

# 秸秆还田下直播稻-油轮作的钾肥效应及适宜用量

李继福<sup>1</sup> 张旭<sup>1</sup> 冉娇<sup>1</sup> 潘晨<sup>1</sup>  
王雨晴<sup>1</sup> 李燕丽<sup>1</sup> 邹家龙<sup>2</sup> 陈华东<sup>3</sup>

1. 湿地生态与农业利用教育部工程研究中心/长江大学农学院, 荆州 434025;  
2. 荆州市荆州区农技推广中心, 荆州 434025; 3. 荆州市荆州区川店镇农技推广中心, 荆州 434025

**摘要** 2017—2018年在湖北省江汉平原开展钾肥一次性施用肥效田间试验,研究秸秆全量还田下钾肥用量对江汉平原直播水稻-油菜轮作产量及其构成因子、农田钾素表现平衡和钾肥(钾素)吸收利用率及农学利用率的影响,并结合肥效模型明确直播稻-油轮作的钾肥适宜用量。结果表明:钾肥施用能够显著提高直播水稻和油菜的产量、地上部干物质质量及钾素吸收,并通过增加直播水稻的密度、单位面积有效穗数、每穗粒数,结实率和直播油菜的密度、一级分枝数,角果总数来实现增产。秸秆不还田、周年钾肥投入量( $K_2O$ ) $360\text{ kg/hm}^2$ 条件下,轮作系统的钾素表现平衡仍为负值,亏缺量达 $85.4\text{ kg/hm}^2$ ;而秸秆全量还田下,年投入 $90\text{ kg/hm}^2$ 钾肥即可实现农田钾素表现盈余。直播水稻和油菜的钾肥农学利用率平均分别为 $10.6\text{ kg/kg}$ 和 $2.9\text{ kg/kg}$ ,而钾肥吸收利用率则为 $42.6\%$ 和 $54.1\%$ ,表明直播水稻施用钾肥增产效果明显高于油菜,同时也反映出直播油菜更依赖于外源钾肥投入。水稻季钾素农学利用率、吸收利用率与其钾肥农学利用率、吸收利用率结果一致,而油菜季的钾素农学利用率和吸收利用率则分别为 $2.1\text{ kg/kg}$ 和 $38.5\%$ ,均显著低于油菜季钾肥农学利用率和吸收利用率。根据线性加平台方程拟合并结合农田钾素平衡得出秸秆还田下直播水稻和油菜的钾肥适宜用量分别为 $62.31\text{ kg/hm}^2$ 和 $70.18\text{ kg/hm}^2$ ,对应的经济产量为 $10\ 066\text{ kg/hm}^2$ 和 $2\ 182\text{ kg/hm}^2$ ,比当地推荐钾肥用量分别减少 $44.4\%$ 和 $28.2\%$ ,且旱地直播油菜需要更多钾肥投入来支撑群体生长。因此,鉴于直播方式下作物生长对养分需求存在差异,应根据农业轻简化生产要求重视直播稻-油轮作的钾素养分管理,以提高作物产量、养分利用率和经济效益。

**关键词** 直播; 水稻-油菜轮作; 秸秆还田; 钾肥用量; 轻简化生产; 钾素表现平衡

**中图分类号** S 565.506 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2019)06-0077-09

长江中下游地区是我国重要的粮棉油生产基地,以水稻-冬油菜、水稻-冬小麦和冬小麦-棉花轮作为主要耕作模式<sup>[1-2]</sup>。城市化、农业供给侧结构改革和农业产值在家庭收入比重的不断下降等因素导致大量农村青壮年劳动力脱离第一产业,农业生产用工难和人工成本的上涨使农业种植结构及方式产生了根本性变革<sup>[3-5]</sup>。水稻、油菜和棉花轻简化生产如直播种植相比移栽方式具有省时、省工、高效和便于操作的优点而又受到农民的普遍重视<sup>[6-8]</sup>。尤其近年来,南方地区因油菜和棉花种植成本高、相对收益低而出现冬闲或改种玉米、大豆等省工作物的现象。因此,基于经济社会发展需求,农业种植轻简化将逐渐取代传统劳动密集型的精耕细作模式并成为一种

必然发展趋势<sup>[9-11]</sup>。

水稻、油菜作物的施肥轻简化如一次性施肥技术、缓控释肥技术<sup>[12]</sup>,免耕直播配方施肥技术等是生产轻简化的重要组成部分和环节,可节省后期追肥的劳动成本,稳定并扩大稻-油轮作的播种面积。然而,直播种植与移栽相比,二者在作物根系特征和生长发育进程方面存在明显差异,对土壤养分吸收利用也有所不同。已有研究表明,与机插秧相比,直播水稻分蘖期对养分消耗多,氮肥施用增加基肥比例的产量最高<sup>[6,13]</sup>。张洋洋等<sup>[14]</sup>在直播和移栽水稻钾肥施用方式上的结果显示直播稻钾肥一次性基施的综合效益略高于分次施用,而移栽水稻推荐基肥和穗肥并重施用。同时,直播油菜对磷、钾养分

收稿日期: 2019-05-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0200900);湖北省教育厅中青年人才项目(Q20181303);长江大学第十一批大学生创新创业训练计划项目(2018290)

李继福,博士,讲师。研究方向:作物养分管理与土壤肥力。E-mail: jifuli@yangtzeu.edu.cn

的需求也明显高于移栽油菜,且直播油菜在苗期(越冬期)对土壤养分的缺乏更为敏感<sup>[12,15]</sup>。王少华等<sup>[7]</sup>研究发现,与移栽油菜相比,苗期氮素供应不足,直播油菜减产90%以上,而氮素供应过多( $>270\text{ kg/hm}^2$ ),成活密度则显著下降。因此,直播水稻和油菜前期充足的养分供应能够为高产的产量构成因子形成奠定基础<sup>[16-18]</sup>。

