

稻田不同供钾能力条件下秸秆还田替代钾肥效果

李继福¹, 鲁剑巍¹, 任涛¹, 丛日环¹, 李小坤¹, 周鹏¹, 杨文兵², 戴志刚²

(¹ 华中农业大学资源与环境学院/农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070; ² 湖北省土壤肥料工作站, 武汉 430070)

摘要: 【目的】研究稻田不同土壤供钾能力条件下, 秸秆还田配施钾肥对水稻产量、地上部钾素累积量以及钾肥利用率的影响, 为秸秆还田水稻钾肥合理施用提供科学依据。【方法】2011—2012 年在鄂中、江汉平原和鄂东地区的 10 个县(市)选择不同供钾水平田块布置水稻试验。根据湖北省第二次土壤普查制定的速效钾分级标准, 本文将土壤速效钾含量 $> 150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的试验点如钟祥和宜城归为高钾供应能力土壤(1 级水平), 简称为高钾土壤, 标记为 High-K; 土壤速效钾含量 $100\text{—}150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的试验点如团风、仙桃、洪湖和枝江归为中钾供应能力土壤(2 级水平), 简称为中钾土壤, 标记为 Middle-K; 土壤速效钾含量 $< 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的试验点如麻城、广水、鄂州和蕲春归为低钾土壤, 标记为 Low-K。试验共设 6 个处理, 分别为: (1) CK (-K); (2) +K; (3) +S; (4) S+1/3K; (5) S+2/3K; (6) S+K, 其中 K 和 S 分别表示钾肥和还田秸秆, 以此来考查当前推荐钾肥用量 ($\text{K}_2\text{O } 75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 对水稻的增产效果以及轮作模式下麦秆或油菜秸秆还田钾素对钾肥的替代作用。【结果】结果显示 CK 处理 (-K), 高钾、中钾和低钾土壤的稻谷产量分别为 $8\ 372$ 、 $8\ 710$ 和 $7\ 767 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 施钾和秸秆还田均可以不同程度地增加水稻产量和地上部钾素累积量。与 CK 相比, 高钾、中钾和低钾土壤均以秸秆还田配施钾肥处理的增产效果最显著, 增产量分别为 633 、 $1\ 098$ 和 $814 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 增幅分别为 7.7% 、 12.6% 和 12.5% ; 地上部钾素累积吸收增量分别为 40.2 、 56.5 和 $49.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 增幅分别为 15.9% 、 21.3% 和 36.8% 。在当前推荐钾肥用量条件下, 秸秆还田会造成高钾土壤的钾肥吸收利用率下降, 但可明显提高中钾和低钾土壤的钾肥吸收利用率; 同时秸秆还田也会显著降低高钾土壤的钾肥农学利用率, 但对中钾和低钾土壤的钾肥农学利用率没有明显影响。同钾肥利用率相比, 钾素利用率均有所降低, 但中钾土壤和低钾土壤的钾素利用率要显著高于高钾土壤的钾素利用率。通过对秸秆还田条件下钾肥用量与增产率、地上部钾素累积增幅的相关性分析得出高钾土壤和中钾土壤的推荐钾肥用量偏高。根据线性加平台肥效模型拟合得出, 在秸秆还田条件下, 高钾土壤田块(速效钾含量 $> 150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 适宜钾肥用量平均为 $38.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 比推荐用量减少 49.1% ; 中钾土壤田块(速效钾含量 $100\text{—}150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 适宜钾肥用量平均为 $60.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 比推荐用量减少 20.0% ; 而低钾土壤田块(速效钾含量 $< 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 增产效果显著, 推荐钾肥用量不足。【结论】因此, 短期秸秆还田条件下, 高钾和中钾土壤田块, 秸秆还田钾素可不同程度地替代部分化学钾肥施用; 而低钾供应田块推荐用量略显不足, 增施钾肥仍有较大的增产空间。

关键词: 稻田; 供钾能力; 秸秆还田; 钾肥; 替代效果

Effect of Straw Incorporation Substitute for K-Fertilizer Under Different Paddy Soil K Supply Capacities

LI Ji-fu¹, LU Jian-wei¹, REN Tao¹, CONG Ri-huan¹, LI Xiao-kun¹, ZHOU Li¹, YANG Wen-bing², DAI Zhi-gang²

(¹Resources and Environment College, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Arable Land Conservation in Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture, Wuhan 430070;

²Soil and Fertilizer Station of Hubei Province, Wuhan 430070)

收稿日期: 2013-04-24; 接受日期: 2013-09-04

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(201203013)、国家有机质提升项目、中央高校基本科研业务费专项(2012BQ059)、长江学者和创新团队发展计划项目(IRT1247)

联系方式: 李继福, E-mail: jifuli@webmail.hzau.edu.cn. 通信作者鲁剑巍, Tel: 027-61379276; E-mail: lunm@mail.hzau.edu.cn

Abstract: 【Objective】In order to provide a scientific basis for crop residue management and K fertilization, the effect of straw incorporation plus K-fertilizer on yield of rice, potassium (K_2O) accumulation amount of shoots and potassium efficiency under different paddy soil potassium levels was studied. **【Method】**A series of field trials were carried out to study the effect of recommended rate of potassium (K_2O 75 $kg \cdot hm^{-2}$) on rice production and whether straw potassium could replace chemical potassium under wheat-rice/rape-rice cropping systems in selected 10 counties in Ezhong, Jiangnan plain and Edong regions during 2011-2012. According to the second national soil census in Hubei province, trial sites (available K content $>150 mg \cdot kg^{-1}$), Zhongxiang (ZX) and Yicheng (YC) were classified as high potassium supply capacity soils, marked as high-K; the test points (available K content $100-150 mg \cdot kg^{-1}$), Tuanfeng (TF), Xiantao (XT), Honghu (HH) and Zhijiang (ZJ) were classified as middle potassium supply capacity soils, labeled as Middle-K; the test points (available K content $<100 mg \cdot kg^{-1}$), Macheng (MC), Guangshui (GS), Ezhou (EZ) and Qichun (QC) were normalized to low potassium supply capacity soil, labeled as Low-K. The field experiment was carried out in a randomized block design, including six treatments with three replications. The designed treatments were CK (-K), +K, +S, S+1/3K, S+2/3K, and S+K, where K and S denoted K fertilizer and straw, respectively. **【Result】**The results showed that the yield of CK treatment for high-K, middle-K and low-K soil were 8372, 8710 and 7767 $kg \cdot hm^{-2}$, respectively. However, the K-fertilizer and straw returning to field could increase yield of rice and K accumulation amount of shoots at varying degrees. The straw incorporation with K-fertilizer treatment got the best effect compared with CK treatment. The increased yields were 633, 1098 and 814 $kg \cdot hm^{-2}$, respectively and the yield increase rates were 7.7%, 12.6% and 12.5%, respectively for high-K, middle-K and low-K soils. The increased K accumulations were 40.2, 56.5 and 49.3 $kg \cdot hm^{-2}$ and the K increase rates were 15.9%, 21.3% and 36.8%, respectively. Straw incorporation could reduce the K_fRE (K fertilizer recovery efficiency) of high-K soil, but increase the K_fRE of middle-K and low-K soils, significantly. Meanwhile, straw returning to field also lowered the K_fAE (K fertilizer agronomic efficiency) of high-K soil, but enhanced the K_fAE of others. Compared with K_fRE and K_fAE , the KRE and KAE (K efficiency of straw-K with chemical-K) were reduced, but the KRE and KAE of middle-K and low-K soils were obviously higher than those of high-K soil. Under the straw returning to field condition, the correlation analysis between increase of yield, K accumulation and K-fertilizer amount indicated that the recommended rate of potassium was more than the actual demand of rice growth in high-K soil and middle-K soil. Using the fertilizer efficiency model and considering straw returning to field, the optimal amount of K-fertilizer was 38.2 $kg \cdot hm^{-2}$ for high-K soil (available potassium content $>150 mg \cdot kg^{-1}$), which was 49.1% less than the recommended amount in Hubei province. In the same way, the optimal amount of K-fertilizer was 60.0 $kg \cdot hm^{-2}$ for middle-K soil (available potassium content $100-150 mg \cdot kg^{-1}$), which was 20.0% less than the recommended amount. Whereas for low-K soil (available potassium content $<100 mg \cdot kg^{-1}$), the current recommended amount of K-fertilizer was deficient. **【Conclusion】** It was concluded that straw potassium could replace partial chemical potassium for higher soil K supply, but insufficient for lower soil K supply if more grain wants to be produced in short-term of straw incorporation.

