

小麦秸秆还田条件下钾肥减量对水稻产量及养分利用的影响

朱远芃, 史燕捷, 管浩, 叶新新, 郜红建, 华胜, 王宜坤

引用本文:

朱远芃, 史燕捷, 管浩, 等. 小麦秸秆还田条件下钾肥减量对水稻产量及养分利用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(11): 2596-2605.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0289>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

聚天门冬氨酸/盐对水稻田面水氮素变化及养分利用的影响

徐嘉翼, 牛世伟, 隋世江, 张鑫, 叶鑫, 蔡广兴, 王娜

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1696-1703 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0229>

不同深施肥方式对稻田氨挥发及水稻产量的影响

周平遥, 张震, 王华, 肖智华, 徐华勤, 汪久翔

农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2683-2691 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0441>

逐年全量秸秆炭化还田对水稻产量和土壤养分的影响

张璐, 董达, 平帆, 徐兴坤, 易倩倩, 孙雪, 吴伟祥

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2319-2326 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1590>

长期施用有机物料对稻田生态系统服务功能的影响

全孝飞, 颜晓元, 王书伟, 周伟

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1406-1415 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0401>

生活污水尾水灌溉对秸秆还田稻田氨挥发的影响

李梦瑶, 王旭刚, 徐晓峰, 段婧婧, 薛利红, 杨林章

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1623-1632 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0084>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

朱远芃, 史燕捷, 管浩, 等. 小麦秸秆还田条件下钾肥减量对水稻产量及养分利用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(11): 2596–2605.

ZHU Yuan-peng, SHI Yan-jie, GUAN Hao, et al. Influence of potassium fertilizer reduction on rice yield and potassium utilization efficiency under wheat straw incorporation condition[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(11): 2596–2605.



开放科学 OSID

小麦秸秆还田条件下钾肥减量对水稻产量及养分利用的影响

朱远芃¹, 史燕捷¹, 管浩¹, 叶新新¹, 郜红建^{1*}, 华胜², 王宜坤²

(1. 农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室, 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 安徽喜洋洋农业科技有限公司, 安徽 庐江 230088)

摘要: 利用长江中下游稻麦轮作定位试验, 研究小麦秸秆还田条件下, 钾肥减量施用对土壤钾素含量、水稻产量和钾素累积量以及钾肥利用率的影响, 为小麦秸秆还田后水稻钾肥合理施用提供科学依据。试验共设5个处理, 分别为: 秸秆还田+配方施肥 ($K_{100\%}$), 秸秆还田+配方施肥钾肥减量10% ($K_{90\%}$), 秸秆还田+配方施肥钾肥减量20% ($K_{80\%}$), 秸秆还田+配方施肥钾肥减量30% ($K_{70\%}$), 秸秆还田+配方施肥不施钾肥 (K_0)。采集3年水稻不同生育期植株和土壤样品, 分析土壤钾素动态变化和水稻钾素吸收富集规律, 并统计水稻产量和经济效益。3年试验结果表明, 与 $K_{100\%}$ 相比, $K_{90\%}$ 处理的土壤全钾和速效钾含量分别提高了3.13%和6.38%, 水稻钾素总累积量和净累积量平均提高1.55%和5.13%, 水稻平均增产2.19%; $K_{80\%}$ 和 $K_{70\%}$ 处理的土壤全钾和速效钾含量分别平均减少12.58%~15.31%和4.26%~10.64%, 水稻钾素总累积量平均减少了7.49%~13.62%, 水稻净累积量平均增加了0.48%~1.78%, $K_{80\%}$ 处理的水稻产量平均增加2.32%, 而 $K_{70\%}$ 处理的水稻产量则平均降低了6.43%。与 $K_{100\%}$ 相比, 钾肥减量 ($K_{90\%}$ 、 $K_{80\%}$ 、 $K_{70\%}$) 能够显著增加水稻钾肥农学效率 (15.51%~24.53%)、偏生产力 (17.96%~25.40%) 和钾素吸收利用率 (17.53%~55.36%) ($P < 0.05$)。当钾肥减量大于20%时, 经济效益呈下降趋势。小麦秸秆还田条件下, 与配方施肥相比 ($K_{100\%}$), 钾肥减量10%对土壤速效钾含量影响不显著, 但能够提高水稻钾素累积量; 钾肥减量20%~30%会降低土壤速效钾含量以及水稻钾素累积量, 提高水稻钾素净累积量; 钾肥减量10%~20%对水稻产量影响不显著, 但可以增加钾肥农学效率、偏生产力和钾肥吸收利用率及经济效益。