当前直播水稻和油菜的施肥理论和技术研究多针对单季作物及氮肥施用,从整个作物轮作周期进行钾素养分统筹还相对较少<sup>[19-22]</sup>。不同于氮、磷肥投入,水稻-油菜轮作区作物秸秆全量还田年均带入的钾素总量约为 $340\text{ kg/hm}^2$ ,远高于化肥投入量<sup>[23]</sup>。连续秸秆还田能够减少移栽水稻和油菜当季钾肥用量的30%~40%<sup>[24]</sup>,此外,上述研究多基于移栽模式和分次施肥,而直播轮作条件下周年钾肥一次性施用的适宜用量还未可知。为此,本研究在湖北省粮油主要生产区江汉平原,选择中等供钾水平(速效钾含量 $100\sim 150\text{ mg/kg}$ )稻田开展直播水稻和直播冬油菜轮作田间试验,研究秸秆全量还田下钾肥一次性施用对直播稻-油轮作的增产效果、钾素吸收和钾肥(钾素)利用率的影响,并采用线性加平台模型拟合周年轮作的钾肥适宜用量,旨在为直播稻-油轮作的轻简化施肥技术及配套肥料产品研发提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况及供试材料

田间试验位于湖北省荆州市川店镇双店村(N $30.6^\circ$ ,E $112.3^\circ$ ,海拔 $68\text{ m}$ )。该试验地属亚热带季风气候区,日平均气温 $16.5\text{ }^\circ\text{C}$ ,年均降雨量 $1\,098\text{ mm}$ ,为河流冲积物发育而成的水稻土,质地偏黏性,常年为稻-油菜旱轮作模式,试验期间气温、降雨情况如图1所示。耕层(0~20 cm)土壤基本状况:pH $5.74$ ,有机质 $28.6\text{ g/kg}$ ,全氮 $0.84\text{ g/kg}$ ,碱解氮 $145.7\text{ mg/kg}$ ,有效磷 $9.5\text{ mg/kg}$ ,速效钾 $124.4\text{ mg/kg}$ 。

供试水稻品种为鄂科1号,油菜品种为华油杂62,直播用种量分别为 $75\text{ kg/hm}^2$ 和 $4.5\text{ kg/hm}^2$ 。

供试肥料品种为尿素(N $46\%$ )、过磷酸钙( $\text{P}_2\text{O}_5$  $12\%$ )、氯化钾( $\text{K}_2\text{O}$  $60\%$ )和硼砂(B $11\%$ )。

### 1.2 试验设计

试验采用一年两熟的中稻-冬油菜轮作模式,共

设5个钾肥水平,即 $0, 45, 90, 135$ 和 $180\text{ kg/hm}^2$ ,其中 $90\text{ kg/hm}^2$ 属当地推荐用量,水稻季和油菜季的钾肥用量均相同。水稻和油菜的氮肥和磷肥施用量也保持一致,分别为 $180\text{ kg/hm}^2$ 和 $90\text{ kg/hm}^2$ ;油菜季增施硼肥(硼砂) $15\text{ kg/hm}^2$ 。水稻和冬油菜的氮肥60%作基肥,40%作分蘖肥(越冬肥),磷、钾及硼肥均一次性基施。各小区的作物秸秆全量粉碎还田,与基肥混施翻压。第一季水稻前茬作物为冬油菜,秸秆还田量统一设置为 $4\,500\text{ kg/hm}^2$ ,秸秆还田投入钾素( $\text{K}_2\text{O}$ )总量约为 $133.6\text{ kg/hm}^2$ 。

各处理设置3次重复,小区面积 $20\text{ m}^2$ ,完全随机区组排列。

直播水稻于2017年5月20日撒播,田间保持薄层水面,9月25日收获。直播油菜于2017年10月4日撒播,2018年5月7日收获。田间生产根据轻简化栽培要求进行管理,即播种前喷施1次除草剂,作物生长期不除草;并根据农田病虫害发生的严重程度合理喷施农药。

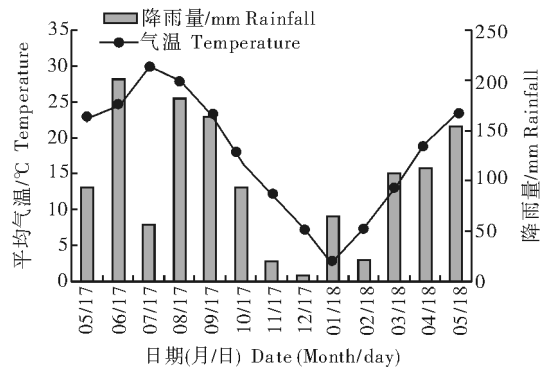


图1 直播稻-油轮作期间月均气温、降雨和光照状况  
Fig.1 Average monthly temperature, rainfall and sunshine duration in rice-rapeseed rotation during 2017-2018

### 1.3 样品采集与测定

水稻和冬油菜收获前1 d从各小区选择代表性植株样方 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ ,进行考种、密度和生长指标调查。水稻样品分为水稻秸秆和稻谷两部分;冬油菜样品分为茎秆、角壳和籽粒三部分,称取质量,估算秸秆干物质量。植物样品在 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中烘 $24\text{ h}$ ,磨碎,用 $1\text{ mol/L}$ 的盐酸溶液浸提,火焰光度法测定各部位钾含量,计算钾素吸收量。

产量按小区面积单打、单收,分别计产。

### 1.4 数据处理

钾肥农学利用率(KfAE, K fertilizer agronomic

efficiency)、钾肥吸收利用率(KfRE, K fertilizer recovery efficiency)、钾素农学利用率(KAE, K agronomic efficiency)、钾素吸收利用率(KRE, K recovery efficiency)和地上部钾素吸收量等计算参照文献[24]进行。

采用线性加平台模型拟合<sup>[25]</sup>钾肥适宜用量,线性加平台肥效模型: $y = ax + b (x \leq C); y = P (x > C)$ 。式中, $y$  为作物产量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ;  $x$  为钾肥用量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ;  $a$  为回归系数;  $b$  为截距(不施肥理论产量);  $C$  为直线与平台交点的对应  $x$  值;  $P$  为平台产量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。