Key words: paddy soil; K supply capacity; straw incorporation; K-fertilizer rate; substitute

0 引言

【研究意义】水旱轮作是中国重要的作物种植制度之一，主要分布于长江流域和淮海流域稻作区，以小麦-水稻轮作和油菜-水稻轮作播种面积最大^[1-2]。集约化高产条件下该地区作物收获带走的钾量每年约为210—360 $kg \cdot hm^{-2}$ ，而当前钾肥的投入远不能维持钾素平衡，农田钾素亏缺已成为农业生产持续发展的限制因素之一^[3-4]。对于如何提高土壤供钾能力、优化钾肥施用一直是研究的热点和难点^[5-7]，然而受到中国钾肥资源短缺和国际钾肥价格持续走高的影响，拓宽钾肥资源供应途径具有重要的理论和实践意义。中国作物秸秆年均资源量约为 $8.1 \times 10^8 t$ ，以小麦、油菜、玉米和水稻秸秆为主，而这些也是水旱轮作区最主要的秸

秆资源，折合纯钾 (K_2O) 约为 $1.2 \times 10^7 t$ ^[8]。**【前人研究进展】**研究表明，秸秆还田既可以避免资源浪费和环境污染^[9]，还可以提高土壤的养分水平，改善土壤结构和理化性状，优化农田生态环境，维持作物高产^[10]。虽然秸秆直接还田的腐解速率较慢，短期的作用效果并不明显^[11]，但作物吸收的钾素 80%以上存在秸秆中，这些钾素可以快速释放，是一种重要的速效性钾素资源，可与传统钾肥起到相同作用^[12]。相关研究表明，长期不施任何钾肥的条件下，秸秆还田与氮磷肥的配施对提高土壤速效钾的效果显著^[11,13]。**【本研究切入点】**然而对于秸秆还田下秸秆钾素利用以及替代化肥钾的研究鲜有报道，尤其在普遍施用化肥以促进作物高产的形势下，更加忽视了秸秆中钾素资源的开发及其可能带来的长远效益。**【拟解决的关键问**

题】本研究于2011—2012年在湖北省选择10个县(市)分别布置水稻田间试验,研究在土壤不同钾素供应能力下,秸秆还田配施钾肥对水稻产量及地上部钾素累积的影响,明确秸秆还田对钾肥利用率的影响,并探讨不同供钾水平下秸秆还田替代不同用量钾肥的效果及原因,以期为不同供钾能力稻田的钾肥合理配置及调控提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

2011—2012 年在湖北省 10 个县(市)选择不同供钾能力的田块,布置水稻季秸秆还田替代钾肥试验。各试验点供试土壤均为水稻土,供试土壤的基本性状

见表 1。速效钾含量常用来评价当季土壤的供钾能力,因此,按照湖北省第二次土壤普查制定的速效钾分级标准,本研究将速效钾含量 > 150 mg·kg⁻¹ 的试验点归为高钾供应能力土壤(1 级水平),简称为高钾土壤(标记为 High-K);速效钾含量 100—150 mg·kg⁻¹ 的试验点归为中钾供应能力土壤(2 级水平),简称为中钾土壤(标记为 Middle-K);速效钾含量 < 100 mg·kg⁻¹ 的试验点归为低钾土壤(标记为 Low-K)。高钾土壤试验点集中在鄂中地区,由 Q3 母质发育而成;中钾土壤试验点多分布于江汉平原,为河流冲积物发育的水稻土;而低钾土壤试验点主要分布于鄂东以及鄂东北大别山地区,为花岗片麻岩发育的水稻土^[14]。

表 1 供试土壤基本性状
Table 1 Basic properties of paddy soil in experimental sites

试验地点 Site	纬度 Latitude	经度 Longitude	pH	有机质 SOM (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg·kg ⁻¹)	缓效钾 Slowly available K (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg·kg ⁻¹)
钟祥东桥镇 Zhongxiang Dongqiao	31°05'56"	112°44'14"	6.8	23.2	1.3	5.6	376.5	168.0
宜城小河镇 Yicheng Xiaohe	31°45'21"	112°06'31"	6.2	28.1	1.5	10.8	743.9	150.2
团风团风镇 Tuanfeng Tuanfeng	31°41'59.7"	114°50'13"	5.8	22.5	1.4	9.4	698.9	111.1
仙桃彭场镇 Xiantao Pengchang	30°17'23"	113°28'50"	7.8	18.5	1.2	15.2	841.6	104.8
洪湖曹市镇 Honghu Caoshi	30°05'40"	113°15'54"	6.7	23.3	1.6	26.9	634.7	119.4
枝江仙女镇 Zhijiang Xiannv	30°29'30"	111°45'29"	5.7	28.3	1.5	12.1	712.4	100.9
麻城闫河镇 Macheng Yanhe	31°12'30"	115°6'20"	6.6	24.2	1.3	10.0	748.9	36.7
广水蔡河镇 Guangshui Caihe	31°42'32"	113°48'28"	5.3	18.0	1.0	5.0	217.7	56.3
鄂州蒲团乡 Ezhou Putuan	30°23'17"	114°43'3"	5.0	20.7	1.3	12.5	197.3	52.4
蕲春横车镇 Qichun Hengche	30°18'17"	115°22'40"	4.6	23.2	0.8	5.2	221.4	53.4

