

不同施肥模式对水稻养分吸收利用及土壤养分平衡的影响

侯云鹏, 孔丽丽, 李 前, 秦裕波, 于 雷, 谢佳贵*, 尹彩侠*

(农业部东北植物营养与农业环境重点实验室/吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 长春 130033)

摘 要:为探讨不同施肥模式下水稻产量及其农田养分平衡状况,通过连续2年(2014~2015)田间试验,研究传统施肥模式与优化施肥模式对水稻产量、养分吸收利用,收获期土壤氮、磷、钾含量及收支平衡的影响。结果表明,2014年和2015年,优化施肥处理水稻产量较传统施肥处理分别提高7.6%和6.5%。与传统施肥处理相比,优化施肥处理水稻肥料当季回收率分别提高6.8和8.4个百分点,农学利用率分别提高2.9 kg/kg和3.1 kg/kg,偏生产力分别提高5.6 kg/kg和5.4 kg/kg,养分收获指数分别提高4.4和4.5个百分点。差异均达显著水平($P<0.05$)。与传统施肥处理相比,优化施肥处理可提高水稻氮、磷、钾最大吸收速率,并可提高水稻灌浆期至成熟期养分积累量。与试验起始时相比,传统施肥处理0~90 cm土壤无机氮与0~30 cm土壤有效磷含量均有明显的提高,0~30 cm土壤速效钾含量下降。而优化施肥处理0~90 cm土壤无机氮含量、0~30 cm土壤有效磷和速效钾含量与试验起始时变化幅度较小。水稻收获期土壤氮、磷、钾养分表观平衡估算的结果表明,优化施肥和农民习惯施肥土壤氮、磷素均出现盈余,钾素亏缺。与传统施肥处理相比,优化施肥处理氮盈余量分别下降87.6%和93.5%,磷盈余量分别下降87.7%和77.4%,钾亏缺量分别下降23.6%和23.5%,差异均达显著水平($P<0.05$)。综上所述,优化施肥模式在提高水稻产量、养分吸收利用及维持土壤养分平衡等方面均优于传统施肥模式。

关键词:优化施肥;传统施肥;水稻产量;养分吸收;养分平衡

中图分类号:S147.2

文献标识码:A

文章编号:1003-8701(2018)01-0001-08

Effects of Different Fertilization Patterns on Nutrient Absorption, Utilization and Soil Nutrient Balance of Rice

HOU Yunpeng, KONG Lili, LI Qian, QIN Yubo, YU Lei, XIE Jiagui*, YIN Caixia*

(Northeast Plant Nutrition and Agricultural Environment Key Laboratory of Ministry of Agriculture/Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to discuss rice yield and the status of farmland nutrient balance under different fertilization patterns, field experiment was conducted to study the effects of rice yield, nutrient absorption and utilization, soil N, P and K contents in harvest stage under traditional and optimum fertilization patterns from 2014 to 2015. The results showed that rice yield of optimum fertilization (OF) treatment increased by 7.6% and 6.5% than that of traditional fertilization (TF) treatment from 2014 to 2015, respectively. Compared with TF treatment, fertilizer recovery efficiency, agronomic efficiency, partial fertilizer productivity and nutrient harvest index of OF treatment significantly increased by 6.8% and 8.4%, 2.9 kg/kg and 3.1 kg/kg, 5.6 kg/kg and 5.4 kg/kg, 4.4% and 4.5%, respectively ($P<0.05$). OF treatment could improve the maximum uptake rate of N, P and K and nutrient accumulation from filling stage to mature stage of rice than TF treatment. Compared with the starting of experiment, the contents of inorganic N in 0-90 cm soil and available P in 0-30 cm soil increased significantly, and available K in 0-30 cm soil declined of TF treatment, while the contents of inorganic N in 0-90 cm soil and available P, K in 0-30 cm soil had fewer

收稿日期:2017-09-25

基金项目:科技基础条件与平台建设计划(20160623030TC);国家重点研发计划(2017YFD0300604);国际植物营养研究所(IPNI)项目(BFDP-Jilin-2016)

作者简介:侯云鹏(1982-),男,助理研究员,主要从事植物营养与环境方面研究。

通讯作者:谢佳贵,男,博士,研究员,E-mail: xiejiaGui@163.com

尹彩侠,女,硕士,副研究员,E-mail: yincaixia@163.com

changes of OF treatment. The calculation of soil N, P and K nutrient apparent balance indicated that it was surplus in soil N and P, and deficient in soil K of TF and OF treatments in harvest stage of rice. Compared with TF treatment, N surplus amounts, P surplus amounts and K deficient amounts significantly decreased by 87.6% and 93.5%, 87.7% and 77.4%, 23.6% and 23.5% of OF treatment, respectively ($P<0.05$). In summary, rice yield, nutrient absorption and utilization, and soil nutrient balance of optimum fertilization patterns were better than them of traditional fertilization patterns.

