植物营养与肥料学报 2014,20(3):598-605
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0310

五年定位试验钾肥用量对双季稻产量和施钾效应的影响

鲁艳红[1,2], 廖育林[1,2], 聂 军[1,2*], 谢 坚[1,2], 杨曾平[1,2], 周 兴[1,3]
(1 湖南省土壤肥料研究所, 湖南长沙 410125; 2 农业部湖南耕地保育科学观测实验站, 湖南长沙 410125;
3 中南大学研究生院隆平分院, 湖南长沙 410125)

摘要: 通过5年定位试验(2008～2012年), 研究不同钾肥施用量对水稻产量、植株钾素含量、钾素积累量、钾肥利用率、土壤钾素含量、钾素平衡和钾肥经济效益的影响。试验施钾量(K_2O)从低到高设K0(不施钾)、K1(早稻84 kg/hm^2、晚稻105 kg/hm^2)、K2(早稻120 kg/hm^2、晚稻150 kg/hm^2)、K3(早稻156 kg/hm^2、晚稻195 kg/hm^2)和K4(早稻192 kg/hm^2、晚稻240 kg/hm^2)5个处理。5年的试验结果表明, 施钾能显著提高早、晚稻产量,在一定施钾量范围内,水稻产量随施钾量的增加而增加;施钾能促进水稻植株对钾素的吸收和积累,尤其是稻草对钾素的吸收和积累;早、晚稻的钾肥农学效应均以K2处理最高(早稻3.12 kg/kg、晚稻3.70 kg/kg);钾肥利用率以K1处理最高(早稻41.2%、晚稻76.4%),并随施钾量提高而降低;不同施钾量对土壤钾素含量有明显影响,土壤速效钾、缓效钾和土壤全钾均随施钾量的增加而增加,且不同处理间土壤速效钾含量差异达极显著水平($P<0.01$);连续种植5年10季水稻后,K0、K1和K2处理的土壤钾素亏缺(K 127.1 kg/hm^2、58.3 kg/hm^{2}和10.8 kg/hm^2),亏缺量随施钾量的增加而降低; K3和K4处理的土壤钾素盈余(48.0 kg/hm^{2}和109.2 kg/hm^2),盈余量随施钾量的增加而增加。在经济效益上,早、晚稻产投比均以K2处理最高(早稻1.04、晚稻1.27)。综合考虑施钾的增产效应、经济效益和土壤钾素养分平衡等因素,建议该双季稻区早稻施钾量在K_2O 120～156 kg/hm^2、晚稻施钾量在K_2O 150～195 kg/hm^{2}范围内较为适宜。

关键词: 钾肥用量; 双季稻; 产量; 施钾效应; 定位试验
中图分类号: S158.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2014)03-0598-08

Effect of potassium rates on rice yields and potassium application efficiency in double-rice cropping system under a 5-year located experiment

LU Yan-hong[1,2], LIAO Yu-lin[1,2], NIE Jun[1,2*], XIE Jian[1,2], YANG Zeng-ping[1,2], ZHOU Xing[1,3]
(*1 Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha 410125, China; 2 Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation (Hunan), Ministry of Agriculture, Changsha 410125, China; 3 Longping Branch of Graduate School of Central South University, Changsha 410125, China*)

Abstract: Effects of potassium fertilizer application on rice yield, K content in plant, K uptake, K-fertilizer use efficiency, potassium balance and economic benefit were studied by using a five-year (2008-2012) located experiment in double-rice cropping system. There were five treatments, K0 (non potassium fertilizer), K1 (K_2O 84 kg/hm^2 in early rice and K_2O 105 kg/hm^2 in late rice), K2 (K_2O 120 kg/hm^2 in early rice and K_2O 150 kg/hm^2 in late rice), K3 (K_2O 156 kg/hm^2 in early rice and K_2O 195 kg/hm^2 in late rice) and K4 (K_2O 192 kg/hm^2 in early rice and K_2O 240 kg/hm^2 in late rice). The results show that the K fertilizer application could obviously increase grain yields of early rice and late rice, and under a certain K fertilizer application range, the yield is increased with the increase of potassium application rate. The potassium uptook by rice plant, especially by rice straw is obviously increased with the increase of K fertilizer application amount. The K agronomy efficiency of

收稿日期: 2013-08-05 **接受日期:** 2014-01-24
基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201203013、201203030); 国家"十二五"科技支撑计划项目(2012BAD05B05、2013BAD07B11); 国际钾肥研究所(IPI)项目资助。
作者简介: 鲁艳红(1974—), 女, 湖北武穴人, 博士, 副研究员,主要从事植物营养与作物高效施肥研究。
E-mail: luyanhong6376432@163.com。 * 通信作者 Tel: 0731-84693197, E-mail: junnie@foxmail.com