钟祥、广水、宜城和洪湖试验田为小麦-水稻轮作,还田秸秆为小麦秸秆,其它试验田均为油菜-水稻轮作,还田秸秆为油菜秸秆(茎秆和角壳)。供试水稻品种均为当地主推高产优质籼稻品种。水稻播种时间为 4 月下旬至 5 月上旬,移栽密度为 20.7 × 10⁴—26.1 × 10⁴ 穴/hm²。

1.2 试验设计

试验共设 6 个处理,分别为:(1)CK(-K);(2)+K;(3)+S;(4)S+1/3K;(5)S+2/3K;(6)S+K,其中 K 和 S 分别表示钾肥和还田秸秆,(4)—(6)是秸秆还田条件下不同钾肥用量。各地所有试验处理的 N、P₂O₅ 用量统一为 165 和 45 kg·hm⁻²,以保证氮磷正常供应;钾肥(K₂O)最高用

量为湖北省水稻平均推荐用量 75 kg·hm⁻²,具体用量见表 2。试验小区面积 18 m²,3 次重复,随机区组排列。小区间用宽 30 cm、高 30 cm 的土埂隔开,上覆盖薄膜,防止窜水窜肥。同时整个试验区外围用土埂围起,与保护行隔离,有独立的灌/排水沟,防止保护区与试验各小区窜水窜肥。氮肥用尿素(含 N 46%),磷肥用过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%),钾肥用氯化钾(含 K₂O 60%)。氮肥分 3 次施用,基肥:蘖肥:穗肥=2:1:1。磷肥在水稻移栽前作基肥一次性施入;钾肥分 2 次施用,基肥:穗肥=2:1。

秸秆用量:为保证试验一致性,根据各地秸秆生产水平,油菜-水稻轮作的秸秆全量处理统一用油菜茎秆和角壳各 2 250 kg·hm⁻²,计 4 500 kg·hm⁻²;小麦-水稻

表 2 各地还田秸秆种类、秸秆钾含量以及不同处理的钾肥和秸秆钾用量
Table 2 The types, K content of straw and rates of K-fertilizer, straw-K application in treatments

试验地点 Site	还田秸秆种类及钾含量		各处理化肥钾和秸秆钾用量 (K/S-K)					
	Types and K content of straw		Rates of K-fertilizer and straw-K application for treatments(kg·hm ⁻²)					
	秸秆种类 Straw types	秸秆钾含量 K content of straw (%)	CK K/S-K	+ K K/S-K	+ S K/S-K	S + 1/3K K/S-K	S + 2/3K K/S-K	S + K K/S-K
钟祥东桥镇 Zhongxiang Dongqiao	小麦 Wheat	2.46	0/0	75/0	0/132.8	25/132.8	50/132.8	75/132.8
宜城小河镇 Yicheng Xiaohé	小麦 Wheat	2.01	0/0	75/0	0/108.4	25/108.4	50/108.4	75/108.4
团风团风镇 Tuanfeng Tuanfeng	油菜 Rape	1.81	0/0	75/0	0/97.5	25/97.5	50/97.5	75/97.5
仙桃彭场镇 Xiantao Pengchang	油菜 Rape	2.20	0/0	75/0	0/118.8	25/118.8	50/118.8	75/118.8
洪湖曹市镇 Honghu Caoshi	小麦 Wheat	1.81	0/0	75/0	0/97.7	25/97.7	50/97.7	75/97.7
枝江仙女镇 Zhijiang Xiannv	油菜 Rape	3.10	0/0	75/0	0/167.4	25/167.4	50/167.4	75/167.4
麻城闫河镇 Macheng Yanhe	油菜 Rape	2.33	0/0	75/0	0/125.6	25/125.6	50/125.6	75/125.6
广水蔡河镇 Guangshui Caihe	小麦 Wheat	2.13	0/0	75/0	0/115.0	25/115.0	50/115.0	75/115.0
鄂州蒲团乡 Ezhou Putuan	油菜 Rape	1.24	0/0	75/0	0/67.2	25/67.2	50/67.2	75/67.2
蕲春横车镇 Qichun Hengche	油菜 Rape	1.81	0/0	75/0	0/97.5	25/97.5	50/97.5	75/97.5

油菜秸秆钾含量是茎秆：角壳=1：1 加权平均值；K 指各处理的钾肥 (K₂O) 用量；S-K 是各处理还田秸秆的钾素 (K₂O) 折含量
The K content of rape straw is the weighted average of stem and shell (stem：shell=1:1); K is rate of potassium fertilizer (K₂O) for each treatment and S-K is rate of potassium (K₂O) released by straw for each treatment

轮作的秸秆全量处理统一用小麦秸秆 4 500 kg·hm⁻²，秸秆还田投入的钾素总量见表 2。所有秸秆在还田前避免淋雨，防止钾素淋失。秸秆经过机器粉碎，长度约为 10 cm，并于基肥施用前 1—3 d 翻压、整平。

生产管理：田间生产管理均按当地实际生产措施进行，并适时防治病虫害。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤基础样品测定 土壤样品均在前茬小麦（油菜）收获后采集。以整个试验田块为采样单元，在试验田块内均匀布点 30 个，取 0—20 cm 耕层土壤，拣出杂草和碎石，按照“四分法”取 1 kg 带回实验室于阴凉、通风处风干并用木槌磨细过 0.85 mm 筛，置于干燥处保存。土壤基本理化性质按常规方法测定^[15]。

1.3.2 测产 水稻收获前 1 d 每个小区选取有代表性的水稻植株 10 蔸，风干，分为稻草和稻谷两部分并称重，用以测定养分和估算谷草比，评估单位面积稻草干物质生产量。水稻收获时各小区单打单收，以风干重计产。

1.3.3 植株养分测定 还田秸秆以及采集的水稻样品风干后，在 60 ℃ 烘箱中继续烘 24 h，磨碎，用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消解，火焰光度法测定钾素含量。

1.4 数据分析

采用线性加平台拟合钾肥适宜用量^[16]：

线性加平台肥效模型：
$$y = \begin{cases} a + bx & (x \leq C) \\ P & (x > C) \end{cases}$$

式中，y 为稻谷产量 (kg·hm⁻²)，x 为钾肥用量 (kg·hm⁻²)，a 为截距，b 为回归系数，C 为直线与平台的交点，P 为平台产量(kg·hm⁻²)。当 b > Px / Py，C 即为推荐施钾肥用量；Px 为 2012 年 K₂O 价格 (4.5 元/kg)，Py 为 2012 年稻谷最低收购价格(2.5 元/kg)；当 b < Px / Py 时，推荐施钾量为 0。