Key words: Optimum fertilization; Traditional fertilization; Rice yield; Nutrient absorption; Nutrient balance

水稻作为我国三大粮食作物之一,其增产稳产对我国粮食安全至关重要。近年来,水稻单产和总产均大幅提高^[1]。但在追求高产的过程中,忽略了施肥对土壤环境的影响,过量施肥和不平衡施肥现象日益严重,造成在产量提高的同时,养分流失加大,不仅肥料利用率低下,还使土壤剖面氮、磷、钾积累显著增加,引发了一系列的环境问题^[2-8]。因此在重视施肥对产量影响的同时,重视农田养分平衡研究是协调作物持续高产和减轻生态环境压力矛盾的重要途径。目前,关于施肥对水稻产量、生长发育及氮素对环境方面的影响已有大量研究,这些研究表明适宜的氮、磷、钾肥用量可以促进水稻生长发育、提高产量^[9-11],改善稻米品质^[12],但当化肥用量超过一定限度后,水稻产量不再增加,甚至下降^[13-14],同时氮肥过量供应还导致土壤无机氮损失量和残留量显著增加,引起硝态氮的淋洗^[15]。另外,还有研究发现,氮、磷、钾不平衡施肥也是影响水稻产量的重要因素^[16-17]。但这些研究多针对施肥对水稻养分吸收利用、增产效应及土壤氮素损失中某几方面的影响,而关于不同施肥模式对水稻产量、养分吸收利用及土壤氮、磷、钾含量变化和收支平衡状况综合影响的研究较少。鉴于此,本研究通过比较传统施肥和优化施肥条件下水稻养分吸收利用、产量及收获期土壤氮、磷、钾养分的变化和养分收支平衡状况,以期对水稻肥料优化管理和养分高效利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2014和2015年在吉林省松原市前郭县红光农场进行,该地区位于吉林省中西部,供试土壤为草甸土,0~20 cm层土壤基本养分状况见表1。试验设3个处理,1为不施肥(CK),2为优化施肥(Optimized Fertilization, OF),氮、磷、钾用量分别为180 kg/hm²、100 kg/hm²和130 kg/hm²,其中氮肥施用比例按基肥:分蘖期肥:抽穗期肥:灌浆期肥=25%:40%:20%:15%;磷肥全部做基肥施用;钾肥按基肥与抽穗期肥70%:30%比例施用。3为传统施肥处理(Traditional fertilization, TF),氮、磷、钾用量分别为245 kg/hm²、120 kg/hm²和110 kg/hm²,其中氮肥施用比例按基肥:返青期肥:分蘖期肥=50%:10%:40%;磷钾肥全部做基肥施用。基肥在移栽前1 d施入;返青肥于移栽后10 d施入;分蘖期肥于移栽后31 d施用;抽穗肥于移栽后60 d施入;灌浆期肥于移栽后86 d施入。试验用氮肥为尿素(N 46%),磷肥为重过磷酸钙(P₂O₅ 46%),钾肥为氯化钾(K₂O 60%)。供试水稻品种为吉粳511。两年均为5月21日移栽,栽插密度为20万穴/hm²,9月28日收获。小区面积为30 m²,3次重复,两边设有保护行。每小区间筑埂,并用塑料薄膜包裹,以减少各小区间的相互影响,其他田间管理按生产田进行。

表1 供试土壤基本养分状况

年份	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	碱解氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)	pH
2014	31.46	1.19	128.92	21.6	82.56	6.38
2015	29.52	1.16	135.76	23.9	87.21	6.62

1.2 样品采集与测定

分别于水稻返青期、分蘖期、抽穗期、灌浆期和成熟期(即移栽后10 d、31 d、60 d、86 d、125 d)采集植株样本,每小区采取有代表性水稻5穴(返青期取30穴),剪去根部,分为秸秆和穗部二部

分,于105℃杀青30 min后,70℃烘干至恒重后称重,用于计算地上部干物质重。样品粉碎过0.5 mm筛,测定氮、磷、钾养分含量。分析均采用H₂SO₄-H₂O₂法消煮,采用凯氏定氮法测定氮素含量,钒钼黄比色法测定磷素含量,火焰光度法测