关键词: 麦秆还田; 钾肥减量; 水稻; 产量; 钾肥利用率; 土壤钾素

中图分类号: S511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)11-2596-10 doi:10.11654/jaes.2020-0289

Influence of potassium fertilizer reduction on rice yield and potassium utilization efficiency under wheat straw incorporation condition

ZHU Yuan-peng¹, SHI Yan-jie¹, GUAN Hao¹, YE Xin-xin¹, GAO Hong-jian^{1*}, HUA Sheng², WANG Yi-kun²

(1. Anhui Province Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention, School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. Anhui Xiyangyang Agricultural Science and Technology Co., Ltd, Lujiang 230088, China)

Abstract: Long-term crop straw incorporation experiments were conducted to understand the effects of wheat straw return and potassium

收稿日期: 2020-03-16 录用日期: 2020-07-27

作者简介: 朱远芃 (1995—), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 从事养分资源高效利用研究。E-mail: m15155190861@163.com

*通信作者: 郜红建 E-mail: gaohongjian2@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41877099); 国家重点研发计划项目 (2016YFD0200107); 安徽省科技重大专项 (18030701188); 长江经济带磷资源高效利用创新平台项目 (KJ20190197)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41877099); The National Key R&D Program of China (2016YFD0200107); The Special Fund for Key Program of Science and Technology of Anhui Province, China (18030701188); Innovative Platform Project for Efficient Utilization of Phosphorus Resources in Yangtze River Economic Belt (KJ20190197)

fertilizer reduction on soil potassium content, potassium accumulation in rice, and potassium utilization efficiency, as well as rice yield, under the rice-wheat rotation system along the Yangtze River region. Five treatments, including wheat straw return plus formula fertilization ($K_{100\%}$), wheat straw return plus formula fertilization and potassium reduction by 10% ($K_{90\%}$), wheat straw return plus formula fertilization and potassium reduction by 20% ($K_{80\%}$), wheat straw return plus formula fertilization and potassium reduction by 30% ($K_{70\%}$), wheat straw return plus formula fertilization without potash (K_0) were conducted in the field for 3 years. Compared with $K_{100\%}$, $K_{90\%}$ increased soil total and available potassium by 3.31% and 6.38%, and the total and net potassium accumulation in rice increased by 1.55% and 5.13%. $K_{80\%}$ and $K_{70\%}$ decreased soil total and available potassium by 12.58%~15.31% and 4.26%~10.64%, respectively, and the total potassium accumulation in rice declined by 7.49%~13.62% ($P<0.05$). Both $K_{80\%}$ and $K_{70\%}$ increased the net potassium accumulation by 0.48%~1.78%, and $K_{80\%}$ increased rice yield by 2.32%, whereas $K_{70\%}$ decreased rice yield by 6.43%. Compared with $K_{100\%}$, $K_{90\%}$, $K_{80\%}$, and $K_{70\%}$ significantly improved agronomic efficiency (15.51%~24.53%), partial productivity (17.96%~25.40%), potassium absorption, and potassium utilization efficiency (17.53%~55.36%) ($P<0.05$) of rice. However, reduction of potassium fertilizer over 20% decreased the economic profit. Under the condition of wheat-straw incorporation, reduction of potassium by 10% had no influence on soil available potassium but improved absorption and accumulation of potassium in rice. Nonetheless, reduction of potassium by 20%~30% decreased soil available potassium and absorption accumulation of potassium in rice. The reduction of potassium fertilizer less than 20% did not have significant influences on rice yield, but it increased the agronomic efficiency, partial productivity, absorption, and utilization of potassium fertilizer, as well as economic profit after wheat straw incorporation into the soil.

Keywords: wheat straw incorporation; potassium fertilizer reduction; rice; yield; potassium utilization efficiency; soil potassium

水稻是重要粮食作物之一,其种植面积和产量均居我国粮食作物首位^[1-2]。钾在水稻产量形成和品质提升等方面起着不可替代的作用^[3]。随着农业生产复种指数和高产优质品种的推广,土壤钾素随作物收获被大量带出而出现亏缺^[4]。近年来,我国土壤缺钾状况日渐加剧,缺钾面积逐渐增大,已经成为农业可持续发展的重要限制因素。我国钾矿资源匮乏以及进口钾肥价格的高昂,提升了农业生产成本,使得钾肥投入量降低^[5]。充分利用作物秸秆中的钾肥资源是弥补我国钾矿资源不足、补充土壤钾素亏缺的重要途径^[6-7]。我国年均秸秆资源量约为8.76亿t,秸秆钾素储量折合纯钾(K_2O)约为 1.2×10^7 t^[8]。