施钾增产量 (kg·hm⁻²) = 施钾区产量-不施钾区产量；

施钾增产率 (%) = 施钾增产量/不施钾区产量 × 100%；

还田秸秆钾素用量 (total K₂O returning to field，TKR)=还田秸秆钾素含量 × 还田秸秆干物质质量 × 1.2；

地上部吸钾量 (total K₂O accumulation，TKA) (kg·hm⁻²) =收获期地上部干物质重 × 植株含钾量 × 1.2；

钾肥吸收利用率 (K fertilizer recovery efficiency，K_fRE) (%) =施钾肥地上部吸钾增量/钾肥用量 × 100%；

钾肥农学利用率 (K fertilizer agronomic efficiency，K_fAE) (kg·kg⁻¹) =施钾肥增产量/钾肥用量；

钾素吸收利用率 (K recovery efficiency，KRE) (%) = (S+K 处理地上部吸钾量-CK 处理地上部吸钾量) / (秸秆钾素用量+钾肥用量) × 100%；

钾素农学利用率 (K agronomic efficiency, KAE) ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) = (S+K 处理产量 - CK 处理产量) / (秸秆钾素用量 + 钾肥用量)。

试验数据用 MS Excel 2010 和 SAS.V8 计算处理, LSD 法检验 $P < 0.05$ 水平上的差异显著性。

2 结果

2.1 秸秆还田配施推荐钾肥用量对水稻产量的影响

不施钾时 (CK), 高钾、中钾和低钾土壤的水稻产量分别为 $8\,372$ 、 $8\,710$ 和 $7\,767 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 施用钾肥和秸秆还田均能不同程度地增加水稻产量 (表 3)。与 CK 处理相比, 施用钾肥后, 高钾、中钾和低钾土

壤的平均增产量分别为 263 、 751 和 $621 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 增产率分别为 3.1% 、 7.7% 和 8.4% , 说明土壤供钾能力越低, 施钾肥的增产效果越好。秸秆还田处理, 以高钾土壤的增产率最高, 为 5.5% , 而中钾和低钾土壤相对较低。秸秆还田配施钾肥处理的增产效果最好, 与 CK 处理相比, 高钾、中钾和低钾土壤的增产量依次为 633 、 $1\,098$ 和 $814 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 增产率分别为 7.7% 、 12.6% 和 12.5% 。可见在秸秆还田的基础上, 施用当前推荐钾肥用量, 中钾和低钾土壤的增产效果要优于高钾土壤。总体而言, 高钾土壤的增产效果表现为 $S+K > +S > +K$, 中钾和低钾土壤的增产效果为 $S+K > +K > +S$ 。

表 3 秸秆还田配施推荐钾肥用量对水稻产量的影响

Table 3 The effects of straw incorporation and recommended rate of K-fertilizer on the yield of rice

供钾水平 K levels	处理 Treatments	产量 Yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	增产量 Increasing yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	增产率 Yield increase rate (%)
高钾土壤 High-K	CK	$8372 \pm 963 \text{ a}$	-	-
	+K	$8635 \pm 955 \text{ a}$	263 ± 108	3.1 ± 0.4
	+S	$8852 \pm 808 \text{ a}$	480 ± 156	5.5 ± 2.3
	S+K	$9005 \pm 810 \text{ a}$	633 ± 153	7.7 ± 2.7
中钾土壤 Middle-K	CK	$8710 \pm 825 \text{ b}$	-	-
	+K	$9460 \pm 889 \text{ ab}$	751 ± 234	7.9 ± 2.2
	+S	$9023 \pm 898 \text{ ab}$	314 ± 170	4.3 ± 0.3
	S+K	$9808 \pm 990 \text{ a}$	1098 ± 344	12.6 ± 3.9
低钾土壤 Low-K	CK	$7767 \pm 586 \text{ b}$	-	-
	+K	$8376 \pm 605 \text{ ab}$	621 ± 41	8.4 ± 2.3
	+S	$8019 \pm 550 \text{ ab}$	274 ± 46	4.0 ± 1.8
	S+K	$8503 \pm 529 \text{ a}$	814 ± 82	12.5 ± 3.0

不同小写字母表示处理之间差异显著性 ($P < 0.05$)。下同 Different small letters mean significant difference at $P < 0.05$ on treatments. The same as below

2.2 秸秆还田配施推荐钾肥用量对水稻地上部钾素累积的影响

不施钾时 (CK), 高钾、中钾和低钾土壤的水稻地上部钾素累积量分别为 252.6 、 265.2 和 $170.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 低钾土壤上水稻吸收的钾量要远小于其它两种土壤。与 CK 相比, 施用钾肥后, 地上部钾素累积增量依次为 32.0 、 39.4 和 $27.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 增幅分别为 11.3% 、 12.9% 和 15.9% , 这和产量的增产趋势表现一致。秸秆还田时, 高钾土壤的地上部钾素累积增加量大于中钾和低钾土壤, 为 $39.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 但增幅最大的是低钾土壤和高钾土壤, 分别为 11.1% 和 10.1% ; 其次是中钾土壤, 仅为 4.9% 。秸秆还田配施钾肥处理, 中钾土壤钾素吸收增量最大, 为 $56.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 低钾和高钾土壤

的钾素吸收增量分别为 49.3 和 $40.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 但增幅依次分别为 21.3% 、 36.8% 和 15.9% 。可见, 高钾、中钾和低钾田块进行秸秆还田配施钾肥均能不同程度地增加水稻地上部钾素累积量。

2.3 秸秆还田配施钾肥对钾肥 (素) 利用率的影响

从图 1-A 中可以看出, 秸秆不还田时, 高钾、中钾和低钾土壤的钾肥吸收利用率分别为 42.7% 、 52.5% 和 36.1% , 表明在当前钾肥用量条件下, 中钾土壤的钾肥吸收利用率最高。秸秆还田后, 不同供钾能力土壤的钾肥吸收利用率差异较大, 尤其是高钾土壤的钾肥吸收利用率为 19.7% , 降幅尤为明显, 中钾和低钾土壤的钾肥吸收利用率有所提高, 分别为 57.1% 和 43.0% , 比秸秆不还田处理分别增加了 4.6% 和 6.9% 。

表 4 秸秆还田配施推荐钾肥用量对水稻地上部钾素累积量的影响

Table 4 The effects of straw incorporation and recommended rate of K-fertilizer on the total K uptake of rice

供钾水平	处理	钾素 (K ₂ O) 吸收总量	钾素 (K ₂ O) 吸收增量	增幅
K levels	Treatments	Total K uptake (kg·hm ⁻²)	Increasing K accumulation (kg·hm ⁻²)	Increase rate (%)
高钾土壤 High-K	CK	252.6±5.9 b	-	-
	+K	284.6±4.2 a	32.0±1.7	11.3±0.8
	+S	278.0±7.1 a	25.4±1.3	10.1±0.3
	S+K	292.7±5.9 a	40.2±0.1	15.9±0.3
中钾土壤 Middle-K	CK	265.2±11.6 b	-	-
	+K	304.6±16.3 a	39.4±7.5	12.9±2.0
	+S	278.9±13.3 b	13.7±3.3	4.9±1.1
	S+K	321.7±21.1 a	56.5±14.5	21.3±5.3
低钾土壤 Low-K	CK	170.1±19.6 c	-	-
	+K	193.5±21.4 b	27.1±4.1	15.9±3.7
	+S	184.6±17.3 b	17.1±4.0	11.1±3.6
	S+K	212.5±17.4 a	49.3±7.6	36.8±5.6

