.35 abcdABC
T7	氮肥 300 kg/hm	149.88±15.10 abcdABC	88.23±9.56 abcAB	275.61±5.05 bcdABCD
T8	氮肥 375 kg/hm ²	136.01±5.76 dCD	89.63±3.94 abcAB	266.68±10.56 cdeBCD
T9	磷肥 30 kg/hm ²	160.96±13.12 abAB	83.44±1.55 cdBC	282.48±10.53 abcdABC
T10	磷肥 60 kg/hm ²	164.70±19.57 aAB	88.43±0.74 abcAB	293.34±9.28 abAB
T11	磷肥 120 kg/hm ²	165.50±8.68 aA	96.09±2.67 aA	294.66±8.59 abAB
T12	钾肥 30 kg/hm ²	167.36±3.78 aA	90.98±3.71 abcAB	243.11±13.91 eFDE
T13	钾肥 60 kg/hm ²	162.79±7.61 abAB	92.22±8.50 abAB	300.20±22.04 aA
T14	钾肥 120 kg/hm ²	160.55±12.27 abAB	92.99±5.42 abAB	274.06±10.80 bcdABCD

注:同列数据后不同小写字母表示差异达0.05显著水平;同列数据后不同大写字母表示差异达0.01显著水平

Note: Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different at 0.05 level; values followed by different capital letters in the same column are significantly different at 0.01 level

2.4 不同处理对水稻肥料利用率的影响 水稻的氮磷钾利用率在区组间均随着肥料的增施呈下降趋势(表5)。在氮肥梯度区(T5~T8),T5与T6的氮肥利用率相对较高且处理间无显著差异。当氮肥施用量达到T8水平时,氮肥利用率降至21.76%,与其他处理差异显著。磷肥梯度区(T9~T11)最大施磷量处理T9显著低于其他施磷梯度处理,磷肥梯度

处理T9、T10与常规处理T1间均无显著差异。钾肥梯度区(T12~T14)处理中的T12极显著高于其他处理,处理T14的钾肥利用率降至37.36%,显著低于其余2个梯度处理。表明过量施用肥料均在一定程度上降低了氮、磷、钾三要素的肥料利用率,其中过量施用氮肥对氮素的利用率影响最大。

表5 不同处理对水稻肥料利用率的影响

Table 5 Effect of different treatments on fertilizer utilization efficiency of rice

%

编号 No.	处理 Treatment	氮肥利用率 N use efficiency	磷肥利用率 P ₂ O ₅ use efficiency	钾肥利用率 K ₂ O use efficiency
T1	常规	29.51±2.32 bC	19.34±0.96 aAB	42.81±2.12 bcB
T5	氮肥 150 kg/hm ²	39.80±1.90 aA	—	—
T6	氮肥 225 kg/hm ²	38.63±1.91 aAB	—	—
T7	氮肥 300 kg/hm ²	31.69±4.30 bBC	—	—
T8	氮肥 375 kg/hm ²	21.76±2.16 cCD	—	—
T9	磷肥 30 kg/hm ²	—	21.05±1.20 aA	—
T10	磷肥 60 kg/hm ²	—	19.10±1.64 abAB	—
T11	磷肥 120 kg/hm ²	—	15.88±2.89 bB	—
T12	钾肥 30 kg/hm ²	—	—	53.24±4.68 aA
T13	钾肥 60 kg/hm ²	—	—	43.02±6.08 bB
T14	钾肥 120 kg/hm ²	—	—	37.36±2.78 cB

注:同列数据后不同小写字母表示差异达0.05显著水平;同列数据后不同大写字母表示差异达0.01显著水平

Note: Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different at 0.05 level; values followed by different capital letters in the same column are significantly different at 0.01 level

2.5 不同处理对肥料农学效率的影响 在各氮肥梯度区 (T5~T8) 与磷肥梯度区 (T9~T11), 最低施氮磷量处理 T5 与 T9 的农学效率均极显著高于常规处理和区组间其余处理, 氮肥梯度区间的农学效率均逐级呈极显著降低。钾肥的农

学效率在各处理间无显著差异, 表现为随着肥料的增施农学效率逐级降低, 与氮磷肥一致。这表明适量施用氮磷钾肥能有效提高肥料的农学效率, 过量施肥均使肥料的农学效率降低, 其中对氮肥的农学效率影响最大 (表 6)。

表 6 不同处理对水稻农学效率的影响

Table 6 Effect of different treatments on agronomic efficiency of rice

编号 No.	处理 Treatment	氮肥 Nitrogen fertilizer	磷肥 Phosphate fertilizer	钾肥 Potassic fertilizer
T1	常规	199.40±18.35 cC	110.91±78.19 bB	125.49±68.32 aA
T5	氮肥 150 kg/hm ²	330.85±21.18 aA	—	—
T6	氮肥 225 kg/hm ²	276.39±21.90 bB	—	—
T7	氮肥 300 kg/hm	216.65±25.87 cC	—	—
T8	氮肥 375 kg/hm ²	154.09±14.85 dD	—	—
T9	磷肥 30 kg/hm ²	—	303.26±17.54 aA	—
T10	磷肥 60 kg/hm ²	—	154.68±8.95 bB	—
T11	磷肥 120 kg/hm ²	—	82.33±8.95 bB	—
T12	钾肥 30 kg/hm ²	—	—	195.53±102.97 aA
T13	钾肥 60 kg/hm ²	—	—	161.56±98.79 aA
T14	钾肥 120 kg/hm ²	—	—	36.06±12.08 aA