作物秸秆还田可以提高土壤中水溶性钾、非交换性钾和矿物钾的含量,起到养分归还的作用^[9]。解文艳等^[10]研究表明,长期秸秆还田可以提高土壤全钾和速效钾素含量,减少土壤钾素的耗竭。Jiang等^[11]证明,作物秸秆还田能够替代化学钾肥,有效平衡土壤钾素匮乏。Zhu等^[12]证实,秸秆还田可以提高土壤速效钾含量,但对于如何配施化学钾肥从而提高作物钾素吸收效率未作深入分析。刘秋霞等^[13]研究表明,秸秆还田配施50%的化学钾肥时土壤钾素亏缺量最小,有利于作物吸收钾素;而傅伟等^[14]则认为,秸秆还田配合30%化学钾肥有利于土壤缓效钾的积累,可以满足作物生育后期钾素的需求。

已有的研究多关注秸秆还田对土壤养分和作物产量的影响,但有关长期秸秆还田后钾肥减量影响土

壤钾素含量及水稻产量研究较少,对多年秸秆还田后不同钾肥减量比例和不同生育期土壤钾素含量变化规律,以及对作物产量和钾素吸收利用效率的影响目前尚不清楚,值得进一步研究。

本文采用田间试验方法,研究多年小麦秸秆还田后钾肥减量对水稻产量和钾素利用效率的影响,分析连续秸秆还田条件下土壤全钾和速效钾等养分含量的变化规律,解析秸秆还田条件下钾肥减量与土壤养分和水稻产量变化的作用机理。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于2017年开始在安徽省合肥市庐江县郭河镇南圩村(117°E, 31°28'N)进行。

1.2 试验材料

作物种植模式是稻-麦两熟制,2017—2019年水稻和小麦品种见表1。2017年开始水稻试验,前茬小

表1 不同年份水稻和小麦品种

Table 1 The variety of rice and wheat in different years

作物 Crops	2017年	2018年	2019年
水稻	镇稻18	南粳9108	徽两优882
Rice	Zhendao 18	Nanjing 9108	Huiliangyou 882
小麦	宁麦13	宁麦13	宁麦13
Wheat	Ningmai 13	Ningmai 13	Ningmai 13

注:年份是小麦收获时的年份。

Note: Years refer to the wheat harvest year.

麦秸秆养分含量:全氮 $7.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷 $1.01 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全钾 $19.82 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 2018 年前茬作物为小麦, 小麦秸秆养分含量:全氮 $7.04 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷 $1.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全钾 $20.47 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。2019 年小麦秸秆养分含量:全氮 $7.37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷 $1.04 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全钾 $22.59 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

土壤类型为下蜀第四纪堆积物母质发育的水稻土, 土壤质地为黏壤土。2017 年试验开始时的基础土壤养分情况为:有机质 $30.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $1.17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $108.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷 $15.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全钾 $23.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $140.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤 pH 5.43, 阳离子交换量(CEC) $14.21 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

供试肥料:肥料品种分别为尿素(N 46%)、普钙(P_2O_5 12%)、氯化钾(K_2O 60%);腐熟剂是中国农业科学院农业资源与农业区划研究所研制的有机物料腐熟菌剂(除臭型),有效活菌数 $5 \times 10^7 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

1.3 试验设计

本研究采用田间小区试验,小区长 12.5 m,宽 4 m,每个小区面积 50 m^2 。根据 2017 年土壤背景值计算得出配方肥用量(N: P_2O_5 : K_2O =15:6:6)。本试验共设 5 个处理,分别为:(1)秸秆还田+配方施肥($\text{K}_{100\%}$);(2)秸秆还田+配方施肥钾肥减量 10%($\text{K}_{90\%}$);(3)秸秆还田+配方施肥钾肥减量 20%($\text{K}_{80\%}$);(4)秸秆还田+配方施肥钾肥减量 30%($\text{K}_{70\%}$);(5)秸秆还田+配方施肥不施钾肥(K_0)。配方施肥中氮肥施用量为 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,基肥、分蘖肥和穗肥的施用比例为 6:3:1;磷肥施用量为 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,全部做基肥施用,其中基肥撒施于地表后翻耕入土,深度为 15 cm,追肥均采用撒施;钾肥施用量为 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,基肥和穗肥比例为 8:2,施肥量和施肥方法 3 年保持一致。根据本试验小麦产量和小麦谷草比,小麦秸秆 2017 年为 $4000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,2018 年为 $4500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,2019 年为 $4500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,3 年水稻秸秆还田量分别为 5000、6000、6000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。腐熟剂用量为 $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,翻耕后撒施于地表。每个试验处理设置 3 次重复。