the K2 treatment is the highest in both early rice (3.12 kg/kg K_2O) and late rice (3.70 kg/kg K_2O) among all the treatments, and the K recovery efficiency of K1 treatment is the highest in both early rice (41.2%) and late rice (76.4%) and the K recovery efficiency is decreased with the increase of K application amount. K fertilizer application could significantly affect K contents in soils, and the contents of available K, slowly available K and total K in soils are increased with the increase of K fertilizer application amount and the differences of available K among treatments are significant ($P<0.01$). The apparent K balance in the soil-crop system is negative in the K0, K1 and K2 treatments (127.1 kg/hm^2, 58.3 kg/hm^2 and 10.8 kg/hm^2) after the five-year rice-cropping and the potassium deficient amount is decreased with the increase of K fertilizer application amount, while the apparent K balance is positive in the K3 and K4 treatments (48.0 kg/hm^2 and 109.2 kg/hm^2) and potassium surplus amount is increased with the increase of K fertilizer application amount. The ratios of output to input of K fertilizer of the K2 treatment in both of early rice (1.04) and late rice (1.27) are the highest. The overall results suggest that the appropriate potassium application rates are K_2O 120-156 kg/hm^2 in early rice and K_2O 150-195 kg/hm^2 in late rice in this double-rice cropping area.

Key words: potassium rate; double-rice; rice yield; potassium application efficiency; located experiment

湖南省是中国水稻的主要产区之一，双季稻是当地最重要的水稻种植模式，其面积占水稻总种植面积的70%[1]。钾素是实现水稻稳产增产的重要营养元素，在水稻产量形成和稻米品质提升等方面起着极其重要的作用，且水稻对钾素的吸收量较大，甚至高于氮素，因此，合理施用钾肥是实现水稻持续高产的重要措施。然而，在传统水稻生产中，农民往往重视氮肥而忽略磷、钾肥，特别是钾肥的施用[2]。近年来，由于高产杂交水稻和具有高产潜力常规水稻品种的大面积推广，传统的钾肥施用技术无法满足高产水稻对钾素的需求，导致水稻从土壤中带走的钾逐年增加，从而加速了水稻土中钾素的消耗[3-4]。目前有关钾肥施用量和施用方式在湖南省双季稻种植模式中的产量效应、钾素利用效率等方面研究较多，其主要目标是针对钾对当季作物的效应[5-6]，很少考虑土壤钾素平衡的维持或提高土壤钾素。通常推荐的最佳或最经济钾肥施用量，不一定会维持稻田土壤钾素平衡。在湖南省双季稻区，农民传统的施钾技术往往导致水稻吸收的钾量大于最佳施肥量，从而导致土壤有效钾库的耗竭；在部分区域，存在某一年份水稻吸收的钾量小于最佳施肥量而导致土壤钾素肥力的上升现象，然而这种钾肥最佳用量会因其后续水稻生产的经济效益变化而不具有持续性。面对当前我国水稻土缺钾问题，如何在达到水稻稳产高产的同时维持和提高稻田土壤的钾素就显得极为重要。本研究选择湖南典型双季稻地区，通过5年田间定位试验，分析了水稻产量、水稻植株钾素含量和吸收量、钾肥利用率、土壤钾素状况、钾素表观平衡以及施钾经济效益等，以寻求一种既能保障水稻高产稳产又能维持农田土壤钾素平衡的钾肥推荐施用方法，同时揭示土壤钾素肥力变化的基本规律及其影响因素，为双季稻田合理施用钾肥和土壤钾素培肥提供新的思路。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

2008～2012年定位试验设在长沙县干杉镇(N 28°08′，E 113°12′)，试验期间的年平均降雨量1378 mm、气温17 ℃、无霜期约300 d，属中亚热带季风湿润气候区。供试土壤为第四纪红色粘土发育的水稻土(粉质轻粘土)，土壤分类为普通简育水耕人为土。试验开始前0—20 cm耕层土壤的基本性状为：pH值5.5、土壤有机质37.9 g/kg、全氮2.14 g/kg、碱解氮238 mg/kg、全磷0.83 g/kg、速效磷9.2 mg/kg、全钾9.20 g/kg、缓效钾107.5 mg/kg、速效钾62.0 mg/kg。

1.2　试验设计

试验共设5个处理，分别为：K0(不施钾肥)；K1(早稻施 K_2O 84 kg/hm^2、晚稻施 K_2O 105 kg/hm^2)；K2(早稻施 K_2O 120 kg/hm^2、晚稻施 K_2O 150 kg/hm^2)；K3(早稻施 K_2O 156 kg/hm^2、晚稻施 K_2O 195 kg/hm^2)和K4(早稻施 K_2O 192 kg/hm^2、晚稻施 K_2O 240 kg/hm^2)处理。氮、磷和钾化肥品种分别是尿素、过磷酸钙和氯化钾。在试验期间，氮肥按早稻N 150 kg/hm^2、晚稻N 180 kg/hm^2 施入；磷肥按早稻 P_2O_5 75 kg/hm^2、晚稻 P_2O_5 45 kg/hm^2 施入。全部磷肥和钾肥作基肥于插秧前一天施入，氮肥分两次施入，为70%做基肥在插秧前一天施入，