注: 同列数据后不同小写字母表示差异达 0.05 显著水平; 同列数据后不同大写字母表示差异达 0.01 显著水平

Note: Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different at 0.05 level; values followed by different capital letters in the same column are significantly different at 0.01 level

3 结论与讨论

氮肥对水稻的生长起到关键作用, 在合理的用量范围内, 氮肥可以促进分蘖, 增加有效穗数, 显著提高产量^[10], 该试验中缺氮处理的植株性状和收获情况都显著差于其他处理。在用氮量不足时, 水稻的分蘖较少, 有效穗不足, 影响产量; 过量施用氮肥时, 水稻的营养过剩, 抑制植株生长, 导致穗变小, 实粒数减少, 产量降低。在水稻分蘖期磷肥的缺失使其株高与叶绿素值均显著低于常规处理, 但对水稻生长后期影响不大, 钾肥对水稻的整个生长周期均有一定影响, 相对于磷肥对植株的生长作用更大, 适量增施钾肥极显著增加每穗实粒数, 但过量施用同样会导致产量显著降低, 这与前人研究结果基本一致^[11-12]。张奇春等^[13]研究指出水稻产量分别与水稻吸氮总量、吸磷总量和吸钾总量呈显著正相关, 这与该研究结果相似。该研究中当施氮量与施钾量分别达 375、120 kg/hm² 时, 其吸氮量、吸钾量与产量均呈下降趋势。

化肥过量施用与施肥结构不合理等是造成肥料利用率较低的主要原因, 该研究中, 氮磷钾肥的过量施用均使肥料利用率与农学效率显著降低, 表明肥料施用越多损失越多, 因此, 要在保证产量不会明显下降时, 适量减施化肥, 提高肥料利用率^[14]。当施肥量在较低水平时, 各肥料利用率与农学效率明显提高, 但产量较低。王道中等^[15]研究提出化肥适量减施能有效提高肥料的农业生产效率, 在该试验条件下, 施氮量分别为 225 kg/km² 时, 氮肥利用率显著高于后一个梯度处理, 但两者间产量差异不显著。施磷量与施钾量均为 30 kg/hm² 时肥料利用率与农学效率最高, 且产量与施磷钾量为 60 kg/hm² 时无显著差异, 表明适当减施化肥可以有效提高肥料利用效率且对产量影响不大。

在合理的范围内用肥能增加氮磷钾养分的积累, 利于水稻生长, 同时能明显提高肥料利用率与农学效率。该研究中, 当氮肥施用量均为 225 kg/hm², 磷钾肥施用量均为 30 kg/hm² 时能有效提高肥料利用率且没有明显减产。因此, 综合考虑水稻产量与肥料利用效率, 建议氮肥的施用量为 225 kg/hm², 磷钾肥的施用量均为 30 kg/hm² 为宜。

参考文献

- [1] 彭琳. 中国化肥施用与粮食生产的进程、前景与布局[J]. 农业现代化研究, 2000, 21(1): 14-18.
- [2] 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.
- [3] 徐成仓, 吴金水. 当涂县水稻测土配方施肥研究[J]. 园艺与种苗, 2012, 32(9): 52-54.
- [4] 哈新芳. 水稻高产综合配套栽培技术[J]. 宁夏农林科技, 2011, 52(9): 93-94.
- [5] 魏文慧, 孙万仓, 郭秀娟, 等. 氮磷钾肥对西北寒旱区冬油菜越冬率、产量及经济性状的影响[J]. 西北农业学报, 2009, 18(2): 122-125, 130.
- [6] 鲍土旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 145-196.
- [7] 中华人民共和国农业部. 植株全氮含量测定 自动定氮仪法: NY/T 2419—2013[S]. 北京: 中国农业出版社, 2014.
- [8] 中华人民共和国农业部. 植株全磷含量测定 钼锑抗比色法: NY/T 2421—2013[S]. 北京: 中国农业出版社, 2014.
- [9] 中华人民共和国农业部. 植株全钾含量测定 火焰光度计法: NY/T 2420—2013[S]. 北京: 中国农业出版社, 2014.
- [10] 扶艳艳. 氮素形态对小麦产量及氮肥利用率的影响[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2012.
- [11] 申义珍, 张正林, 钱晓晴, 等. 高产水稻的氮素营养特点与施肥[J]. 土壤通报, 1994, 25(2): 78-80.
- [12] 邹长明, 秦道珠, 陈福兴, 等. 水稻氮肥施用技术 I. 氮肥施用的适宜时期与用量[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2000, 26(6): 467-470.
- [13] 张奇春, 王光火, 方斌. 不同施肥处理对水稻养分吸收和稻田土壤微生物生态特性的影响[J]. 土壤学报, 2005, 42(1): 116-121.
- [14] 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.
- [15] 王道中, 张成军, 郭熙盛. 减量施肥对水稻生长及氮素利用率的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 161-165.