试验小区周围起宽 25 cm、高 30 cm 的田埂,后用农膜包埂,小区之间单独排灌,防止串水串肥。麦秸还田方式为联合收割机粉碎(5 cm 左右),均匀抛撒于地表,在施用基肥及腐熟剂后深旋翻埋,后灌水浸泡 3~4 d。每年 6 月上旬排水后再进行第 2 次翻地,晒田 3 d。水稻于每年 5 月下旬育秧,每年 6 月中旬机械化移栽秧苗,每年 11 月上旬收获。插植规格(行距×株距)为 25 cm×14 cm,栽插密度是 28.6 万穴· hm^{-2} ,每穴 3 株幼苗。成熟期取样考种,各小区病虫害管理同大田。

1.4 测定项目与方法

在水稻分蘖期(每年 7 月上旬)、拔节期(每年 8 月上旬)、抽穗期(每年 9 月上旬)和成熟期(每年 10 月下旬),每个小区随机取 3 株水稻植株并采集土壤。植株去根后用蒸馏水冲洗干净,茎、叶、穗分离后装入样品袋中在 $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下杀青 30 min,然后在 $75 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒质量。植株样品粉碎后,全钾测定采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消解,火焰光度计法测定。在成熟期,统计水稻的有效穗数、穗粒数、千粒重等产量构成因子,产量计算:理论产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)=有效穗($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)×穗粒数(粒)×千粒重(g)× 0.85×10^{-4} 。

水稻植株不同生育期钾素累积量和钾素利用效率采用以下方法计算:

钾素累积量($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)=干质量×植株全钾含量;

钾素总累积量($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)=茎钾素累积量+叶钾素累积量+穗钾素累积量;

钾素净累积量($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)=后生育期钾素累积量-前生育期钾素累积量;

钾肥偏生产力($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)=施钾肥区产量/钾肥用量;

钾肥农学效率($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)=(施钾肥区产量-不施钾肥产量)/钾肥用量;

钾肥吸收利用率=(施钾肥区水稻钾素总累积量-不施钾肥区水稻钾素总累积量)/钾肥用量×100%;

钾肥贡献率=(施钾肥区水稻产量-不施钾肥区水稻产量)/施钾肥区水稻产量×100%。

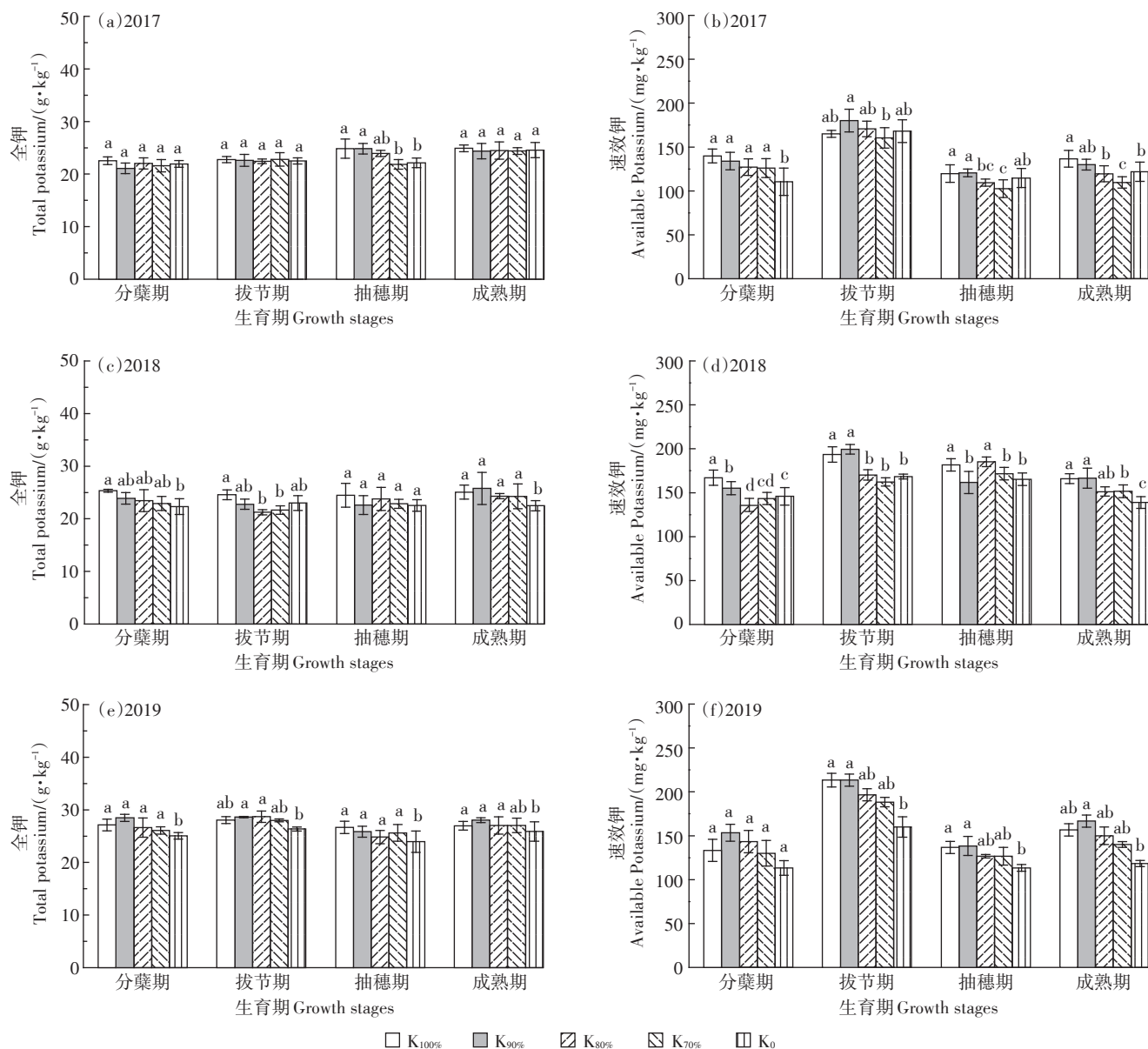
土壤风干后过 2 mm 筛用于 pH 测定,过 1 mm 筛用于碱解氮、有效磷、速效钾的测定,过 0.15 mm 筛用于全氮、全磷、全钾的测定。pH 采用玻璃电极法,碱解氮采用碱解扩散法测定,有效磷采用 Olsen 法测定,机械组成采用吸管法测定,CEC 采用乙酸铵交换法测定,全磷钾采用碱熔融法测定,速效钾采用 NH_4OAc 浸提-火焰光度计法测定^[15]。