定钾素含量;成熟期各小区单收,按实收株数计产。

在水稻施肥前与收获后采集0~90 cm土壤样品,每30 cm为一层(共3层),置于-20℃冷冻保存。土壤样品解冻后,将样品混匀过2 mm筛,称取5 g土壤样品,加入2 mol/L KCl溶液(土液比1:5)浸提,震荡50 min后过滤,浸提液用丹麦 Foss (FIA STAR 5000)流动注射分析仪测定 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N含量,用环刀法测定该层土壤容重,并根据各层土壤容重将矿质氮含量换算成0~90 cm土体矿质氮积累量。此外,采集0~30 cm土壤样品,风干后测定有效磷(P)和速效钾(K)含量。

1.3 计算公式及统计方法

肥料当季回收率(RE, %)=[(收获期施肥区地上部养分吸收量-收获期不施肥区地上部养分吸收量)/肥料施用量] $\times 100$

肥料农学效率(AE, kg/kg)=(施肥区作物产量-不施肥区作物产量)/肥料施用量

肥料偏生产力(PFP, kg/kg)=施肥区产量/肥料施用量

养分投入仅包括化肥施用量,不考虑降水、灌溉、大气沉降等带入的养分。而养分支出仅包括

作物收获带出的养分,不考虑因淋洗、挥发和反硝化造成的养分损失。养分平衡采用表观平衡法计算,即:

养分平衡值=氮(磷、钾)施入量-作物氮(磷、钾)携出量

试验数据用SAS 9.0统计软件处理,LSD法检验显著性;Excel 2013制图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理水稻产量及构成因素

表2结果表明,不同施肥方式对水稻的产量及其构成因素有明显影响。与传统施肥处理相比,优化施肥处理水稻产量在2014和2015年分别提高7.6%和6.5%。产量构成因素与产量趋势一致,优化施肥处理有效穗数、穗粒数和千粒重均高于传统施肥处理,其中2014年有效穗数、穗粒数和千粒重分别提高3.0%、2.0%和5.5%,2015年有效穗数、穗粒数和千粒重分别提高2.6%、5.2%和4.8%。表明在当前生产条件下,相对于传统施肥模式,优化施肥模式氮、磷、钾用量和氮肥运筹方式更为合理,使水稻有效穗数、穗粒数和千粒重增加,产量提高。

表2 不同施肥处理水稻产量及构成因素

处理	2014				2015			
	产量 (kg/hm ²)	有效穗数 (穗/m ²)	穗粒数 (粒/穗)	千粒重 (g)	产量 (kg/hm ²)	有效穗数 (穗/m ²)	穗粒数 (粒/穗)	千粒重 (g)
CK	6 538 b	230.2 b	106.8 b	23.1 a	7 024 c	247.1 e	110.8 b	23.5 a
OF	11 593 a	352.1 a	139.4 a	22.1 a	11 652 a	347.6 a	136.5 a	23.4 a
TF	10 770 a	341.9 a	136.6 a	21.0 a	10 938 a	338.9 a	129.7 a	22.3 a

注:数值后不同小写字母分别表示差异达5%显著水平,下同

2.2 不同施肥处理水稻生育期氮、磷、钾养分积累

由图1可知,不同施肥处理水稻氮、磷、钾积累进程均呈“S型”变化,可以Logistic方程 $y=k/(1+ae^{-bx})$ 进行回归分析,式中y为氮(磷、钾)积累量,x为时间(d)。经检验,其氮、磷、钾积累量实测值与由Logistic方程得出的模拟值之间呈极显著的正向相关性($r=0.975^{**} \sim 0.998^{**}$)。通过对拟合方程求导数,利用 $Y_{\max}=-k \times b/4$ 方程式求得不同施肥处理氮、磷、钾最大吸收速率。结果表明,优化施肥氮、磷、钾素最大吸收速率均高于传统施肥处理,其中2014年氮、磷、钾最大吸收速率分别提

高3.2%、4.0%和3.8%,2015年氮、磷、钾最大吸收速率分别提高3.9%、6.1%和0.6%。此外,不同施肥处理水稻生育期氮、磷、钾积累动态表现并不一致,传统施肥处理返青期(10 d)至抽穗期(60 d)氮、磷、钾积累量均高于优化施肥处理,灌浆期(86 d)至成熟期(125 d)发生变化,优化施肥处理氮、磷、钾积累量高于传统施肥处理。

2.3 不同施肥处理水稻肥料利用效率

表3结果表明,在两年的试验中,优化施肥处理水稻肥料当季回收率(RE)、农学利用率(AE)和偏生产力(PFP)均显著高于传统施肥处理($P<$

0.05)。其中2014年RE、AE和PFP分别提高6.8个百分点、2.9 kg/kg和5.6 kg/kg,2015年RE、AE和PFP分别提高8.4个百分点、3.1 kg/kg和5.4 kg/kg。优化