30%在分蘖期做追肥施入。每个处理4次重复,小区面积20 m^2,随机区组排列。小区间筑田埂并覆盖农用薄膜隔离,以避免小区间水分窜灌或漫灌。供试早稻和晚稻品种(组合)分别为湘早籼24和丰源优272。试验田管理措施与当地农民的大田管理一致。

1.3 采样与分析

试验前采集0—20 cm耕层基础土壤样品。每季水稻成熟后多点混合采集植株样品,每小区单打单收称计实产。2012年晚稻收获后从各小区采集0—20 cm耕层土壤样品,用于土壤全钾、缓效钾和速效钾测定。灌溉水样品是在灌溉来水的上游方向取5个点的水样混合而成。

植株全钾用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮,火焰光度计法测定[7];土壤全钾用NaOH熔融,火焰光度计法测定[7];土壤缓效钾用1 mol/L热 HNO_3 浸提,火焰光度计法测定[7];土壤速效钾用1 mol/L中性 NH_4OAc 浸提,火焰光度计法测定[7];土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效磷的含量和土壤pH均按文献[7]中的方法测定。

1.4 计算与统计方法

钾肥农学效应(Agronomy efficiency, AE, kg/kg)=(施肥区子粒产量-对照区子粒产量)/施钾量

植株吸钾量[K uptake by plant, K kg/(hm^2·a)]=稻草产量×稻草钾含量+子粒产量×子粒钾含量

钾肥利用率(K use efficiency, %)=(施肥区植株吸钾量-对照区子植株吸钾量)/施钾量×100

土壤钾素表观平衡按下式计算:

$$Kap = Kinp - (Kup - Krec)$$

式中:Kap是钾素表观平衡[kg/(hm^2·a)];Kinp是通过化肥、秧苗、雨水和灌溉水输入的钾素量[kg/(hm^2·a)];Kup是水稻植株吸收的钾素量[kg/(hm^2·a)];Krec是通过稻桩和根茬残留循环的钾素量[kg/(hm^2·a)]。

秧苗、雨水、灌溉水及稻桩和根茬残留循环的输入钾素量为试验期间5年的平均测定值。

试验数据用SPSS 13.0系统软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 施钾量对水稻产量的影响

不同施钾量对早、晚稻水稻产量的影响表现不同。从表1可以看出,各处理水稻产量之间存在差异,施钾处理与不施钾处理之间的差异均达极显著水平($P<0.01$);连续5年施用钾肥的早稻平均产量随钾肥施用量的增加呈先增加后下降的变化趋势,与不施钾肥的对照处理相比,K1、K2、K3和K4处理分别增加4.82%、7.25%、8.01%和7.37%;5季晚稻平均产量随钾肥施用量的增加而增加,K1、K2、K3和K4处理较K0处理分别增加4.93%、8.61%、9.07%和10.25%。其中早稻平均产量最高的是K3处理,晚稻最高的是K4处理。早、晚稻农学效应均以K2处理最高,施钾量高于K2处理,农学效应随施钾量的增加而降低。

表1 连续5年不同施钾肥量对早、晚稻平均产量及钾肥农学效应的影响

Table 1 Effect of K fertilization on the rice grain yields and K agronomic efficiency in 2008-2012

处理 Treatment	早稻产量(kg/hm^2) Early rice yield	晚稻产量(kg/hm^2) Late rice yield	农学效应 Agronomic efficiency(grain kg/kg, K_2O)	
			早稻 Early rice	晚稻 Late rice
K0	5169.0 cB	6438.5 cC		
K1	5418.0 bA	6755.9 bB	2.96	3.02
K2	5543.6 abA	6993.1 aAB	3.12	3.70
K3	5583.1 aA	7022.4 aA	2.65	2.99
K4	5550.1 abA	7098.3 aA	1.98	2.75

注(Note):同列数值后不同小、大字母表示差异达5%和1%显著水平 Values followed by different small and capital letters in the same column are significant at the 5% and 1% levels, respectively.

2.2 施钾量对水稻植株钾素含量的影响

从表2可以看出,施钾量不同,钾素在水稻植株体内的分配不同。施用钾肥能显著提高水稻子粒和稻草中的钾素含量,特别是稻草中的钾含量,早、晚

稻施钾处理与不施钾处理之间子粒中的钾素含量差异达显著水平（$P<0.05$）；稻草中的钾素含量差异达极显著水平（$P<0.01$）。早、晚稻子粒和稻草中的钾素含量均随着施钾量的增加而增加。早稻子粒钾含量 K1、K2、K3 和 K4 处理分别比对照处理增加 6.25%、9.37%、12.50% 和 15.63%，晚稻增加 11.54%、15.38%、19.23% 和 23.08%；早稻稻草钾含量 K1、K2、K3 和 K4 处理分别比对照处理增加 41.77%、54.43%、66.46% 和 69.62%；晚稻增加 77.69%、92.56%、102.48% 和 112.40%。

表 2　连续 5 年不同施钾量对子粒和稻草钾素含量的影响（g/kg）

Table 2　Effect of K fertilization on potassium concentrations in rice plant from 2008 to 2012