数据处理和作图采用 Microsoft Excel 2013 和 Origin 8.1 软件进行,数据统计分析采用 SPSS 20.0,数据差异显著性分析采用 Duncan's 法。

2 结果与分析

2.1 小麦秸秆还田条件下钾肥减量对土壤全钾和速效钾含量的影响

小麦秸秆还田后 3 年水稻季土壤全钾在不同施肥处理条件下保持稳定(图 1a、图 1c、图 1e)。除 K_0 外,土壤全钾含量从分蘖期到拔节期均以 $\text{K}_{100\%}$ 或 $\text{K}_{90\%}$



图中相同年份同一时期处理中含有相同字母表示差异不显著($P>0.05$)。下同

Identical letters within different treatments at same stage in different years indicate insignificant differences at 0.05 level ($P<0.05$). The same below

图1 小麦秸秆还田钾肥减量对水稻不同生育期土壤全钾和土壤速效钾的影响

Figure 1 Effects of wheat straw incorporation and potassium reduction on the total and available potassium accumulation of soil at different growth stages

最高, $K_{70\%}$ 最低 ($P>0.05$); 在抽穗期, 土壤全钾含量3年均以 $K_{100\%}$ 最高, $K_{80\%}$ 或 $K_{70\%}$ 最低 ($P>0.05$)。在成熟期, 钾肥处理 ($K_{100\%}$ 、 $K_{90\%}$ 、 $K_{80\%}$) 的土壤全钾含量比 K_0 3年平均提高 5.47%、5.79%、3.93%。与 $K_{100\%}$ 相比, $K_{90\%}$ 平均提高土壤全钾 3.13%, $K_{80\%}$ 和 $K_{70\%}$ 平均降低土壤全钾 0.14% 和 1.55%。

土壤速效钾含量随生育期的增长呈现先升高再下降的趋势, 且随钾肥减量比例增加而逐渐下降 (图1b、图1d、图1f)。除不施用钾肥的对照处理以及个别

生育期处理外, 土壤速效钾含量从分蘖期到成熟期均以 $K_{90\%}$ 最高, 以 $K_{70\%}$ 最低。在分蘖期, $K_{90\%}$ 处理的土壤速效钾3年的含量均高于 $K_{70\%}$ 处理 ($P>0.05$); 在拔节期, 土壤速效钾含量达到峰值, 其中 $K_{90\%}$ 的土壤速效钾含量最高, 3年平均为 $197.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比 K_0 处理的土壤速效钾含量3年平均提高 19.66% ($P<0.05$)。在抽穗期, $K_{100\%}$ 和 $K_{90\%}$ 处理的土壤速效钾含量比 K_0 3年平均提高 22.95% 和 26.11% ($P<0.05$); 在成熟期, $K_{90\%}$ 处理的土壤速效钾含量3年平均比 K_0 提高 22.53%