施肥处理的养分收获指数(HI)在2014和2015年较传统施肥处理分别提高4.4和4.5个百分点,差异均达显著水平($P<0.05$)。

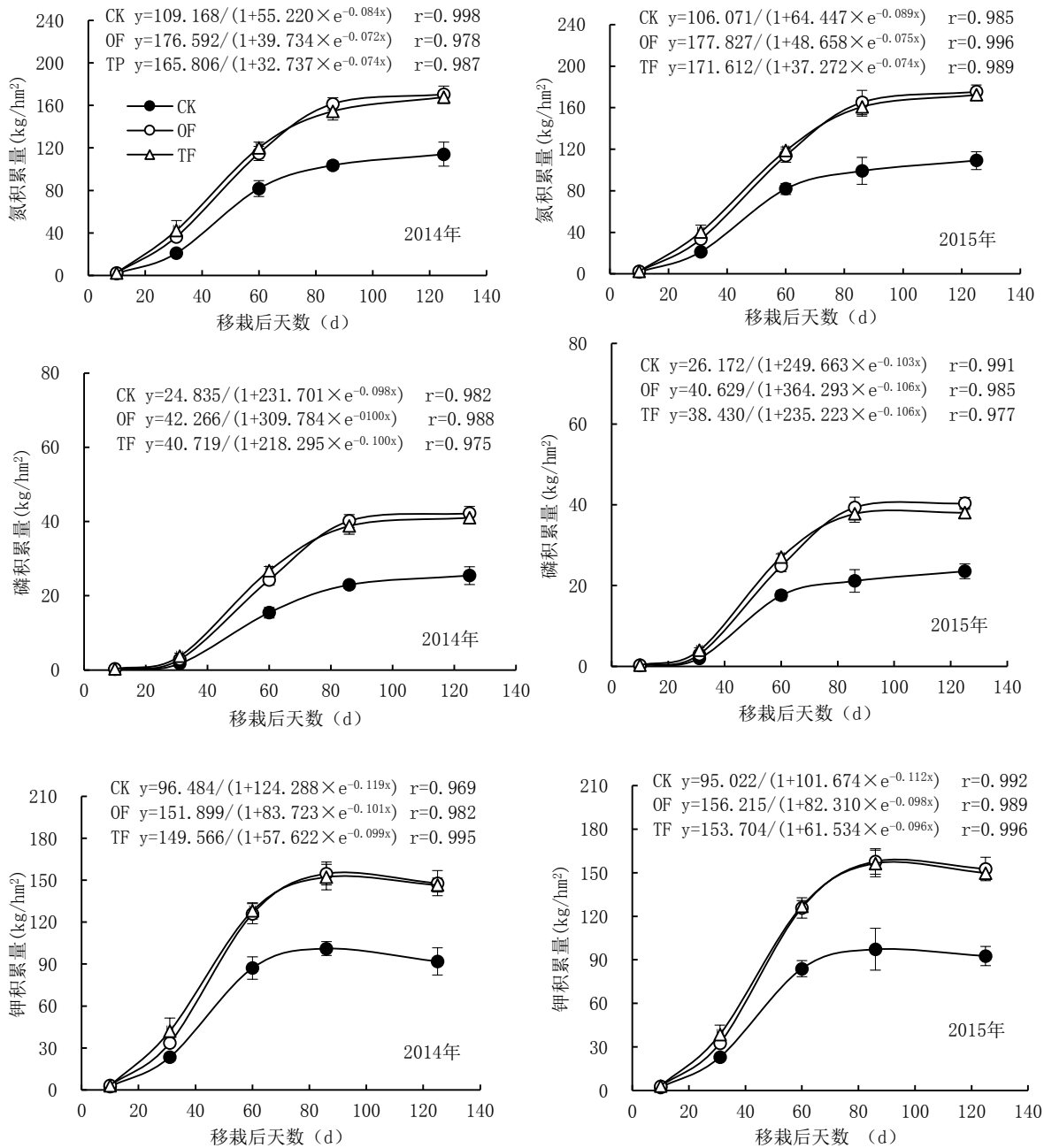


图1 不同施肥处理水稻各生育期氮、磷、钾积累动态

表3 不同施肥处理肥料利用效率

处理	2014				2015			
	养分收获指数(HI) (%)	肥料当季回收率(RE) (%)	肥料农学利用率(AE) (kg/kg)	肥料偏生产力(PFP) (kg/kg)	养分收获指数(HI) (%)	肥料当季回收率(RE) (%)	肥料农学利用率(AE) (kg/kg)	肥料偏生产力(PFP) (kg/kg)
CK	49.0 a	—	—	—	47.7 ab	—	—	—
OF	50.0 a	39.5 a	9.7 a	28.3 a	49.9 a	43.2 a	11.3 a	28.4 a
TF	44.6 b	32.7 b	6.8 b	22.7 b	45.4 b	34.8 b	8.2 b	23.0 b