试验数据采用 MS Excel 2016 处理和作图, 方差分析采用 OriginPro 9.0 软件处理并结合 SAS V8 软件的线性加平台模型拟合最优钾肥用量和理论经济产量, LSD 法检验差异显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 钾肥施用对直播稻-油生长的影响

钾肥施用可显著改善直播水稻的生长状况和产量构成因子(表 1)。不施钾肥时,直播水稻密度为  $16.2 \text{ 株}/\text{m}^2$ ,株高和穗长分别为 98 cm 和 24.4 cm,施钾后平均增幅依次为 17.3%、6.6% 和 4.1%,可见

钾肥施用可显著提高直播稻种植的成活率,对株高和穗长有一定的影响。对于产量构成因子,不施用钾肥时,直播水稻的有效穗数为  $140.4 \text{ 万}/\text{hm}^2$ ,每穗粒数 137 粒,结实率 76.3%,千粒重 27.3 g;随着钾肥用量增加,除千粒重外各指标均有不同程度增长,但当钾肥用量达到  $135 \text{ kg}/\text{hm}^2$  时,增幅并不明显,尤其钾肥用量达到  $180 \text{ kg}/\text{hm}^2$  时,单位面积有效穗数呈下降趋势。可见,钾肥合理施用主要是提高直播稻的密度、单位面积有效穗数、每穗粒数和结实率。

对于直播冬油菜,与不施钾肥相比,施钾处理冬油菜的生长指标密度、株高、主序长度、根茎粗平均增幅分别为 9.5%、5.7%、20.5% 和 11.1%,可见,钾肥施用可显著提高直播油菜的主序长度和根茎粗并在一定程度上提高生长密度;产量构成因子如一级分枝数、二级分枝数、有效角果数、籽粒数和千粒重则分别提高 35.0%、37.5%、21.6%、13.9% 和 2.3%,表明合理施用钾肥可显著提高直播油菜主序长度、有效分枝数和角果数,对油菜籽千粒重基本没有影响。同样,当施钾量达到  $90 \text{ kg}/\text{hm}^2$  时,随着钾肥用量增加,产量构成因子增幅并不显著。

表 1 钾肥用量对成熟期直播水稻生长的影响

Table 1 Effects of K application rate on the growth of direct-seeding rice in mature period

钾肥用量/ ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) $\text{K}_2\text{O}$ rate	密度/( $\text{株}/\text{m}^2$ ) Density	株高/cm Plant height	穗长/cm Panicle length	产量构成因子 Yield components			
				有效穗数/ ( $\text{万穗}/\text{hm}^2$ ) Panicle	每穗粒数 Spikelets per panicle	结实率/% Kernel set	千粒重/g 1 000-grain weight
0	16.2b	98b	24.4a	140.4c	137c	76.3c	27.3a
45	18.3a	101b	24.8a	183.0a	146b	80.5b	27.6a
90	19.5a	102ab	25.4a	183.3a	155ab	81.7b	28.0a
135	18.9a	106a	25.6a	181.4a	160a	85.4ab	28.5a
180	19.1a	110a	25.9a	175.8b	164a	88.5a	28.1a

注:同列数据中具有不同字母的数据有显著性差异( $P < 0.05$ ),下同。Note: Different letters for same item indicate  $P < 0.05$  (significant differences), the same as below.

表 2 钾肥用量对直播冬油菜生长的影响

Table 2 Effects of K application rate on the growth of direct-seeding rapeseed in mature period

钾肥用量/ ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) $\text{K}_2\text{O}$ rate	密度/ ( $\text{株}/\text{m}^2$ ) Density	株高/cm Plant height	主序长度/cm Length of main inflorescences	根茎粗/cm Root diameter	产量构成因子 Yield components			
					一级/二级分枝数 No. of 1st, 2nd branch	有效角果数 Pods per plant	每角粒数 Seeds per pod	千粒重/g 1 000-grain weight
0	25.1c	154b	75c	0.68b	5c/2b	173c	18c	3.32a
45	26.4b	157ab	80b	0.75a	6b/2b	192b	19b	3.28a
90	27.6a	161a	92ab	0.70ab	7a/3a	205ab	21ab	3.54a
135	28.4a	164a	89b	0.75a	7a/3a	210a	21ab	3.35a
180	27.5a	169a	101a	0.80a	7a/3a	228a	24a	3.41a

## 2.2 钾肥施用对直播稻-油菜产量的影响

方差分析结果(图 2)显示,钾肥施用有利于直播水稻和冬油菜产量及地上部干物质质量积累。不施用钾肥时,直播水稻和油菜的产量、地上部干物质总量分别为 8 927、15 136 kg/hm<sup>2</sup> 和 1 863、6 869 kg/hm<sup>2</sup>;随着钾肥用量增加,产量呈增加趋势。当钾肥用量达到推荐量 90 kg/hm<sup>2</sup>时,水稻和油菜产量比不施钾处理增加 999 kg/hm<sup>2</sup> 和 290 kg/hm<sup>2</sup>,增幅为 11.1% 和 15.6%,而水稻和油菜施钾的平均

增产量为 1 029 kg/hm<sup>2</sup> 和 285 kg/hm<sup>2</sup>,增幅达到 11.5% 和 15.3%。可见,钾肥用量分别达到 180 kg/hm<sup>2</sup> 和 135 kg/hm<sup>2</sup>时,虽然直播水稻和直播油菜的产量及地上部干物质质量达到最大值,但与其他施钾处理(90~135 kg/hm<sup>2</sup>)相比,增幅并不明显。此外,从收获指数来看,钾肥施用对直播水稻和油菜的收获指数没有显著影响,平均分别为 0.59 和 0.27,因此,产量的增加也会导致水稻秸秆和油菜秸秆干物质质量随之相应地增加。