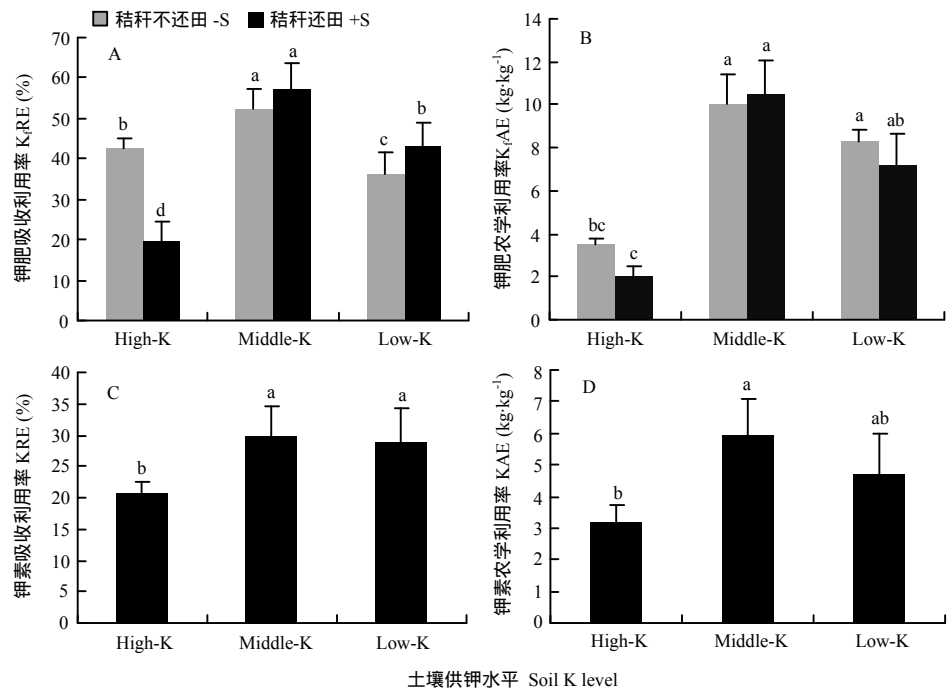


图 1 秸秆还田对钾肥（素）利用率的影响

Fig. 1 The effects of straw incorporation and K-fertilizer on the K_fRE (KRE) and K_fAE (KAE)

而图 1-B 表明，秸秆不还田时，高钾、中钾和低钾土壤的钾肥农学利用率分别为 3.5、10.0 和 8.3 kg·kg⁻¹，以中钾和低钾土壤的钾肥农学利用率较高。秸秆还田后，除高钾土壤的钾肥农学利用率降幅较大外，中钾和低钾土壤的钾肥农学利用率基本没有明显变化。可

见，秸秆还田会降低高钾土壤的钾肥吸收利用率和农学利用率，而对中钾和低钾土壤，则可以提高钾肥吸收利用率，但对钾肥农学利用率没有显著影响。

图 1-C 和图 1-D 是秸秆还田配施推荐钾肥用量对钾素利用率的影响。结果表明，高钾、中钾和低钾土

壤的钾素利用率分别为 20.6%、29.7%和 28.9%，中钾和低钾土壤的钾素吸收利用率没有差异，但均显著高于高钾土壤的钾素吸收利用率。然而同钾肥吸收利用率（图 1-A）相比，不同供钾能力土壤的钾素吸收利用率均显著降低。高钾、中钾和低钾土壤的钾素农学利用率分别为 3.2、5.9 和 4.7 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，趋势同钾素吸收利用率相似。

2.4 秸秆还田条件下钾肥用量与增产率、地上部钾素累积增幅相关分析

秸秆还田条件下，随着钾肥用量的增加，不同供钾能力土壤的增产率不尽相同（图 2-A）。对高钾、中钾和低钾土壤的增产率与钾肥用量进行线性拟合得出各自的方程分别为 $y=0.0346x$ ($r=0.679$)、 $y=0.1258x$ ($r=0.975^*$) 和 $y=0.0961x$ ($r=0.977^*$)。这表明高钾土壤随着钾肥用量的增加，增产率并非线性增加，从图中也可以看出，钾肥用量超过 50 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 后，增产

率呈下降的趋势。虽然中钾土壤的钾肥用量和增产率相关性显著，但当钾肥用量从 50 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增加到 75 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时，钾肥用量提高了 30%，而增产率从 7.6% 增加到 8.8%，仅增加了 1.1%，说明钾肥用量过多。而低钾土壤钾肥用量从 50 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增加到 75 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时，增产率增加了 3.8%，说明钾肥用量相对不足，增施钾肥仍有较大的增产空间。

同样，对高钾、中钾和低钾土壤的水稻地上部钾素吸收增幅与钾肥用量进行线性拟合得出各自的方程分别为 $y=0.0895x$ ($r=0.798$)、 $y=0.2171x$ ($r=0.995^{**}$) 和 $y=0.2658x$ ($r=0.994^{**}$)（图 2-B）。可见高钾土壤的钾素吸收增幅与钾肥用量相关性不显著。而对于中钾和低钾土壤，随着钾肥用量的增加，钾素吸收增幅也呈增加趋势，但中钾土壤存在钾素奢侈吸收现象，低钾土壤则需要补充更多的钾素来满足水稻生长、增产需求。

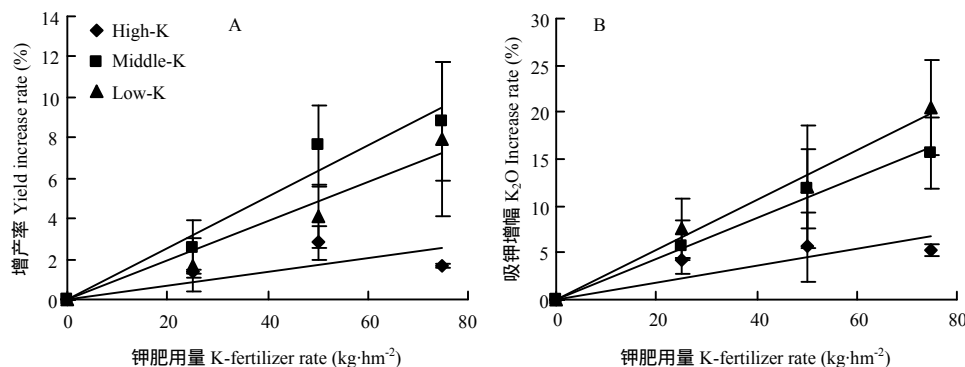


图 2 秸秆还田条件下钾肥用量与水稻增产率、地上部吸钾量增幅相关性

Fig. 2 The relationship between increases of yield, K accumulation and K amount under straw incorporation