2.4 不同施肥处理水稻成熟期土壤氮、磷、钾含量

2.4.1 不同施肥处理土壤无机氮含量

图2结果表明,与试验起始时相比,传统施肥处理各层土壤无机氮含量均明显提高,且随土层深度的增加而增加,其中2014和2015年0~30 cm土壤无机氮含量分别提高8.5%和8.3%,30~60 cm土壤无机氮含量分别提高26.1%和33.0%,60~90 cm土壤无机氮含量分别提高63.9%和53.5%。优化施肥处理与试验起始时相比,2014和2015年0~30 cm土壤无机氮含量分别提高

4.9%和6.2%,30~60 cm土壤无机氮含量略有下降,下降幅度分别为4.2%和6.1%,60~90 cm土壤无机氮含量分别提高6.2%和7.3%,变化幅度较小。对不同处理间土壤无机氮养分状况分析表明,传统施肥处理0~30 cm土壤无机氮含量与优化施肥差异不显著($P>0.05$)。而传统施肥处理30~60 cm和60~90 cm土壤无机氮含量显著地高于优化施肥处理($P<0.05$)。其中2014年30~60 cm和60~90 cm土壤无机氮含量分别提高31.7%和41.6%,2015年30~60 cm和60~90 cm土壤无机氮含量分别提高54.3%和43.0%。

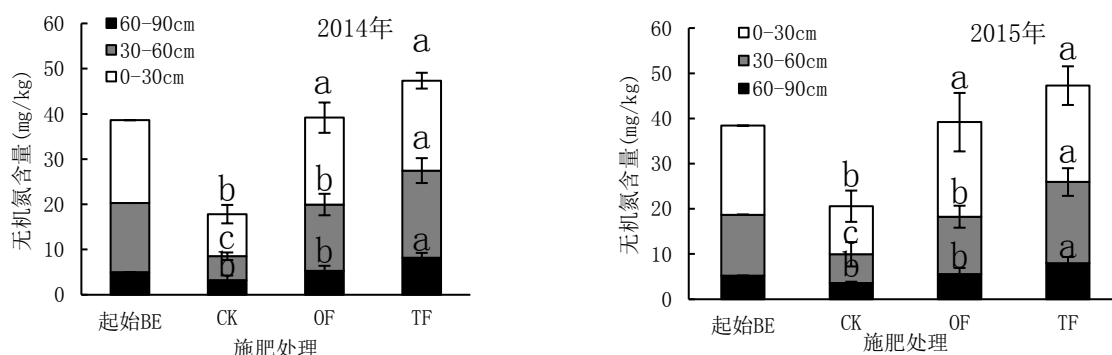


图2 不同施肥处理水稻成熟期土壤无机氮含量

注:柱上不同字母表示处理间差异达5%显著水平

2.4.2 不同施肥处理土壤有效磷含量

图3结果表明,与试验起始时相比,传统施肥处理0~30 cm土壤有效磷含量有大幅度提高,2014和2015年分别提高11.6%和9.9%,优化施肥处理与试验起始时相比,2014年土壤有效磷含量

提高2.0%,2015年土壤有效磷含量下降1.7%。变化幅度较小。对不同处理间土壤有效磷养分状况分析表明,传统施肥处理2014和2015年0~30 cm土壤有效磷含量均高于优化施肥处理,分别提高8.8%和11.5%。