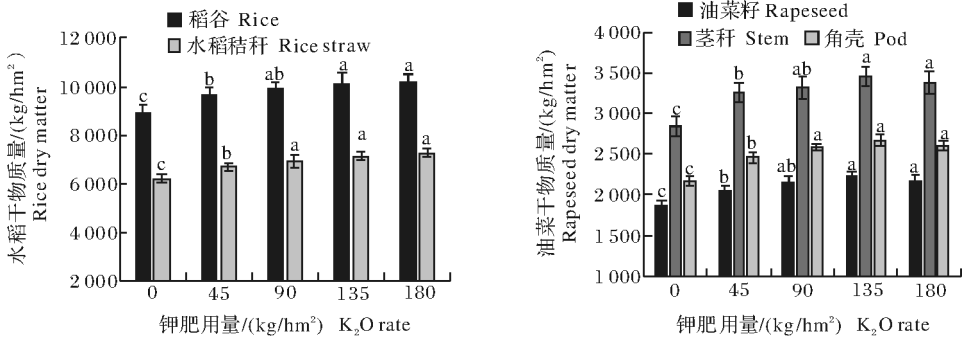


图 2 钾肥用量对直播水稻-油菜地上部干物质质量的影响

Fig.2 Effects of K application rate on the dry matter of direct-seeding rice-rapeseed rotation

## 2.3 钾肥施用对直播稻-油菜钾素吸收的影响

由图 3 可知,直播水稻和油菜地上部各组织部位的钾素吸收量差异较大,尤其随着施钾量的增加,水稻籽粒、秸秆和油菜的籽粒、茎秆及角壳吸钾量的增幅较为显著。不施钾肥时,水稻和油菜地上部的钾素吸收量分别为 183.7 kg/hm<sup>2</sup> 和 125.6 kg/hm<sup>2</sup>;钾肥处理的水稻和油菜地上部钾素吸收量比不施钾

处理分别增加 44.8 kg/hm<sup>2</sup> 和 56.6 kg/hm<sup>2</sup>,增幅为 24.4% 和 45.1%。此外,施用钾肥后水稻秸秆钾素吸收量为 171.5~204.8 kg/hm<sup>2</sup>,显著高于油菜秸秆(茎秆和角壳)的钾素吸收量(133.0~177.3 kg/hm<sup>2</sup>),且水稻和油菜增加的吸钾量中有 90.5% 和 91.0% 储存于秸秆中,而籽粒钾素吸收量的增加与籽粒钾含量无关,主要是产量增加导致。

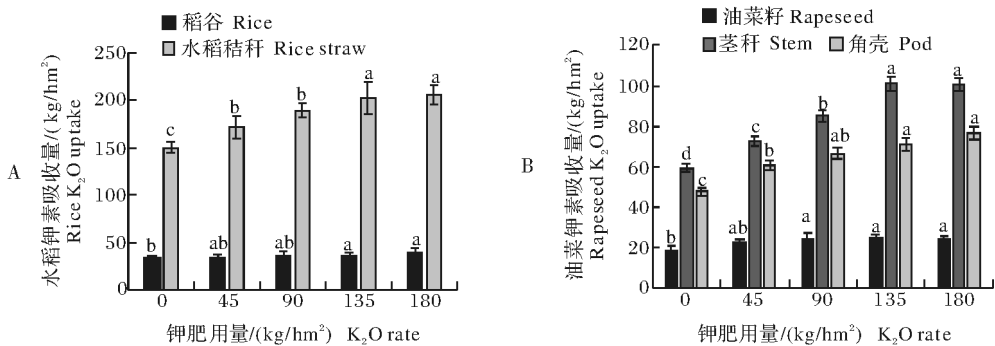


图 3 水稻和油菜钾素累积吸收量

Fig.3 Effects of K application rate on the K uptake of direct-seeding rice-rapeseed rotation

## 2.4 农田钾素表观平衡

图 4 为不同钾肥用量下水稻季、油菜季钾素投入量、作物收获产出量和农田钾素表观平衡,结果显示:不施用钾肥时,水稻季和油菜季的农田钾素亏缺

量为 183.7 kg/hm<sup>2</sup> 和 125.6 kg/hm<sup>2</sup>,随着钾肥投入量的增加,农田钾素亏缺减少。当钾肥投入量达到每季 180 kg/hm<sup>2</sup>后,水稻季和油菜季的钾素平衡仍为亏缺状态,亏缺量合计达每年 85.4 kg/hm<sup>2</sup>,且亏



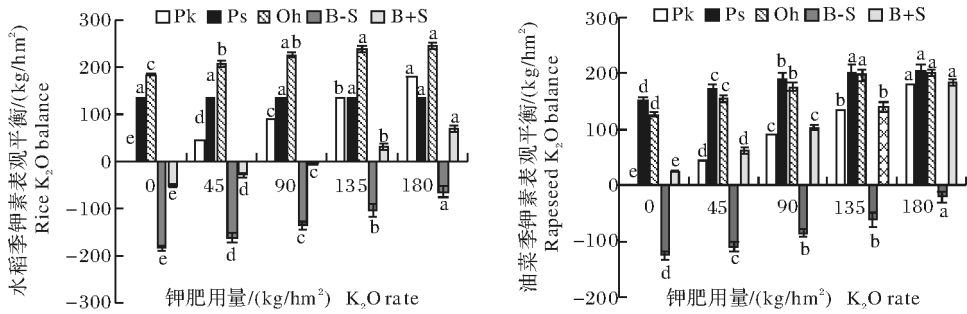


Fig.4 K apparent balance in direct-seeding rice and rapeseed  
 Pk: 钾肥投入量; Ps: 前茬作物秸秆钾素投入量; Oh: 当季作物收获钾量; B-S: 前茬不还田农田钾素平衡值; B+S: 前茬还田农田钾素平衡值。Pk: K-fertilizer input; Ps: Straw-K input; Oh: K harvest output; B-S: K apparent balance without straw incorporation; B+S: K apparent balance with straw incorporation.