处理 Treat	早稻 Early rice		晚稻 Late rice	
	子粒 Grain	稻草 Straw	子粒 Grain	稻草 Straw
K0	3.2 ±0.23 cC	15.8 ±1.7 dC	2.6 ±0.35 bB	12.1 ±1.5 dC
K1	3.4 ±0.25 bBC	22.4 ±1.4 cB	2.9 ±0.54 aAB	21.5 ±1.0 cB
K2	3.5 ±0.31 bAB	24.4 ±2.1 bcAB	3.0 ±0.61 aAB	23.3 ±0.7 bcAB
K3	3.6a ±0.32 bAB	26.3 ±1.6 abA	3.0 ±0.65 aA	24.5 ±0.7 abA
K4	3.7 ±0.37 aA	26.8 ±2.0 aA	3.2 ±0.67 aA	25.7 ±2.0 aA

注（Note）：同列数值后不同小、大字母表示差异达5%和1%显著水平 Values followed by different small and capital letters in the same column are significant at the 5% and 1% levels, respectively.

2.3　施钾量对水稻植株吸钾量和钾肥利用率的影响

表 3 表明，施钾可显著增加早、晚稻水稻植株的吸钾量（$P<0.01$），植株钾素积累量随施钾量的增加而增加，但早、晚稻表现有所不同，早稻不同施钾处理之间的植株吸钾量存在显著差异，而晚稻不同施钾处理之间的差异不明显。与不施钾肥的 K0 处理相比，K1、K2、K3 和 K4 处理早稻植株吸钾量分别增加 36.51%、49.62%、59.67% 和 65.14%，晚稻增加 76.88%、89.83%、91.33% 和 94.22%。钾肥利用率随钾肥施用量的增加而降低，早稻钾肥利用率范围为 32.1%～41.2%，晚稻钾肥利用率范围为 41.0%～76.4%；早稻相近施钾处理间钾肥利用率的差异不明显，晚稻除 K3 和 K4 之间的差异不明显外，其他相近施钾处理间差异均达到极显著水平（$P<0.01$）。

表 3　不同施钾处理的水稻年吸钾量和钾肥利用率

Table 3　Potassium contents in rice plant and use efficiency of K fertilizer in 2008–2012

处理 Treatment	早稻 Early rice		晚稻 Late rice	
	植株年吸钾量（kg/hm^2）Annual plant K uptake	钾肥利用率（%）K efficiency	植株年吸钾量［$kg/(hm^2 \cdot a)$］Annual plant K uptake	钾肥利用率（%）K efficiency
K0	78.6 ±7.5 dC		86.5 ±11.4 bB	
K1	107.3 ±4.3 cB	41.2 ±15.8 aA	153.0 ±18.7 aA	76.4 ±9.5 aA
K2	117.6 ±10.1 bAB	39.1 ±16.0 aAB	164.2 ±15.3 aA	62.4 ±6.2 bB
K3	125.5 ±6.4 abA	36.2 ±9.7 abAB	165.5 ±13.4 aA	48.8 ±8.2 cC
K4	129.8 ±10.2 aA	32.1 ±10.6 bB	168.0 ±15.9 aA	41.0 ±10.9 cC

注（Note）：同列数值后不同小、大字母表示差异达5%和1%显著水平 Values followed by different small and capital letters in the same column are significant at the 5% and 1% levels, respectively.

2.4　施钾量对钾素养分平衡的影响

通过化肥、秧苗、灌溉水和雨水输入的钾量、水稻植株吸收输出的钾量及稻桩和根茬残留归还的钾量来确定所有处理的表观钾平衡（表 4）。从表 4 可以看出，钾素的输入项中各施钾处理主要是通过钾肥施入的钾，占总输入量的 75% 以上；其次水稻稻

桩和根茬的钾素(循环钾)对钾输入量也有较大影响,各施钾处理明显高于对照处理,但不同施钾处理间差异较小。钾的输出主要是水稻植株吸收的钾,施钾处理植株吸钾量明显高于对照处理,且随钾肥施用量的增加而增加,说明施钾量越高,作物从土壤中带走的钾素越多,但同时施钾量越高通过钾肥投入和稻桩根茬残留钾素输入量也越高。5年10季水稻年平均钾素表观平衡结果表明,K0、K1和K2处理处于钾素亏缺状态,钾素亏缺量随施钾量的增加而有较大幅度降低,K0处理的亏缺量为127.1 kg/hm^2,K1处理的亏缺量为58.3 kg/hm^2,而K2处理的亏缺量仅为10.8 kg/hm^2;K3和K4处理处于钾素盈余状态,钾素盈余量随施钾量的增加急剧增加,K3处理钾素盈余量为48.0 kg/hm^2,K4处理盈余量为109.2 kg/hm^2。

表4 连续5年钾素平衡状况(K kg/hm^2)

Table 4 Estimates of soil potassium balance in the 5-year continuous application K fertilizer

处理 Treatment	输入钾 Potassium input				植株吸收 Plant uptake	循环钾* Recycled K	钾表观平衡 Apparent balance
	肥料 Fertilizer	秧苗 Seedling	灌溉水 Irrigation	降雨 Rainfall			
K0	0	2.5	14.5	6.7	165.2	14.4	-127.1
K1	156.8	2.5	14.5	6.7	260.4	21.6	-58.3
K2	224.0	2.5	14.5	6.7	281.8	23.3	-10.8
K3	291.3	2.5	14.5	6.7	291.1	24.1	48.0
K4	358.5	2.5	14.5	6.7	297.9	24.9	109.2

注(Note):*残留在水稻根系和稻茬中的钾素量 K nutrient recycled through rice root and stubble residues.