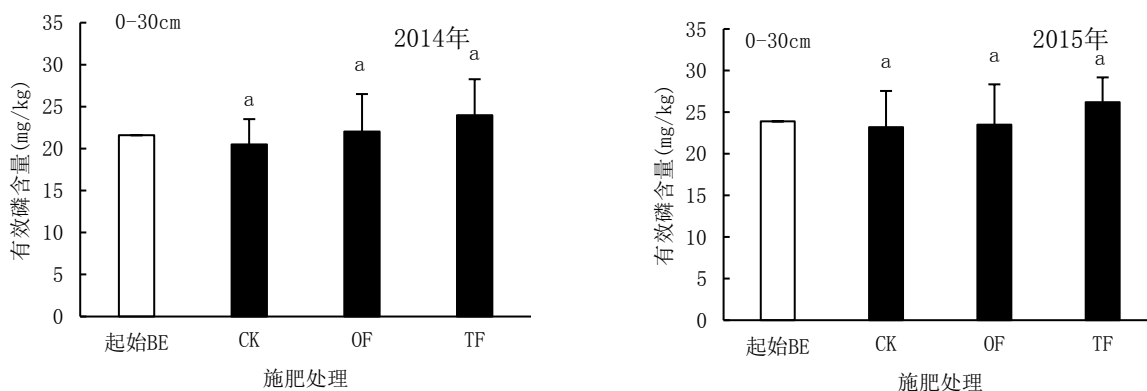


图3 不同施肥处理水稻成熟期土壤有效磷含量

2.4.3 不同施肥处理土壤速效钾含量

图4结果表明,与试验起始时相比,传统施肥处理0~30 cm土壤速效钾含量均呈下降趋势,2014和2015年分别下降2.3%和3.8%,优化施肥

处理与试验起始时相比,2014年土壤速效钾含量提高0.8%,2015年土壤速效钾含量下降1.3%。变化幅度较小。对不同处理间土壤速效钾养分状况分析表明,传统施肥处理2014和2015年0~30 cm

土壤速效钾含量均低于优化施肥处理,分别下降3.1%和2.6%。

2.5 不同施肥处理水稻土壤养分平衡

两年的土壤氮、磷、钾养分收支平衡结果表明(表4),优化施肥和传统施肥处理除钾素表现为负值外,氮损失量与磷的平衡为正值。传统施肥与优化施肥处理相比,氮、磷输出量间差异不显著($P>0.05$)。但由于优化施肥处理氮、磷投入量低于传统施肥处理,使优化施肥处理氮、磷盈余量显著低于传统施肥处理($P<0.05$),其中2014和2015年氮盈余量较传统施肥处理分别降低87.6%和93.5%,磷盈余量较传统施肥处理分别降低

87.7%和77.4%。钾平衡值与氮、磷不同,由于优化施肥和传统施肥处理的钾输入量低于钾输出量,因此平衡值均为负值。但由于优化施肥处理的钾素投入量高于传统施肥处理,因此优化施肥处理钾亏缺量较传统施肥处理分别降低23.6%和23.5%。差异达显著水平($P<0.05$)。由此可见,优化施肥模式氮、磷、钾施用量在满足作物对氮、磷、钾素的需求的同时可维持和减少作物对土壤氮、磷、钾素的消耗,使水稻收获后氮、磷、钾素基本维持在平衡水平。而传统施肥模式的氮、磷素投入量远远超过作物需求,钾素投入量不足,造成土壤中氮、磷素的积累与钾素的亏缺。

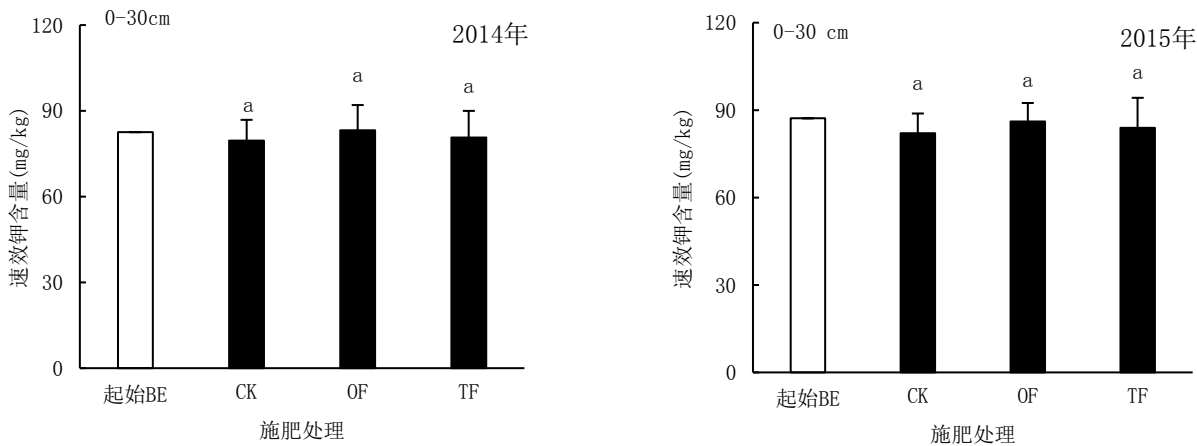


图4 不同施肥处理水稻成熟期土壤速效钾含量

表4 不同施肥处理土壤养分表观平衡 kg/hm²

年份	处理	氮平衡			磷平衡			钾平衡		
		输入	输出	平衡	输入	输出	平衡	输入	输出	平衡
2014	CK	0	114.1	-114.1 c	0.0	58.3 b	-58.3 c	0.0	111.5 b	-111.5 c
	OF	180	170.4	9.6 b	100	96.8 a	3.2 b	130.0	183.8 a	-53.8 a
	TF	245	167.8	77.2 a	120.0	94.0 a	26.0 a	110.0	180.4 a	-70.4 b
2015	CK	0	109.1	-109.1 c	0.0	54.0 b	-54.0 c	0	117.1 b	-117.1 c
	OF	180	175.3	4.7 b	100.0	92.6 a	7.4 b	130.0	190.0 a	-60.0 a
	TF	245	172.3	72.7 a	120.0	87.3 a	32.7 a	110.0	188.4 a	-78.4 b