图 4 农田钾素平衡

Fig.4 K apparent balance in direct-seeding rice and rapeseed

缺量为水稻季 > 油菜季。然而, 考虑到前茬作物秸秆如水稻秸秆和油菜秸秆还田带入的农田钾素, 水稻季钾肥用量为 90 kg/hm<sup>2</sup> 时, 农田钾素基本平衡 (-1.1 kg/hm<sup>2</sup>), 之后增施钾肥会有盈余。油菜季仅水稻秸秆还田且不施用钾肥, 就可以保证农田钾素表观平衡处于盈余状态 (24.5 kg/hm<sup>2</sup>)。由周年稻-油轮作钾素平衡结果可知, 在秸秆全量还田下, 年均投入 90 kg/hm<sup>2</sup> 钾肥即可实现农田钾素表观平衡, 且略有盈余 (33.3 kg/hm<sup>2</sup>)。

2.5 作物的钾肥(钾素)利用率

钾肥(钾素)吸收利用率和农学利用率对评估当季作物钾肥(钾素)施用效果具有重要意义<sup>[23]</sup>。试

验结果显示作物钾肥农学利用率和吸收利用率均与钾肥用量呈负相关性。在钾肥用量为 90 kg/hm<sup>2</sup> 时, 直播水稻和油菜的农学利用率分别为 11.1 kg/kg 和 3.2 kg/kg, 而施用钾肥 (45~180 kg/hm<sup>2</sup>) 的水稻和油菜平均钾肥农学利用率分别为 10.6 kg/kg 和 2.9 kg/kg, 表明钾肥施用越多, 钾肥效率越低, 且水稻施用钾肥的产量增量效果明显高于油菜。钾肥吸收利用率结果显示, 当钾肥用量达到 90 kg/hm<sup>2</sup> 时, 直播水稻和油菜的钾肥吸收利用率分别为 45.5% 和 55.8%, 显著低于 45 kg/hm<sup>2</sup> 钾肥用量处理。施用钾肥 (45~180 kg/hm<sup>2</sup>) 水稻和油菜钾肥吸收利用率平均分别为 42.6% 和 54.1%, 表明油

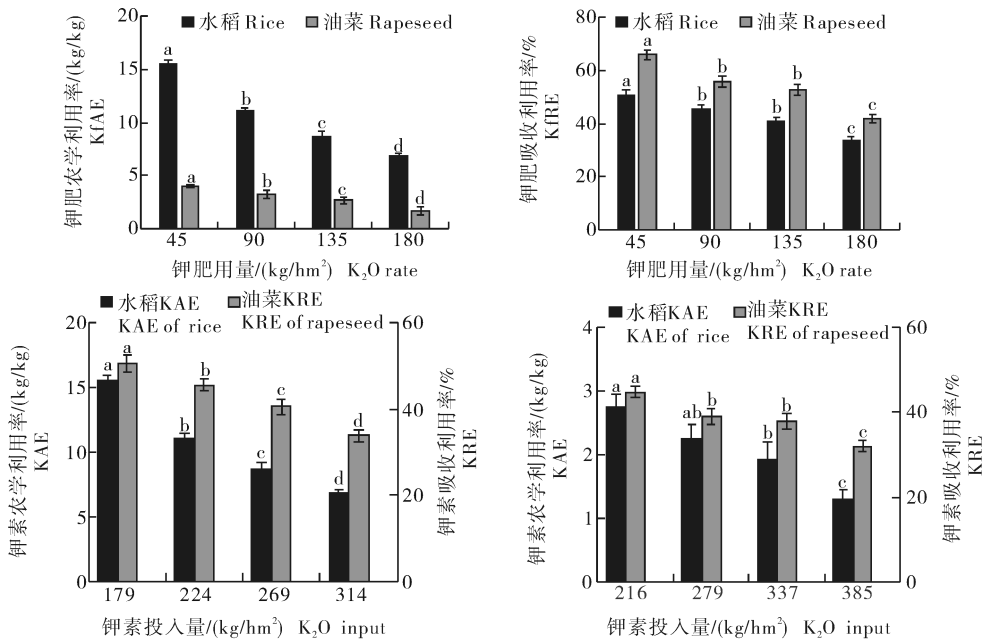
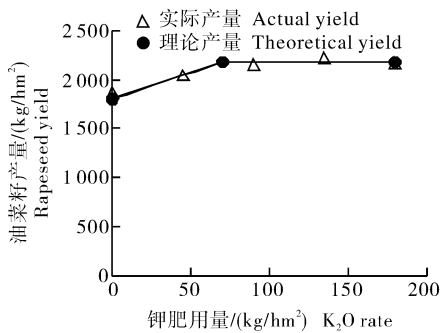


图 5 作物钾肥(钾素)吸收利用率和钾肥(钾素)农学利用率

Fig.5 K fertilizer efficiency and K efficiency of rice and rapeseed

菜季钾肥吸收利用效率高于水稻季。

相比钾肥利用率,钾素利用率考虑钾肥用量和秸秆还田钾素投入量。水稻季各处理的秸秆用量一致,因此,作物的钾素吸收利用率、钾素农学利用率与钾肥利用率相同。油菜季各处理秸秆钾素投入量不尽相同(图4),导致钾素利用率与钾肥利用率存在差异。从图5看出,油菜季的钾素农学利用率和钾素吸收利用率平均分别为2.1 kg/kg和38.5%,均显著低于钾肥农学利用率和钾肥吸收利用率,但趋势一致,即随着钾素投入量的增加,钾素利用率逐渐降低。



## 2.6 直播稻-油的钾肥适宜用量

采用线性加平台模型分别对钾肥施用量与直播水稻产量、直播油菜产量进行拟合,获取适宜钾肥用量和对应理论产量。从图6结果可知,直播水稻和直播油菜的肥效模型分别为 $y = 19.72x + 8837 (x \leq 62.31 \text{ kg/hm}^2)$ 和 $y = 3.45x + 1803 (x \leq 70.18 \text{ kg/hm}^2)$ ,相关系数 $r^2$ 分别为0.973和0.976,均达到极显著水平。根据拟合方程,可知本试验条件下直播水稻和直播油菜的经济钾肥用量分别为62.31 kg/hm<sup>2</sup>和70.18 kg/hm<sup>2</sup>,对应的理论经济产量分别为10 066 kg/hm<sup>2</sup>和2 182 kg/hm<sup>2</sup>。继续增加钾肥