2.5 秸秆还田水稻钾肥适宜用量研究

由图 2 结果可知，秸秆还田条件下，高钾土壤试验区水稻钾肥用量为 75 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时，增产率呈现下降的趋势，钾肥用量相对过多；而对于低钾土壤试验区，该用量条件下仍有较高的增产率，钾肥用量相对不足。根据钾肥用量和实际产量，通过线性加平台肥效模型拟合，得出高钾和中钾土壤的最佳钾肥用量（表 5）。高钾土壤钟祥和宜城试验点，水稻最低理论产量分别为 8 281 和 9 423 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，即短期秸秆还田不施用钾肥情况下水稻产量仍高于施钾肥的实产，与表 3 的产量结果一致。最高理论产量分别为 8 447 和 9 423 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，比施钾处理实产分别增加 488 和 348 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，对应最佳的钾肥用量分别为 36.1 和 40.4 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，平

均为 38.2 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，比推荐用量平均减少 49.1%。中钾土壤各试验点通过线性平台拟合得出的最低理论产量均低于施用钾肥处理的实产，这也和表 3 的产量结果一致。肥效模型得出中钾土壤试验点的最佳钾肥用量平均为 60.0 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，比推荐钾肥用量平均减少 20%，且能取得较高的产量。

3 讨论

3.1 施钾和秸秆还田对不同供钾土壤增产效果的影响

已有研究表明施钾肥或者秸秆还田均可以不同程度地增加小麦、玉米和水稻等作物的产量^[11,17-19]。本研究也证实在不同供钾土壤上进行施钾或秸秆还田有

表 5 秸秆还田条件下稻田适宜钾肥用量

Table 5 The optimum recommendation amount of K-fertilizer for rice under straw incorporation

土壤类型	试验点	最低产量	最高产量	最佳施肥量	R^2	施钾实产	钾肥减少比例
Soil type	Site	Minimum yield	Maximum yield	Optimum K ₂ O rate		Yield	Ratio of reduced K ₂ O
		(kg·hm ⁻²)	(kg·hm ⁻²)	(kg·hm ⁻²)		(kg·hm ⁻²)	(%)
高钾土壤 High-K	钟祥东桥镇 Zhongxiang Dongqiao	8281	8447	36.1	0.976*	7959	51.9
	宜城小河镇 Yicheng Xiaohe	9423	9658	40.4	0.739	9310	46.1
中钾土壤 Middle-K	团风团风镇 Tuanfeng Tuanfeng	9798	10375	62.7	0.961*	9945	16.4
	仙桃彭场镇 Xiantao Pengchang	9682	10604	58.6	0.955*	10308	21.9
	洪湖曹市镇 Honghu Caoshi	8333	9852	56.1	0.963*	9308	25.2
	枝江仙女镇 Zhijiang Xiannv	8101	8400	62.6	0.961*	8280	16.5

一定的增产效果。然而从表 2 中可以看出，各地秸秆还田投入的钾素总量多高于水稻钾肥推荐用量，但除高钾土壤试验外，中钾和低钾土壤均是+K 处理的增产效果优于+S 处理。可见，在评价秸秆钾和化学钾肥的增产效果时，土壤供钾能力及土壤地力水平是一个重要的影响因素。本研究选择的高钾土壤试验点，位于鄂中，综合地力水平高，缓冲能力较强^[14,20]。中钾土壤主要在江汉平原，多为河流冲击物发育的水稻土，生产力水平高于高钾土壤、养分消耗较多，缓冲能力相对不如高钾土壤。低钾土壤质地为偏砂性土，缓冲能力最弱。故在中钾和低钾区开展秸秆还田需要配施一定的钾肥，以满足作物增产需求。

3.2 施钾和秸秆还田对不同供钾土壤钾肥(素)利用率的影响

研究表明土壤供钾能力越低，钾肥的施用效果越明显，钾肥利用效率更高^[21]，但本试验结果却表现不一。中钾土壤的钾肥吸收利用率和农学利用率均为最高，分别为 52.5%和 10.0 kg·kg⁻¹；低钾土壤的钾肥吸收利用率最低，仅为 36.1%，但农学利用率却与中钾土壤没有差异；高钾土壤的钾肥吸收利用率可达 42.7%，而农学利用率仅为 3.5 kg·kg⁻¹。这可能与推荐钾肥用量、产量增加量有关，试验设计过程中，各地的钾肥用量统一为湖北省水稻的平均用量 75 kg·hm⁻²。从图 2 可知，钾肥用量为 75 kg·km⁻²时，高钾土壤的产量增幅不明显，但地上部钾素吸收增加量较大，提高了钾肥的吸收利用率，低钾土壤钾肥用量明显不足，虽然增产显著，但钾素地上部吸收增加量偏低，造成钾肥吸收利用率低于中钾土壤。另外，秸秆还田也会影响不同供钾土壤的钾肥利用率。高钾土壤试验区秸秆还田后钾肥的吸收利用率和农学利用率均大幅下降。中钾和低钾土壤试验区进行秸秆还田后，钾肥吸收利用率均有不同程度的提升，钾肥农学利用率变化

不大。现有研究对秸秆还田能否提高钾肥利用率定论不一。山西小麦长期定位试验结果显示，秸秆还田可以提高钾肥吸收利用率和农学利用率^[22]，同时紫色土长期定位试验水稻研究也有类似结果^[17]；然而在西北地区的长期定位试验则表明，秸秆还田后小麦和玉米的钾肥利用率有所降低^[23]。可能原因，一是秸秆还田对钾肥利用率的影响与土壤质地、供钾能力有关。中国南方土壤有效钾含量相对于北方地区普遍较低，尤其在高复种生产制度下，农田钾素常处于亏缺状态。秸秆还田释放的钾素可能部分被土壤固定，减少了对钾肥的固定作用，进而提高了钾肥的利用率，但这还有待进一步探索；二是钾肥利用率受到地上部生物量增幅的影响。秸秆不单是一种钾素资源，其还田后也会释放 N、P 以及其它养分，均有可能增加地上部生物量，进而影响钾素累积增量。