($P<0.05$)。与 $K_{100\%}$ 相比, $K_{90\%}$ 处理的土壤速效钾含量3年平均提高0.65%, $K_{80\%}$ 和 $K_{70\%}$ 处理的土壤速效钾含量3年平均降低8.50%和12.98%。

2.2 钾肥减量对水稻植株内钾素含量的影响

在不同生育期,水稻不同部位钾素含量随钾肥施用量的减少而逐渐下降,且呈茎>叶>穗的规律(表2)。在不同施钾肥处理中,秸秆还田且施用钾肥后水稻植株钾素含量均高于无钾处理,其中每年 $K_{100\%}$ 处理的水稻钾素含量最高。在分蘖期, $K_{100\%}$ 处理的水稻体内钾素3年平均含量为 $27.27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比钾肥减量10%~30%的处理高,但差异不显著。在拔节期,水稻茎与叶的钾素含量呈现出 $K_{100\%}>K_{90\%}>K_{80\%}>K_{70\%}>K_0$ 的规律, K_0 处理的水稻茎中的钾素含量显著低于钾肥减量10%~30%的处理。在抽穗期,水稻叶、穗的钾素含量均以 $K_{100\%}$ 的最高,以 K_0 处理的最低,但处理间差异不显著。水稻茎的钾素含量以 $K_{80\%}$ 最高,3年平均含量为 $31.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别比 $K_{100\%}$ 、 $K_{80\%}$ 、 $K_{70\%}$ 和 K_0 平均高9.21%、2.23%、3.82%和17.76% ($P<0.05$)。在成熟期,2017年和2019年水稻茎中钾素含量呈现 $K_{100\%}>K_{90\%}>K_{80\%}>K_{70\%}>K_0$ 的规律; $K_{100\%}$ 处理的水稻叶钾素的3年平均含量最高($13.77 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 分别比其他钾肥处理高12.53%、14.47%、18.51%和19.43% ($P<0.05$), 2018年和2019年穗部钾素含量均以 $K_{90\%}$ 处理最高。

2.3 钾肥减量对水稻体内钾素累积量的影响

水稻钾素累积量随水稻生育期的推移而逐渐增加(图2),在成熟期达到最高值,3年平均为 $253.42 \sim 343.16 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。水稻钾素总累积量在分蘖期至拔节期和拔节期至抽穗期增加迅速,而在抽穗期至成熟期增加相对较缓。在抽穗期之前,钾素累积量均以 $K_{100\%}$ 处理的最高,以 K_0 处理的最低,且随钾肥减量幅度的增加而递减。在分蘖期, $K_{100\%}$ 处理的水稻钾素累积量略高于钾肥减量10%~30%的处理。在拔节期, $K_{100\%}$ 、 $K_{90\%}$ 、 $K_{80\%}$ 、 $K_{70\%}$ 较 K_0 处理的水稻钾素累积量3年平均提高47.72%、45.38%、33.15%和22.86%。在抽穗期, $K_{100\%}$ 较 $K_{70\%}$ 处理的水稻钾素累积量3年平均提高了29.50%; $K_{90\%}$ 与 $K_{80\%}$ 处理间水稻钾素累积量无显著差异。在成熟期,水稻钾素3年平均累积量以 $K_{90\%}$ 处理的最高,比无钾肥处理高30.05%,达显著差异水平,比 $K_{100\%}$ 、 $K_{80\%}$ 、 $K_{70\%}$ 处理的水稻钾素累积量有所提高,但差异不显著。与 $K_{100\%}$ 相比, $K_{90\%}$ 处理提高钾素累积量1.55%,而 $K_{80\%}$ 和 $K_{70\%}$ 处理分别降低钾素累积量7.49%和13.62%。

水稻植株体内钾素3年平均净累积量以抽穗期最多,占总累积量的37.92%~47.55%;其次是拔节期,占27.23%~31.08%(图2)。在分蘖期,不同处理的水稻植株钾素净累积量3年平均为 $9.48 \sim 10.02 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$,

表2 水稻植株钾素含量变化($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 2 Potassium content in different parts of rice($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