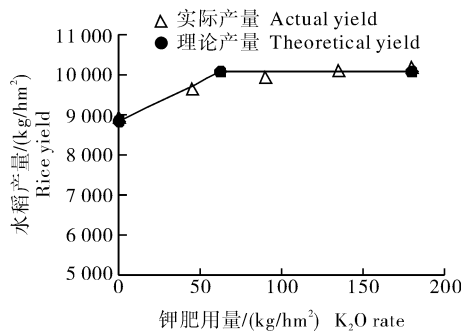


图6 直播水稻和冬油菜的钾肥适宜用量

Fig.6 Optimum rates of K<sub>2</sub>O for direct-seeding rice and rapeseed

投入量,虽然产量仍能小幅增加,但处理间并无显著差异,且会造成经济效益比重下降。

## 3 讨论

### 3.1 钾肥施用对直播稻-油生长的影响

钾是作物需求量仅次于氮的矿质营养元素,足够的养分供应是提高作物产量和改善品质的一项重要措施<sup>[12,16,26]</sup>。已有研究表明合理均衡的钾肥施用可延缓水稻和油菜的叶片衰老速率、提高叶面积指数、光合速率和营养物质的吸收与转运,从而增加作物的干物质量和钾素吸收量<sup>[20,27-28]</sup>。本研究结果表明,增施钾肥有利于直播水稻和油菜植株成活和生长发育。钾肥施用主要提高直播水稻产量构成因子的苗成活率、穗粒数和结实率,对单株有效穗数和千粒重影响不大;而直播油菜对产量贡献较大的则是密度、一级分枝数和角果数。相比移栽方式,直播水稻和油菜没有苗期的营养积累、生育期偏短,个体发育较弱,使得单株产量较低<sup>[12,14]</sup>,因此,直播高产的形成是依靠群体优势,其单位面积有效穗数或者有效角果数多则产量也较高。

与不施钾肥相比,施钾处理的直播水稻和油菜

平均产量增幅依次为11.5%和15.3%,钾素吸收量增幅则分别为24.4%和45.1%,植物对钾素吸收存在奢侈吸收的现象。对比前期已有研究结果发现,在秸秆还田和相同施肥水平(K<sub>2</sub>O 90 kg/hm<sup>2</sup>)下,移栽水稻和油菜产量分别为10 313 kg/hm<sup>2</sup>和2 169 kg/hm<sup>2</sup>,虽略高于直播产量,但差异并不显著<sup>[24]</sup>;增产量和增幅则相反,可见直播方式的施钾效果优于移栽方式。对比移栽和直播,水稻钾肥一次性基施与分次施用在产量上无显著性差异<sup>[14]</sup>。因此,在当前农业生产条件下,直播稻-油轮作钾肥一次性施用依然可以获得较高的产量且钾肥施用增产效果比移栽更为明显。综合该地区钾肥施用效果(产量相近)研究表明,在移栽方式下秸秆不还田时水稻和油菜的钾肥用量平均分别为96.6 kg/hm<sup>2</sup>和107.0 kg/hm<sup>2</sup><sup>[23]</sup>;秸秆还田时的钾肥适宜用量依次为52.0 kg/hm<sup>2</sup>和61.9 kg/hm<sup>2</sup><sup>[24]</sup>,而本研究秸秆还田直播的水稻、油菜钾肥适宜用量为62.31 kg/hm<sup>2</sup>和70.18 kg/hm<sup>2</sup>,这再次表明秸秆还田归还钾素可减少部分化学钾肥施用,但同时也反映出直播作物比移栽作物需要更多的钾肥投入才可达到相近的产量水平,可能原因在于直播作物收获指数偏低、要想获得高

产需要更大的群体结构,即积累更多的干物质量和吸收更多的养分。

### 3.2 钾肥施用对直播稻田钾素平衡的影响

农田养分表观平衡是评估土壤养分供应可持续和健康的重要指标,通常为投入量(化肥养分)与产出量(作物收获带走)的差值。由图4可知,当钾肥施用量达到最高值 $180\text{ kg/hm}^2$ 时,也不能满足作物因收获所带走的钾量,周年轮作系统亏缺量为 $85.4\text{ kg/hm}^2$ 。大量的肥效试验结果已证实,仅考虑化学钾肥的投入,我国农田钾素表观平衡整体处于严重亏缺状态<sup>[29]</sup>。但在当前农业生产中,大宗粮油类作物已基本实现秸秆全量还田。本研究将秸秆还田钾素量归于投入,则每季施用钾肥( $\text{K}_2\text{O}$ ) $45\text{ kg/hm}^2$ 即可实现周年农田钾素表观平衡。线性加平台拟合的方程显示直播水稻和油菜的钾肥推荐量分别为 $62.31\text{ kg/hm}^2$ 和 $70.18\text{ kg/hm}^2$ ,而稻谷和油菜籽每年带走的钾量约为 $36.1\text{ kg/hm}^2$ 和 $22.7\text{ kg/hm}^2$ ,在综合考虑到田间径流、下渗等钾素损失<sup>[30]</sup>,推荐钾肥用量不仅可以满足直播种植的高产、稳产需求,还可以维持并提高土壤表观平衡及有效钾含量。

另外,本试验直播水稻和油菜的钾肥吸收利用率和钾肥农学利用率平均分别为 $45.5\%$ 、 $10.6\text{ kg/kg}$ 和 $55.8\%$ 、 $2.9\text{ kg/kg}$ ,而当地移栽条件下的水稻和油菜钾肥利用率则分别为 $45.0\%$ 、 $5.1\text{ kg/kg}$ 和 $59.4\%$ 、 $3.2\text{ kg/kg}$ ,这表明一方面水稻和油菜的钾肥吸收利用率不受栽培方式的影响;另一方面直播水稻的钾肥单位生产力高于移栽水稻,水稻施肥的经济产量更高;而冬油菜则相反,直播油菜需要更多的钾肥支撑群体生长发育<sup>[31]</sup>,这与钾肥适宜用量的拟合结果相吻合。