2.5 施钾量对土壤钾素状况的影响

从5年10季水稻种植后的土壤钾素状况来看(表5),不同施钾量对耕层土壤中的钾素含量有明显影响,土壤速效钾、缓效钾和全钾含量均随施钾量的增加而提高。不同处理间土壤速效钾含量达到极显著差异($P<0.01$),其值的变化范围为46.8~90.3 mg/kg;除不施钾肥的K0处理较初始土壤降低外,各施钾肥处理的土壤速效钾含量均较试验前有所提高,K1、K2、K3和K4处理分别提高4.84%、15.81%、30.16%和45.65%。土壤缓效钾的变化趋势与土壤速效钾变化趋势相似,其值在104.25~121.50 mg/kg范围内变化,除K0处理较试验前降低,各施钾处理土壤缓效钾均提高,K1、K2、K3和K4处理的提高幅度分别为1.21%、3.26%、5.86%和13.02%。土壤全钾含量也随施钾量的增加而增加,但除施高量钾肥的K4处理外,其他处理土壤中的全钾含量较试验前均有所降低。

表5 连续5年不同施钾量对红壤性水稻土钾含量的影响

Table 5 Effect of the 5-year continued K application on the K contents of reddish paddy soil

处理 Treat.	速效钾 Avail. K (mg/kg)	缓效钾 Slowly avail. K (mg/kg)	全钾 Total K (g/kg)
K0	46.8±0.9 eE	104.3±2.2 dD	9.03±0.05 cC
K1	65.0±3.0 dD	108.8±3.7 cC	9.08±0.05 bcC
K2	71.8±3.1 cC	111.0±3.3 bcBC	9.10±0.05 bBC
K3	80.7±6.4 bB	113.8±3.7 bB	9.18±0.05 aAB
K4	90.3±5.6 aA	121.5±6.0 aA	9.23±0.05 aA

注(Note):同列数值后不同小大字母表示差异达5%和1%显著水平 Values followed by different small and capital letters in the same column mean significant at the 5% and 1% levels, respectively.

2.6 施钾量对水稻经济效益的影响

从经济效益(表6)来看,早稻施钾量在0~156 kg/hm^{2}范围内,稻谷产值和增产值随施钾量的增加而提高;但当施钾量高于156 kg/hm^{2}时,稻谷产值和增产值反而降低;晚稻的稻谷产值和增产值随施钾量的增加而提高;早、晚稻稻谷产值和增产值主要与产量水平有关。从产投比来看,早、晚稻均以K2处理的产投比最大,当施钾量高于K2处理时,产投比随施钾量增加而降低,说明早晚稻均以K2处理的经济效益较好。

表 6　连续 5 年施钾对水稻经济效益的影响(yuan)

Table 6　Economic profits of K fertilization on rice from 2008 to 2012

处理 Treat.	早稻 Early rice				晚稻 Late rice			
	产值 Output	肥料投入 Fertilizer input	增产值 Increase	产投比 Output/input	产值 Output	肥料投入 Fertilizer input	增产值 Increase	产投比 Output/input
K0	11569	1120	—	—	14968	1063	—	—
K1	12125	1685	556	0.98	15704	1770	736	1.04
K2	12408	1928	839	1.04	16255	2073	1287	1.27
K3	12486	2170	917	0.87	16306	2376	1338	1.02
K4	12418	2413	849	0.66	16471	2679	1503	0.93

注(Note):2008、2009、2010、2 011 和 2012 年稻谷价格分别为早稻 1.84、2.10、2.16、2.34 和 2.76 yuan/kg,晚稻 1.88、2.14、2.24、2.44 和 2.86 yuan/kg;肥料 N 3.48、3.91、4.35、4.78 和 5.22 yuan/kg;P_2O_5 5.33、5.83、6.33、6.67 和 7.00 yuan/kg;K_2O 5.67、6.00、7.67、7.33 和 7.00 yuan/kg Price of production, unit price of fertilizer (yuan/kg): early rice grain 1.84, 2.10, 2.16, 2.34 and 2.76 in 2008, 2009, 2010, 2011 and 2012, respectively; late rice grain 1.88, 2.14, 2.24, 2.44 and 2.86 in 2008, 2009, 2010, 2011 and 2012, respectively; N 3.48, 3.91, 4.35, 4.78 and 5.22 in 2008, 2009, 2010, 2011 and 2012, respectively; P_2O_5 5.33, 5.83, 6.33, 6.67 and 7.00 in 2008, 2009, 2010, 2011 and 2012, respectively; K_2O 5.67, 6.00, 7.67, 7.33 and 7.00 in 2008, 2009, 2010, 2011 and 2012, respectively.