处理 Treatments	年份 Year	分蘖期 Tillering stage	拔节期 Shooting stage			抽穗期 Heading stage			成熟期 Maturity stage		
			茎 Stem	叶 Leaf	穗 Spike	叶 Leaf	茎 Stem	穗 Spike	叶 Leaf	茎 Stem	
$K_{100\%}$	2017	28.67±0.55a	26.74±0.67a	16.18±1.15a	6.72±0.66ab	15.66±0.28ab	20.96±2.41b	3.96±0.25a	10.01±0.56a	23.81±0.21a	
$K_{90\%}$		24.09±0.35c	23.8±0.53b	14.97±0.34a	6.37±0.15bc	16.28±0.34a	24.62±0.34a	3.6±0.12abc	9.15±0.93ab	18.17±0.95b	
$K_{80\%}$		23.31±0.80c	24.87±2.04ab	16.29±1.64a	5.97±0.28c	16.36±0.68a	25.64±0.53a	3.29±0.21c	8.92±0.31b	17.44±0.46b	
$K_{70\%}$		26.84±0.90b	23.95±0.75b	15.48±0.43a	7.09±0.37ab	14.85±0.60b	24.82±1.00a	3.50±0.20bc	8.80±0.55b	17.24±1.11b	
K_0		26.17±0.47b	24.28±1.33b	15.97±0.81a	7.37±0.63a	13.73±0.25c	21.49±0.60b	3.75±0.04ab	8.65±0.17b	17.63±0.72b	
$K_{100\%}$	2018	23.69±0.35b	23.75±3.58a	19.63±1.29a	12.55±1.04a	23.10±1.36a	33.78±1.83a	4.12±0.11abc	12.19±0.43a	26.10±0.61a	
$K_{90\%}$		22.00±2.49a	24.44±3.03a	21.08±4.58a	11.39±0.74b	21.21±0.14bc	34.88±1.58a	4.21±0.68ab	11.38±1.31a	25.30±2.24a	
$K_{80\%}$		22.31±2.77a	24.61±5.06a	19.10±0.95a	13.27±0.91a	22.25±0.97ab	34.98±1.13a	4.35±0.44a	11.49±2.55a	26.77±2.30a	
$K_{70\%}$		21.96±2.94a	22.08±0.76a	18.82±1.49a	11.32±0.72b	20.14±0.90cd	32.36±2.87ab	3.76±0.51bc	10.85±1.60a	25.35±1.48a	
K_0		19.64±2.68a	15.38±6.97a	18.49±1.57a	12.69±0.68a	19.34±1.56d	31.10±1.05b	3.58±0.22c	10.54±0.48a	27.40±1.11a	
$K_{100\%}$	2019	29.46±0.61a	13.55±0.01a	11.94±1.40a	12.22±0.67a	25.88±0.98a	32.00±2.36a	4.54±0.33a	19.10±0.98a	29.12±1.35a	
$K_{90\%}$		29.15±0.53a	13.35±1.53a	11.84±0.48a	10.58±2.36ab	25.87±0.55a	31.84±1.01a	4.62±0.26a	16.17±0.67b	28.70±2.03a	
$K_{80\%}$		28.98±2.36a	13.08±0.63ab	11.69±0.49a	10.98±0.53ab	25.48±0.47a	32.54±1.11a	4.23±0.27a	15.67±0.66b	25.85±1.75a	
$K_{70\%}$		28.57±1.29a	12.93±0.44ab	11.51±0.44a	10.76±1.44ab	24.87±0.65a	32.52±1.96a	4.08±0.31a	15.20±1.31b	25.25±2.32a	
K_0		27.47±1.37a	12.50±1.26b	10.73±0.14a	9.55±1.09b	24.78±0.96a	26.85±1.45b	3.76±0.24b	15.39±2.90b	22.70±0.55b	

注:表中同一年份同一列数字后含有相同字母表示处理间差异不显著($P>0.05$)。下同。

Note: Identical letters within same column in same year indicate insignificant differences at 0.05 level ($P>0.05$). The same below.