然而,从图4可知,油菜季各处理的秸秆还田量和秸秆钾素投入量有显著差异,造成油菜季的钾肥利用率与实际状况并不相符,油菜钾肥利用率不能科学反映实际情况。为此,本研究引入钾素利用率,即各处理钾肥和秸秆钾的综合利用率。从图5可知,水稻季各处理秸秆钾素投入量一致,对钾素利用率没有明显的影响,而油菜季的钾素吸收利用率和农学利用率均显著低于钾肥利用率。总之,随着规模农业轻简化生产的不断推进,作物移栽模式下的肥料分次施用和养分管理方式在直播种植模式下并不完全适用,需要进一步完善和构建直播作物的养分综合管理措施,尤其在秸秆全量还田下可适当减

少肥料施用量,以提高肥料和秸秆养分的利用效率。

本研究结果表明,钾肥施用能够显著提高直播水稻和冬油菜的产量、地上部干物质量及钾素吸收,并通过增加直播植株的苗成活率、水稻单位面积有效穗数、穗粒数、结实率、冬油菜的一级分枝数、角果数来实现增产的效果。在秸秆全量还田条件下,通过线性加平台模型和农田钾素平衡得出直播水稻和油菜的钾肥适宜用量分别为 $62.31\text{ kg/hm}^2$ 和 $70.18\text{ kg/hm}^2$ ,比推荐钾肥用量 $90\text{ kg/hm}^2$ 分别减少 $44.4\%$ 和 $28.2\%$ ,并能够维持土壤钾素表观平衡和供钾能力。因此,鉴于直播和移栽方式下作物生长对养分需求存在差异,应根据农业轻简化生产特点重视直播稻-油的养分综合管理,以提高作物产量、养分利用率 and 经济效益。

### 参 考 文 献

- [1] YOUSAF M, LI J F, LU J W, et al. Effects of fertilization on crop production and nutrient-supplying capacity under rice-oil-seed rape rotation system [J/OL]. Scientific reports, 2017, 7 (1): 1270 [2019-05-06]. <https://www.nature.com/articles/s41598-017-01412-0.pdf>. DOI: 10.1038/s41598-017-01412-0.
- [2] 黄帅, 陈佛文, 李继福, 等. 长期施用钾肥对水旱轮作土壤供钾特性的影响[J]. 长江大学学报, 2018, 15(14): 1-5.
- [3] 韩上, 武际, 吴新民, 等. 安徽省直播冬油菜氮磷钾硼肥施用效果研究[J]. 中国土壤与肥料, 2015(1): 38-43.
- [4] 徐驰, 谢海宽, 丁武汉, 等. 油菜-水稻复种系统一次性施肥对 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 净排放的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 155-167.
- [5] 丁武汉, 谢海宽, 徐驰, 等. 一次性施肥技术对水稻-油菜轮作系统氮素淋失特征及经济效益的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1097-1109.
- [6] 许炜, 孙志贵, 贺贺培, 等. 播种和施肥方式对直播稻分蘖特性和产量的影响[J]. 华中农业大学学报, 2018, 37(3): 1-9.
- [7] 王少华, 刘涛, 周雄, 等. 低地地下施氮量对直播和移栽油菜产量和经济效益的影响[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(7): 41-43, 103.
- [8] 刘皓然, 刘爱玉, 谢陈灵, 等. 短季直播栽培对棉花株型结构及产量的影响[J]. 河南农业科学, 2019, 48(4): 41-45.
- [9] 武晓智, 曾庆四. 湖北省直播稻发展现状、存在问题及应对策略[J]. 农村经济与科技, 2017, 28(23): 154-155.
- [10] 李继福, 何俊峰, 陈佛文, 等. 中国棉花生产格局与施肥研究现状—基于CNKI数据计量分析[J]. 中国棉花, 2019, 46(4): 17-24, 28.
- [11] QIAN C, HE A, WANG W, et al. Comparisons of regeneration rate and yields performance between inbred and hybrid rice cultivars in a direct seeding rice-ratoon rice system in central China[J]. Field crops research, 2018, 223: 164-170.
- [12] 鲁剑巍, 任涛, 丛日环, 等. 我国油菜施肥现状及施肥技术研究