3 讨论与结论

水稻产量由收获单位面积水稻有效穗数、穗粒数和千粒重决定。安宁等^[18]研究表明,提高水稻后期干物质的积累,可以促进水稻千粒重的增加,最终提高产量。本研究结果表明,优化施肥模式的肥料投入量虽然低于传统施肥模式(氮投入量减少26.5%,磷投入量减少16.7%,钾投入量增加18.2%,肥料投入总量减少13.7%),但优化施肥模式水稻有效穗数、穗粒数和千粒重均高于传统施肥模式。究其原因,一方面由于传统施肥模

式氮、磷、钾施用量不合理,另一方面传统施肥模式所采用氮肥运筹方式为重施基肥、返青肥和分蘖肥,使水稻生育前期生长过旺,无效分蘖增加,后期造成脱肥,导致有效穗数、穗粒数和千粒重下降。而优化施肥模式氮、磷、钾用量合理,并减少氮肥基施比例,增加生育后期(抽穗期、灌浆期)施氮量,因此在获得较高有效穗数的基础上,增加穗粒数和千粒重,最终实现高产。

水稻体内的养分作为产量形成的基础,受施肥影响显著,大量研究指出,氮、磷、钾养分供应过量、不平衡及施肥方法不当均不利于作物生育

后期养分的吸收、转运及利用^[19-22]。而相关研究表明,水稻产量主要决定于开花后养分积累量^[23],并且水稻灌浆期养分吸收量与产量间的相关系数最大^[24],因此水稻灌浆期养分吸收对产量的影响最为重要。本研究结果表明,虽然优化施肥水稻返青期至抽穗期氮、磷、钾积累量均低于传统施肥处理,但由于增加后期追氮量,使优化施肥水稻灌浆期至成熟期氮、磷、钾积累量高于传统施肥。由此可见,传统施肥模式重氮磷肥,轻钾肥,且只重视前期氮肥的投入,使水稻生育前期植株生长过旺,而后期养分供应不足,不利于水稻生育后期籽粒氮、磷、钾养分的积累。养分收获指数也证明了这一点,优化施肥模式养分收获指数均高于传统施肥模式。说明优化施肥模式肥料用量及氮肥施用方法不仅可以提高水稻养分吸收,还可促进营养体养分向籽粒的转运,使籽粒中氮、磷、钾养分所占整个植株比例提高,从而获得更高的经济产量。

一般来说,提高肥料利用效率是通过提高单位面积作物产量和降低施肥量来实现的。因此,施肥量和作物产量是影响肥料利用率的最直接因素。本研究中,虽然传统施肥处理水稻产量和养分吸收与优化施肥处理差异不显著($P>0.05$)。但由于传统施肥处理施肥量较高,使肥料利用效率的各项指标显著地低于优化施肥处理。由此可见,优化施肥模式在保持较高产量水平的前提下,通过减少施肥量和合理的氮肥运筹方式,使肥料利用率得到提高。

相关研究表明,过量和不平衡施肥不仅影响作物产量,同时还是影响土壤肥力的主要原因,当某元素施用过量或不足时,会使土壤中含量较高的营养元素进一步提高,而土壤中含量较低的养分因得不到及时补充,使其养分耗竭,造成环境污染^[25-27]。因此,判定施肥量是否合理,除考虑肥料对作物产量和利用率的影响外,关注肥料在土壤中残留及损失的高低十分重要。本研究中,与试验起始时相比,传统施肥处理无机氮含量和有效磷含量明显地高于试验起始时含量,而速效钾低于试验起始时含量。而优化施肥处理的无机氮含量、有效磷含量及速效钾含量均与试验起始时相近。说明相对于优化施肥模式,传统施肥模式的氮、磷投入量过大,钾投入量不足。土壤养分平衡结果也表明,优化施肥处理水稻氮、磷素吸收量分别占氮、磷素总投入的94.7%、97.4%和96.8%、92.6%。可见优化施肥模式氮、磷投入量

既满足了作物对氮、磷素需求又维持了土壤磷素的消耗。钾投入量虽然低于输出量,但依据鲁如坤等^[28]提出“养分允许平衡盈亏率”方法和原则,计算出本区域内水稻钾素允许平衡盈亏率为34.5%,高于优化施肥盈亏率29.3%和31.6%,在允许的范围内,而传统施肥的水稻氮、磷素吸收量分别占氮、磷素总投入的68.5%、70.3%和78.3%、72.8%,远远超过作物需求,而钾盈亏率分别为39.0%和37.4%,低于允许平衡盈亏率。由此可见,传统施肥模式的氮、磷素出现大量盈余,钾素亏缺严重,而优化施肥模式基本维持了土壤作物系统中的养分收支平衡。