3　讨论与结论

生物量积累是水稻产量形成的基础,而生物量积累又与其体内的营养状况密切相关。钾是水稻生长必需的大量营养元素之一,充足的钾素营养对于提高水稻产量、改善稻米品质具有重要意义,钾素供应不足将限制水稻产量的提高。大量研究表明,施钾能够显著提高水稻产量[8-9],且晚稻施钾增产效果好于早稻[10]。王强盛等研究发现,在一定的钾肥施用量范围内,水稻产量随施钾量的增加而增加,当钾肥施用量继续增加,水稻产量呈现下降的趋势[11]。本研究连续 5 年定位研究的结果也表明,钾肥施用量在 K_2O 0 ~ 156 kg/hm^2 范围内,5 年早稻平均产量随施钾量增加而增加,当钾肥 K_2O 施用量高于 156 kg/hm^2 时,早稻平均产量随施钾量增加而下降;晚稻产量随钾肥施用量的增加而增加,但随钾肥施用量的增加不同施钾处理的产量差异变得不明显。由此可见,追求水稻高产稳产并不意味着钾肥无限度地增加施用量,合理施钾才是双季稻增产稳产的关键。同时,在考虑钾肥增加水稻产量时还应考虑钾肥投入的经济效益。在本试验中,早、晚稻所有处理中均以 K2 处理的产投比最大,均大于 1,同时早晚稻施钾水平高于 K2 处理时,水稻产量没有显著差异,因此,综合产量和经济效益因素,湖南双季稻生产中按早稻 120 kg/hm^2 和晚稻 150 kg/hm^2 K_2O 施入,不仅可以提高水稻产量,还可增加经济效益。

钾是作物正常生长必不可少的肥料三要素之一,其吸收、积累、转移和分配对水稻生产和产量形成至关重要[12]。本试验结果表明,施钾显著增加早、晚稻植株吸钾量,尤其是增加稻草中的钾素含量,这与前人的研究结果一致[13-15]。已有对氮、磷、钾在水稻地上部分分布的研究结果表明,水稻吸收的钾主要集中在稻草中[15],本试验结果表现出同样的趋势。同时,从本试验结果还可发现,施用钾肥增加了稻草吸钾量占水稻植株总钾吸收量的比例。K0 处理 5 年平均早、晚稻稻草中钾吸收量占早稻总钾吸收量的 83.2% 和 82.3%,而施钾处理的稻草钾吸收量占总钾吸收量的 86% 以上。这一结果说明水稻吸收的钾主要集中在营养器官(稻草)中,增施钾肥导致稻草中钾的分配率提高。钾肥施用后稻草中钾含量和积累量的提高对于稻草还田中钾的循环利用具有十分重要的意义,如何发挥稻草中的钾在水稻生产中的作用值得进一步深入研究。

长期不施钾肥土壤中的钾素含量呈明显下降趋势,施钾肥或钾肥与有机肥配施对土壤钾素下降有一定的延缓作用[16-17];国内外研究表明,长期施用钾肥有利于土壤全钾和速效钾的积累[18-19],范钦桢和谢建昌通过对我国 18 个长期定位试验中土壤速效钾和缓效钾含量的演变规律研究发现,长期施用钾肥有利于提高土壤中的速效钾和缓效钾含量[20]。本研究结果表明,连续定位 5 年 10 季水稻不施钾肥处理的土壤全钾、速效钾和缓效钾含量均较试验开始前有所降低;施钾处理的土壤缓效钾和速效钾含

量均高于试验前的含量,土壤全钾含量除 K4 处理外其他处理均低于试验前含量。这一结果说明施钾能提高土壤速效钾和缓效钾的含量,并对土壤全钾含量的下降有延缓作用。

大量试验结果表明,在目前施肥情况下,农田钾素一般处于亏缺状态,有的还严重亏缺[2,21-24]。姚源喜等[25]研究分析了 22 年肥料定位试验土壤中钾素收支平衡状况,发现长期只施用磷肥和钾肥土壤中钾素出现盈余,而氮、磷、钾肥同时施用则土壤中钾素呈现亏缺。中国农业科学院衡阳红壤试验站的多年水稻 - 水稻 - 紫云英(作绿肥)的轮作定位试验表明,每季肥料用量为 K_2O 84 kg/hm^2 时,NPK 处理 K_2O 年亏缺量为 42.6 kg/hm^2[26]。对于目前钾素较为丰富的土壤,若仅靠自身的循环,而作物带走的钾素得不到补充,即使目前作物不缺钾,但这种情况也不能持续;对于供钾潜力较低的土壤,由于土壤本身提供的钾素有限,若作物消耗的钾长期得不到补充,将会严重影响其他营养元素如氮、磷的效应[22],因此,为了维持或提高土壤钾素肥力,使作物高产、稳产,应充分注意土壤钾素的平衡问题。在本试验条件下,K2 处理的钾素略有亏缺,亏缺量为 10.8 kg/hm^2,当低于该施钾水平时则钾素亏缺量增大;K3 处理钾素盈余量为 48.0 kg/hm^2,当高于 K3 处理的施钾水平时,钾素盈余量有较大增长,因此,考虑土壤钾素表观平衡,在本试验条件下,早稻施 K_2O 120 ~ 156 kg/hm^2 和晚稻施 K_2O 150 ~ 195 kg/hm^{2}较为适宜。