- 展望[J].中国油料作物学报,2018,40(5):712-720.
- [13] 韩超,许方甫,卞金龙,等.淮东北地区机械化种植方式对不同生育类型优质食味粳稻产量及品质的影响[J].作物学报,2018,44(11):1681-1693.
- [14] 张洋洋,鲁剑巍,王友珠,等.钾肥施用方式对直播和移栽水稻产量和钾肥利用效率的影响[J].作物杂志,2016(1):110-114.
- [15] MI W, ZHENG S, XIN Y, et al. Comparison of yield and nitrogen use efficiency of different types of nitrogen fertilizers for different rice cropping systems under subtropical monsoon climate in China[J]. European journal of agronomy, 2017, 90: 78-86.
- [16] YANG Y F, LIU S S, WU Y C. Effects of nitrogen fertilizer management on biological traits and physiological indexes at seeding stage and yield of directly-sown rapeseed (*Brassica napus* L.)[J]. Agricultural science & technology, 2017, 18(12): 2401-2405, 2414.
- [17] 陈雪飞,唐艳萍,谢英杰,等.我国机械化直播水稻生产技术研究进展[J].中国稻米,2018,24(4):9-15.
- [18] 孔飞扬,江立庚,文娟,等.直播水稻产量、产量构成因子和干物质积累的变化特点及其相互关系[J].华中农业大学学报,2018,37(5):11-17.
- [19] JIANG J, FAN H, PANG B, et al. Assessment of reactive nitrogen mitigation potential of different nitrogen treatments under direct-seeded rice and wheat cropping system[J]. Environmental science & pollution research, 2018, 25(20): 1-14.
- [20] SINGH V K, DWIVEDI B S, YADVINDER S, et al. Effect of tillage and crop establishment, residue management and K fertilization on yield, K use efficiency and apparent K balance under rice-maize system in north-western India[J]. Field crops research, 2018, 224: 1-12.
- [21] 张佑宏,王治虎,张舒,等.栽培方式对水稻生育进程、主要病害严重程度及产量的影响[J].华中农业大学学报,2019,38(3):1-6.
- [22] 蒋鹏,熊洪,张林,等.直播条件下氮素调控对超级稻产量和氮肥利用率的影响[J].核农学报,2018,32(10):2043-2053.
- [23] 肖克,唐静,李继福,等.长期水稻-冬油菜轮作模式下钾肥的适宜用量[J].作物学报,2017,43(8):1226-1233.
- [24] 李继福,薛欣欣,李小坤,等.水稻-油菜轮作模式下秸秆还田替代钾肥的效应[J].植物营养与肥料学报,2016,22(2):317-325.
- [25] 肖小军,吕伟生,余跑兰,等.三熟制油菜秸秆还田条件下施氮量对早稻产量形成和氮肥利用率的影响[J].作物杂志,2019(2):103-109.
- [26] 石洪芳,易志杰,杨特武,等.氮钾运筹模式对高花青素特种稻产量及糙米营养品质的影响[J].华中农业大学学报,2018,37(2):43-49.
- [27] LU Z F, PAN Y H, HU W S, et al. The photosynthetic and structural differences between leaves and siliques of *Brassica napus* exposed to potassium deficiency[J/OL]. BMC plant biology, 2017, 17(1): 240 [2019-05-06]. <https://bmcplantbiol.biomedcentral.com/track/pdf/10.1186/s12870-017-1201-5>. DOI:10.1186/s12870-017-1201-5.
- [28] 何海兵,杨茹,薛明明,等.水稻规模化种植模式下产量及经济效益评估[J].作物杂志,2016(5):152-155.
- [29] BAI Y L, WANG L, LU Y L, et al. Effects of long-term full straw return on yield and potassium response in wheat-maize rotation[J]. Journal of integrative agriculture, 2015, 14(12): 2467-2476.
- [30] 董艳红,王火焰,周健民.不同土壤钾素淋溶特性的初步研究[J].土壤,2014,46(2):225-231.
- [31] 蒯婕,王积军,左青松,等.长江流域直播油菜密植效应及其机理研究进展[J].中国农业科学,2018,51(24):4625-4632.

## Effects and optimum recommendation of K fertilizer for direct seeding rice-rapeseed under straw incorporation

LI Jifu<sup>1</sup> ZHANG Xu<sup>1</sup> RAN Jiao<sup>1</sup> PAN Chen<sup>1</sup> WANG Yuqing<sup>1</sup>  
LI Yanli<sup>1</sup> ZOU Jialong<sup>2</sup> CHEN Huadong<sup>3</sup>

1. *Engineering Research Center of Ecology and Agricultural Use of Wetland, Ministry of Education/College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 434025, China;*

2. *Agro-Tech Extension and Service Center of Jingzhou District, Jingzhou City, Jingzhou 434025, China;*

3. *Agro-Tech Extension and Service Center of Chuandian Town, Jingzhou District, Jingzhou City, Jingzhou 434025, China*

**Abstract** A on-farm experiment of potassium (K) fertilizer one-off application was conducted in Jingzhou City, Hubei Province from 2017 to 2018. The aim was to assess the K rate on yield, K apparent balance, K efficiency of rice-rapeseed rotation in Jiangnan Plain, and combined with the fertilizer efficien-



cy model to clarify the appropriate amount of K fertilizer. The results showed that the application of K fertilizer could significantly increase the yield of rice and rapeseed, the dry matter amount and K uptake of the aboveground, where the increasement came from the density, number of kernels, seed setting rate of rice and density, number of 1st branches and pods of rapeseed. When the K fertilizer input ( $K_2O$ ) reached  $360 \text{ kg/hm}^2$  per year, the K apparent balance in the rotation was still negative, and the deficit was  $85.4 \text{ kg/hm}^2$  without straw returning. On the contrary, the annual K balance of farmland could be achieved positively by inputting  $90 \text{ kg/hm}^2$  K fertilizer with straw incorporation. Compared with no K fertilizer application, the agronomic K fertilizer efficiency (KfAE) of rice and rapeseed applied with K fertilizer were  $10.6 \text{ kg/kg}$  and  $2.9 \text{ kg/kg}$ , where the K fertilizer recovery efficiency (KfRE) of those were  $45.5\%$  and  $54.1\%$ , respectively, indicating that the yield production of K fertilizer applied to direct seeding rice was significantly higher than that of rapeseed, and it also reflected from the side that rapeseed was more dependent on external K fertilizer than rice. Considering the input of straw K, the K efficiency (KAE and KRE) in rice season was consistent with that of KfAE and KfRE, while the KAE and KRE in rape season were  $2.1 \text{ kg/kg}$  and  $38.5\%$ , which were significantly lower than that of KfAE and KfRE. The comprehensive linear plus platform model and the K apparent balance of farmland showed that the suitable K fertilizer rate for direct seeding rice and rapeseed were  $62.31 \text{ kg/hm}^2$ ,  $70.18 \text{ kg/hm}^2$  and yield for  $10\ 066 \text{ kg/hm}^2$ ,  $2\ 182 \text{ kg/hm}^2$  under straw returning, respectively, which was lower than the recommended K fertilizer amount of  $90 \text{ kg/hm}^2$  at an average of  $44.4\%$  and  $28.2\%$ . The result indicated that direct seeding rapeseed required more K fertilizer to support population growth. Therefore, in view of the differences in crop growth and nutrient requirements under direct seeding and transplanting methods, the management of direct seeding nutrients should be lightly simplified according to agricultural production to improve crop yield, nutrient utilization and economic benefits.

**Keywords** direct-seeding; rice-rapeseed rotation; straw returning; K fertilizer rate; light simplified production; K apparent balance

(责任编辑: 张志钰)