一般情况下，秸秆还田 2 d 内 95%的钾离子均可以释放到土壤中供作物吸收利用^[24]，按照 4 500 kg·hm⁻²的秸秆投入量计算，投入的秸秆钾表现总量在 67.2—167.4 kg·hm⁻²。相对于钾肥的吸收利用率和农学利用率而言，目前对秸秆钾利用率研究相对较少，同时有关秸秆释放的钾素如何被作物吸收利用还缺乏相关证据。本文参照钾肥利用率定义了钾素利用率，即钾肥和秸秆钾的综合表现利用率。从图 1-C 的结果可知，等同土壤供钾水平下，钾素的吸收利用率和农学利用率均显著低于钾肥的利用率。这或许说明虽然秸秆钾素投入量大，但其利用率却非常低。秸秆钾素往往是一次性投入，容易受到淋洗、径流、下渗等^[25]环境因素的影响，损失量可能较大。同时秸秆还田也要考虑其负作用比如化感、争氮^[26]、病虫害、僵苗等的影响。表 3 和表 4 的数据显示不同区域进行秸秆还田的水稻增产率较低、地上部钾素累积增幅变异较大。影响钾肥利用率的因素如区域气候差异、农事操作以

及不同区域土壤的释钾和固钾能力^[27],均会影响到秸秆钾的有效性和利用率。因此,如何评估和提高秸秆钾素的利用率问题还需要合适的方法和技术。

3.3 秸秆钾素替代部分钾肥施用的问题

秸秆还田不仅能够改善土壤环境,其释放的养分还可以供作物吸收利用从而增加作物产量,尤其是钾素含量大、释放快,容易被作物吸收利用^[28]。鉴于当前中国钾肥供应紧张的局势,秸秆还田补充钾素不失为一种重要的钾肥替代资源。图2的结果表明,高钾土壤秸秆还田后增施钾肥可以提高水稻产量,但随着钾肥用量的增加,增幅逐渐降低,说明秸秆钾的投入可以替代部分钾肥施用。通过表5可知,高钾和中钾土壤秸秆还田钾素可以替代20%—50%的钾肥,而低钾土壤的结果与高钾、中钾土壤存在一定的差异,随着钾肥用量的增加,产量也呈增加趋势,也说明当前的推荐用量并不适合低钾土壤,需要更多的外源钾肥供应才能满足水稻生长需要^[29]。另外本试验目的在于评估区域尺度范围内短期秸秆还田替代钾肥效果,仅考虑了秸秆钾素这一主要因素,而模糊了轮作模式、还田秸秆种类以及秸秆自身腐解的差异性。因此,有必要在不同的生态区建立水旱轮作定位试验,以便研究秸秆钾素还田长期效果及秸秆钾素去向问题,从而完善秸秆还田替代钾肥技术,进一步指导农业实际生产。

自2005年开展测土配方施肥项目以来,优化作物施肥,粮食作物钾肥用量明显提高^[30],对中国粮食安全起到了重要作用。然而随着中国现代农业、规模农业和家庭农场的持续发展,秸秆还田正逐步被农民认可,基于土壤养分含量来确定适宜肥料用量显得不尽合理。秸秆无论是就地焚烧还田还是直接还田,均不会改变秸秆钾的投入量。从本次试验结果来看,秸秆还田钾素可以不同程度地减少高钾和中钾土壤地区的钾肥投入量,同时低钾土壤则需要施用更多的钾肥来满足作物生长需求、维持地力。因此,将秸秆还田与测土配方优化施肥技术相结合,不失为节本增效的一种良好途径。

4 结论

4.1 在施用氮磷肥基础上,施钾肥和秸秆还田均能增加水稻产量和地上部钾素累积量,增产效果以秸秆还田配施钾肥最好,除高钾土壤外,中钾和低钾土壤均是施用钾肥的增产效果优于秸秆还田效果。

4.2 当前推荐钾肥用量($75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)条件下,秸秆还田会降低高钾土壤的钾肥吸收利用率和农学利用率,但可明显提高中、低供钾土壤的钾肥吸收利用率,对中钾和低钾土壤的钾肥农学利用率没有显著影响。同钾肥利用率相比,秸秆还田配施钾肥后土壤的钾素利用率均有所降低,但中钾和低钾土壤的钾素利用率要显著高于高钾土壤的钾素利用率。

4.3 通过线性加平台肥效模型得出在秸秆还田条件下,高钾土壤(速效钾含量 $>150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)适宜钾肥用量为 $36.1\text{—}40.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,平均为 $38.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,比推荐用量减少49.1%。中钾土壤(速效钾含量 $100\text{—}150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)适宜钾肥用量为 $56.1\text{—}62.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,平均为 $60.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,比推荐用量减少20.0%。低钾土壤(速效钾含量 $<100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)当前钾肥用量不足,应适当进行增施,以保证增产效果和培肥地力。

致谢:试验布置和开展过程中,受到了参与本次项目的湖北省10个县(市)土壤肥料工作站工作人员的大力支持和帮助,在此表示感谢。

References

- [1] Timsina J, Connor D J. Productivity and management of rice-wheat cropping systems: issues and challenges. *Field Crop Research*, 2001, 69: 93-132.
- [2] Fan M S, Jiang R F, Liu X J, Zhang F S, Lu S H, Zeng X Z, Christie P. Interaction between non-flooded mulching cultivation and varying nitrogen inputs in rice-wheat rotations. *Field Crop Research*, 2005, 91: 307-318.
- [3] Cakmak I. Plant nutrition research: priorities to meet human needs for food in sustainable ways. *Plant Soil*, 2002, 247: 3-24.
- [4] Subba R A, Srinivasarao C, Srivastava S. *Potassium Status and Crop Response to Potassium on the Soils of Agroecological Regions of India*. Horgen, Switzerland, International Potash Institute, 2010.
- [5] 陈小琴, 周健民, 王火焰, 杜昌文. 铵钾施用次序和比例对油菜生长和氮钾养分吸收的影响. *土壤*, 2008, 40(4): 571-574.
Chen X P, Zhou J M, Wang H Y, Du C W. Effect of application sequence and ratio of ammonium and potassium on rape growth and nutrient uptake. *Soils*, 2008, 40(4): 571-574. (in Chinese)
- [6] 王伟妮, 鲁剑巍, 李银水, 邹娟, 苏伟, 李小坤, 李云春. 当前生产条件下不同作物施肥效果和肥料贡献率研究. *中国农业科学*, 2010, 43(19): 3997-4007.
Wang W N, Lu J W, Li Y S, Zou J, Su W, Li X K, Li Y C. Study on fertilization effect and fertilizer contribution rate of different crops at