在目前水稻种植条件下,只有坚持合理施用钾肥,才能提高水稻产量,或维持水稻稳产,促进钾素养分循环,保持农田钾素平衡,提高土壤钾素肥力。本文仅就红壤双季稻种植制度下,研究水稻产量、吸钾量和土壤钾素含量状况与施钾量之间的关系,探讨施钾量对水稻经济效益的影响,揭示不同钾肥投入情况下土壤钾素肥力变化的基本规律及其受各种因素的影响规律,并对土壤钾素状况及钾素平衡进行初步探讨,对于促进南方双季稻区科学合理施用钾肥具有一定的现实意义。但径流量和淋失量对钾素损失量的影响,冬闲期间处理间土壤钾素的不同损失量,耕层土壤(0—20 cm)以下土层的供钾情况,不同处理中土壤的固钾能力和含钾粘土矿物的变化等均有待今后做进一步研究。同时,由于钾肥施用后稻草中的钾含量和积累量大幅度提升,因此,其稻草的循环利用对于土壤钾素和钾肥效应的影响亟待更深入研究。

参 考 文 献:

[1] 湖南省统计局. 湖南统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
Hunan Province Statistical Bureau. Hunan statistical yearbook. [M]. Beijing: China Statistics Press, 2012.

[2] 谢建昌, 周健民, Hardter R. 钾与中国农业[M]. 南京: 河海大学出版社, 2000.
Xie J C, Zhou J M, Hardter R. Potassium in Chinese agriculture [M]. Nanjing: Hehai University Press, 2000.

[3] 金继运. 土壤钾素研究进展[J]. 土壤学报, 1993, 30(1): 94-101.
Jin J Y. Advances in soil potassium research [J]. Acta Pedologica Sinica, 1993, 30(1): 94-101.

[4] 金继运. 我国北方土壤缺钾及钾肥应用的发展趋势[A]. 中国农业科学院土壤肥料研究所,加拿大钾磷研究所北京办事处. 北方土壤钾素和钾肥效益[C]. 北京: 中国农业科技出版社, 1994. 1-5.
Jin J Y. Development of potassium application and lack of soil potassium in north China [A]. Soil and Fertilizer Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Peking Office of Canada Phosphorus and Potassium Institute. Soil K and yield responses in North China [C]. Beijing: China Agricultural Scientech Press, 1994. 1-5.

[5] 廖育林, 郑圣先, 黄建余, 等. 施钾对缺钾稻田土壤钾肥效应及土壤钾素状况的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(2): 255-260.
Liao Y L, Zheng S X, Huang J Y *et al*. Effect of application of K fertilizer on potassium efficiency and soil K status in deficit K of paddy soil [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24 (2): 255-260.

[6] 曾德武, 刘强, 彭建伟, 等. 不同稻田土壤钾素丰缺水平下施用钾肥的效应及对土壤肥力的影响[J]. 湖南农业科学, 2012, (3): 37-40.
Zeng D W, Liu Q, Peng J W *et al*. Effects of applying potassium fertilizer to paddy soil with different levels of potassium and impact of applying potassium fertilizer on soil fertility [J]. Hunan Agricultural Science, 2012, (3): 37-40.

[7] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Analysis methods of soil agricultural chemistry (3rd) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[8] 章秀福, 王丹英, 符冠富, 李华. 南方稻田保护性耕作的研究进展与研究对策[J]. 土壤通报, 2006, 37(2): 346-351.
Zhang X F, Wang D Y, Fu G F, Li H. Research progress and developing strategy in paddy field conservation tillage in the south of China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(2): 346-351.

[9] 黄小洋, 漆映雪, 黄国勤, 等. 稻田保护性耕作研究—Ⅰ免耕对水稻产量、生长动态及病虫数量的影响[J]. 江西农业大学学报, 2005, 27(4): 530-534.
Huang X Y, Qi Y X, Huang G Q *et al*. Studies on paddy field Conservation tillage Ⅰ. Effects of paddy field conversation tillage

on rice yield, growth dynamics and pest quantity [J]. Acta Agricultural Universitatis Jiangxiensis (Nat. Sci. Edn), 2005, 27 (4): 530-534.

[10] 陈防，鲁剑巍，万运帆，等. 长期施钾对作物增产及土壤钾素含量及形态的影响[J]. 土壤学报，2000，37(2)：233-241.
Chen F, Lu J W, Wan Y F *et al*. Effect of long term potassium application on soil potassium content and forms [J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(2): 233-241.