综合以上分析,在本试验条件下,传统施肥模式氮、磷投入量过高,钾投入量较低。优化施肥模式在较传统施肥模式减施13.7%化肥的前提下,在提高水稻产量和肥料利用效率的同时,降低了水稻收获后土壤氮素和磷素对环境污染的风险,并减轻土壤钾素的耗竭,维持土壤养分平衡。但本试验仅为2年的结果,尚需要多年多点定位研究,才能得出更明确的结论。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国农业部. 中国农业年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015: 137-138.
- [2] 马文奇, 杜 森, 马常宝, 等. 我国水稻施肥现状和特征[J]. 中国农技推广, 2004(3): 50-53.
- [3] 张树清. 中国农业肥料利用现状、问题及对策[J]. 中国农业信息, 2006(7): 11-14.
- [4] 沈 娟, 高 强. 吉林省水稻施肥现状的调查分析[J]. 吉林农业科学, 2011, 36(2): 40-43, 59.
- [5] 陈 琦. 农户水稻施肥现状调查与分析——以江西省、江苏省为例[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- [6] 马保国, 杨太新, 郭凤台, 等. 麦稻轮作体系中磷素平衡的研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 371-374.
- [7] 李文军, 彭保发, 杨奇勇. 长期施肥对洞庭湖双季稻区水稻土有机碳、氮积累及其活性的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(3): 488-500.
- [8] 王凯荣, 刘 鑫, 周卫军, 等. 稻田系统养分循环利用对土壤肥力和可持续生产力的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(6): 1041-1045.
- [9] 张秀芝, 易 琼, 朱 平, 等. 氮肥运筹对水稻农学效应和氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 782-788.
- [10] 陈 敏, 马婷婷, 丁艳萍, 等. 配方施肥对水稻养分吸收动态及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1): 237-246.
- [11] 莫钊文, 李 武, 段美洋, 等. 减钾对华南早晚兼用型水稻产量形成、品质及钾吸收利用的影响[J]. 华北农学报, 2014, 29(1): 151-158.

- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 戢 林,张锡洲,李廷轩,等.基于“3414”试验的川中丘陵区水稻测土配方施肥指标体系构建[J].中国农业科学,2011,44(1):84-92.
- [15] 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.
- [16] 尹彩侠,王立春,张国辉,等.平衡施肥对水稻产量和品质的影响[J].吉林农业科学,2007,32(4):29-30,34.
- [17] 易 琼,张秀芝,何 萍,等.氮肥减施对稻-麦轮作体系作物氮素吸收、利用和土壤氮素平衡的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(5):1069-1077.
- [18] 安 宁,范明生,张福锁.水稻最佳作物管理技术的增产增效作用[J].植物营养与肥料学报,2015,21(4):846-852.
- [19] 侯云鹏,陆晓平,赵世英,等.平衡施肥对春玉米产量及养分吸收的影响[J].玉米科学,2014,22(4):126-131.
- [20] 李 前,侯云鹏,高 军,等.不同供磷水平对水稻干物质累积、磷素吸收分配及产量的影响[J].吉林农业科学,2015,40(3):37-41.
- [21] 潘圣刚,翟 晶,曹凑贵,等.氮肥运筹对水稻养分吸收特性及稻米品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(3):522-527.
- [22] 孙永健,孙园园,李旭毅,等.水氮互作对水稻氮磷钾吸收、转运及分配的影响[J].作物学报,2010,36(4):655-664.
- [23] 凌启鸿.作物群体质量[M].上海:上海科学技术出版社,2001:16-42.
- [24] 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.
- [25] 李玉影,刘双全,姬景红,等.玉米平衡施肥对产量、养分平衡系数及肥料利用率的影响[J].玉米科学,2013,21(3):120-124.
- [26] 林治安,赵秉强,袁 亮,等.长期定位施肥对土壤养分与作物产量的影响[J].中国农业科学,2009,42(8):2809-2819.
- [27] 区惠平,周柳强,黄美福,等.不同施磷量下稻田土壤磷素平衡及其潜在的环境风险评估[J].植物营养与肥料学报,2016,22(1):40-47.
- [28] 鲁如坤,刘鸿翔,闻大中,等.我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究IV.农田养分平衡的评价方法和原则[J].土壤通报,1996,27(5):197-199.

(责任编辑:王 昱)