- present production conditions. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(19): 3997-4007. (in Chinese)
- [7] Strobel B W. Influence of vegetation on low-molecular-weight carboxylic acids in soil solution: a review. *Geoderma*, 2001, 99: 169-198.
- [8] 李树田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡. 中国农业科学, 2011, 44(20): 4207-4229.
- Li S T, Jin J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(20): 4207-4229. (in Chinese)
- [9] Streets D G. Black smoke in China and its climate effects//*Special Panel on Alternative Energy Systems and Priority Environmental Issues for Asia*. New York: Asian Economic Panel Meeting, 2004: 7-8.
- [10] Singh B, Shan Y H, Johnson-Beebout S E, Singh Y, Buresh R J. Crop residue management for lowland rice-based cropping systems in Asia. *Advances in Agronomy*, 2008, 98: 117-199.
- [11] 谭德水, 金继运, 黄绍文, 李树田, 何萍. 不同种植制度下长期施钾与秸秆还田对作物产量和土壤钾素的影响. 中国农业科学, 2007, 40(1): 133-139.
- Tan D S, Jin J Y, Huang S W, Li S T, He P. Effect of long-term application of K fertilizer and wheat straw to soil on crop yield and soil K under different planting systems. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(1): 133-139. (in Chinese)
- [12] Yu C J, Qin J G, Xu J, Nie H, Luo Z Y, Cen K F. Straw Combustion in circulating fluidized bed at low-temperature: transformation and distribution of potassium. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2010, 88(5): 874-880.
- [13] 劳秀荣, 孙伟红, 王真, 郝艳如, 张昌爱. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响. 土壤学报, 2003, 40(4): 618-623.
- Lao Y R, Sun W H, Wang Z, Hao Y R, Zhang C A. Effect of matching use of straw and chemical fertilizer on soil fertility. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(4): 618-623. (in Chinese)
- [14] 王伟妮, 鲁剑巍, 鲁明星, 戴志刚, 李小坤. 水田土壤肥力现状及变化规律分析—以湖北省为例. 土壤学报, 2012, 49(2): 319-330.
- Wang W N, Lu J W, Lu M X, Dai Z G, Li X K. Status quo and variation of soil fertility in paddy field—a case study of Hubei province. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(2): 319-330. (in Chinese)
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2007.
- Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* (3rd ed). Beijing: China Agriculture Press, 2007. (in Chinese)
- [16] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 杨建昌, 王光火, 邹应斌, 张福锁, 朱庆森, Roland Buresh, Christian Witt. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095-1103.
- Peng S B, Huang J L, Zhong X H, Yang J C, Wang G H, Zou Y B, Zhang F S, Zhu Q S, Roland B, Christian W. Research strategy in improving fertilizer nitrogen use efficiency of irrigated rice in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(9): 1095-1103. (in Chinese)
- [17] 王玄德, 石孝均, 宋光煜. 长期稻草还田对紫色水稻土肥力和生产力的影响. 植物营养与肥科学报, 2005, 11(3): 302-307.
- Wang X D, Shi X J, Song G Y. Effects of long term rice straw returning on the fertility and productivity of purplish paddy soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(3): 302-307. (in Chinese)
- [18] 黄科延, 张爱武, 曹芯, 鲁艳红, 廖育林, 汤海涛. 稻草还田条件下施钾量对晚稻产量和钾素吸收的影响. 湖南农业科学, 2011(7): 57-60.
- Huang K Y, Zhang A W, Cao R, Lu Y H, Liao Y L, Tang H T. Influences of different potassium fertilizer rates on yield and potassium absorption of late-rice under rice-straw returning mode. *Hunan Agricultural Science*, 2011(7): 57-60. (in Chinese)
- [19] Singh Y, Singh B, Ladha J K, Khind C S, Gupta R K, Meelu O P, Pasquin E. Long-term effects of organic inputs on yield and soil fertility in the rice-wheat rotation. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(3): 845-853.
- [20] Huang Z Q, Liao L P, Wang S L, Cao G Q. Allelopathy of Phenolics from decomposing stump-roots in replant Chinese fir woodland. *Journal of Chemical Ecology*, 2000, 26(9): 2211-2219.
- [21] 王亚艺. 水稻 - 油菜轮作中钾肥效应及作物 - 土壤体系钾素动态变化研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- Wang Y Y. Study on the effect of potassium and the dynamic change of potassium in rice-rapeseed rotation system[D]. Wuhan: Huzhong Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- [22] 王宏庭, 金继运, 王斌, 赵萍萍. 山西褐土长期施钾和秸秆还田对冬小麦产量和钾素平衡的影响. 植物营养与肥科学报, 2010, 16(4): 801-808.
- Wang H T, Jin J Y, Wang B, Zhao P P. Effects of long-term potassium application and wheat straw return to cinnam on soil on wheat yields and soil potassium balance in Shanxi. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(4): 801-808. (in Chinese)
- [23] 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. 植物营养与肥科学报, 2008, 14(5): 886-893.
- Tan D S, Jing 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. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(5): 886-893. (in Chinese)
- [24] Saha P K, Miah M A M, Hossain A T M S, Rahman F, Saleque M A. Contribution of rice straw to potassium supply in rice-fallow-rice

- cropping pattern. *Bangladesh Journal Agricultural Research*, 2009, 34(4): 633-643.
- [25] Zhang J C, De Angelis D L, Zhuang J Y. Spatial variability of soil erodibility (K factor) at a catchment scale in Nanjing, China. Theory and practice of soil loss control in Eastern China. Springer Science Business Media, LLC, 2011: 101-113.
- [26] 侯红乾, 冀建华, 刘光荣, 刘益仁, 刘秀梅, 程正新, 杨俊诚, 文石林. 南方红壤区稻稻连作体系下氮肥减施模式研究. *中国水稻科学*, 2012, 26(5): 555-562.
- Hou H Q, Ji J H, Liu F R, Liu Y R, Liu X M, Cheng J C, Yang J C, Wen S L. On the mode of nitrogen-reduction in double-rice cropping region in red soil area of South China. *China Journal of Rice Science*, 2012, 26(5): 555-562. (in Chinese)
- [27] 廖志文, 邹娟, 胡承孝, 巩细民, 鲁君明. 湖北省不同地区水稻土对几种养分的吸附能力研究. *华中农业大学学报*, 2006, 25(4): 385-388.
- Liao Z W, Zou J, Hu C X, Gong X M, Lu J M. Study on some nutrients fixation capacity by paddy soils in different regions of Hubei province. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2006, 25(4): 385-388. (in Chinese)
- [28] 戴志刚, 鲁剑巍, 李小坤, 鲁明星, 杨文兵, 高祥照. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 272-276.
- Dai ZG, Lu JW, Li XK, Lu MX, Yang WB, Gao XZ. Nutrient release characteristics of different crop straws manure. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(6): 272-276. (in Chinese)
- [29] 王伟妮, 鲁剑巍, 鲁明星, 李小坤, 李云春, 李慧. 湖北省早中晚稻施钾增产效应及钾肥利用率研究. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(5): 1058-1065.
- Wang W N, Lu J W, Lu M X, Li X K, Li Y C, Li H. Effects of potassium fertilizer and potassium use efficiency on early-, mid-and late-season rice in Hubei province, China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(5): 1058-1065. (in Chinese)
- [30] 李红莉, 张卫峰, 张福锁, 杜芬, 李亮科. 中国主要粮食作物化肥施用量与效率变化分析. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(5): 1136-1143.
- Li H L, Zhang W F, Zhang F S, Li L K. Chemical fertilizer use efficiency change of main grain crops in China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(5): 1136-1143. (in Chinese)

(责任编辑 郭银巧)