[11] 王强盛，甄若宏，丁艳锋，等. 钾对不同类型水稻氮素吸收利用的影响[J]. 作物学报，2009，35(4)：704-710.
Wang Q S, Zhen R H, Ding Y F *et al*. Effect of potassium application rates on nitrogen absorption and utilization of different types of rice [J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(4): 704-710.

[12] 黄绍文，金继运，王泽良，程明芳. 北方主要土壤钾形态及植物有效性研究[J]. 植物营养与肥料学报，1998，4(2)：156-164.
Huang S W, Jin J Y, Wang Z L, Cheng M F. Native potassium forms and plant availability in selected soils from northern China [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1998, 4(2): 156-164.

[13] 陈际型. 钾素营养对水稻根系生长和养分吸收的影响[J]. 土壤学报，1997，34(2)：182-188.
Chen J X. Effect of K nutrition on rice root growth and nutrient uptake [J]. Acta Pedologica Sinica, 1997, 34(2): 182-188.

[14] 黄科延，张爱武，曹芯，等. 稻草还田条件下施钾量对晚稻产量和钾素吸收的影响[J]. 湖南农业科学，2011，(7)：57-60.
Huang K Y, Zhang A W, Cao X *et al*. Influences of different potassium fertilizer rates on yield and potassium absorption of late-rice under rice-straw returning mode[J]. Hunan Agricultural Science, 2011, (7): 57-60.

[15] 曾德武，刘强，彭建伟，等. 不同钾肥用量对双季稻钾肥利用率的影响[J]. 中国稻米，2012，18(2)：30-32.
Zeng D W, Liu Q, Peng J W *et al*. Effect of different potassium fertilizer rates on K recovery efficiency in double-rice system [J]. China Rice, 2012, 18(2): 30-32.

[16] 刘树堂，姚源喜，隋方功，等. 长期定位施肥对土壤磷、钾素动态变化的影响[J]. 生态环境，2003，12(4)：452-455.
Liu S T, Yao Y X, Sui F G *et al*. Effects of long-term fertilization on dynamics of phosphorus and potassium in soil [J]. Ecology and Environment, 2003, 12(4): 452-455.

[17] 谭德水，金继运，黄绍文. 长期施钾与秸秆还田对西北地区不同种植制度下作物产量及土壤钾素的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2008，14(5)：886-893.
Tan D S, Jin J Y, Huang S W. Effect of long-term K fertilizer application and returning wheat straw to soil on crop yield and soil K under different planting systems in northwestern China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(5): 886-893.

[18] Dhanorkar B A, Borkar D K, Puranik R B, *et al*. Forms of soil potassium as influenced by long-term application of FYM and NPK in Vertisol[J]. Journal of Potassium Research, 1994, 10 (1): 42-48.

[19] Gigliotti G, Giusquiani P L, Businelli D. A long-term chemical and infrared spectroscopy study on a soil amended with municipal sewage sludge [J]. Agronomie, 2001, 21(2): 169-178.

[20] 范钦桢，谢建昌. 长期肥料定位试验中土壤钾素肥力的演变[J]. 土壤学报，2005，42(4)：591-599.
Fan Q Z, Xie J C. Variation of potassium fertility in soil in the long-term stationary experiment [J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(4): 591-599.

[21] 谢建昌，周健民. 我国土壤钾素研究和钾肥使用的进展[J]. 土壤，1999，31(5)：244-254.
Xie J C, Zhou J M. Progress on study of soil potassium and potassium fertilizer application in China [J]. Soils, 1999, 31 (5): 244-254.

[22] 郑圣先，罗成秀，戴平安. 湖南省主要稻田土壤供钾能力的研究[J]. 中国农业科学. 1989，22 (1)：75-82.
Zheng S X, Luo C X, Dai P A. Potassium supplying capacity of main paddy soil in Hunan province [J]. Scientia Agricultura Sinica, 1989,22(1): 75-82.

[23] 徐卫红，王正银，李传林. 施氮和不同品种水稻对紫色水稻土钾素形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2000，6(4)：389-396.
Xu W H, Wang Z Y, Li C L. Effect of nitrogen application and rice cultivars on forms of potassium in different purple paddy soils [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6 (4): 389-396.

[24] 廖育林，郑圣先，聂军，戴平安. 不同类型生态区稻-稻种植制度中钾肥效应及钾素平衡研究[J]. 土壤通报，2008，39(3)：612-618.
Liao Y L, Zheng S X, Nie J, Dai P A. Potassium efficiency and balance of the rice-rice cropping system in differen type of ecosytems [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(3): 612-618.

[25] 姚源喜，刘树堂，郇恒福. 长期定位施肥对非石灰性潮土钾素状况的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2004，10(3)：241-244.
Yao Y X, Liu X T, Huan H F. Effect of long-term fertilization on the status of potassium in noncalcareous fluvo-aguic soil [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(3): 241-244.

[26] 高菊生，徐明岗，董春华，等. 长期稻-稻-绿肥轮作对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. 作物学报，2013，39(2)：343-349.
Gao J S, Xu M G, Dong C H *et al*. Effects of long-term rice-rice-green manure cropping rotation on rice yield and soil fertility [J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(2): 343-349.