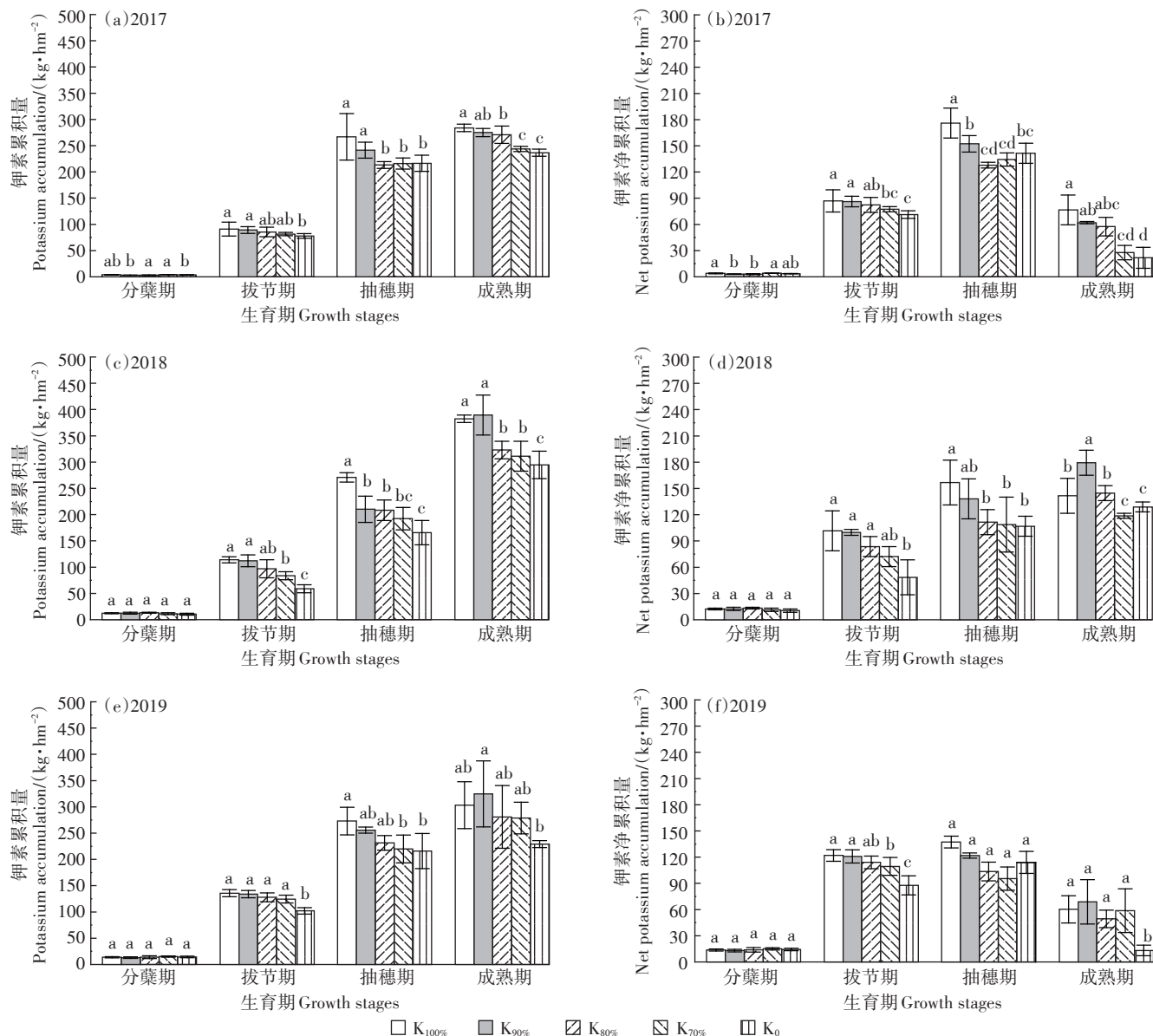


图2 小麦秸秆还田钾肥减量对水稻不同生育期钾素总积累量和钾素净积累量的影响

Figure 2 Effects of wheat straw incorporation and potassium reduction on the total and net potassium accumulation of rice at different growth stages

但处理间(K_{100%}~K₀)没有显著差异。在拔节期和抽穗期,水稻植株体内钾素净积累量随钾肥减量比例的增加而逐渐降低,在钾肥减量10%~30%时,均低于K_{100%}。在成熟期,水稻植株的钾素净积累量呈现K_{90%}>K_{80%}>K_{70%}>K_{100%}>K₀的规律;与K_{100%}相比,K_{90%}、K_{80%}和K_{70%}处理的水稻钾素净积累量分别提高5.13%、1.78%和0.78%。

2.4 钾肥减量对水稻产量及其构成因素的影响

2017年水稻产量随钾肥减少呈现先降低后升高的趋势,2018年和2019年水稻产量随钾肥减少呈现先增加后降低的趋势(表3)。2018年和2019年,不同

施钾肥处理的水稻产量呈现K_{90%}>K_{80%}>K_{100%}>K_{70%}>K₀的规律,而2017年水稻产量则以K_{80%}处理的最高。从水稻产量构成要素来看,不同施钾肥处理间水稻的有效穗数随钾肥减量比例的增加呈先增加后降低的趋势,但差异不显著($P>0.05$);2017年和2019年,水稻每穗粒数以K_{90%}处理的最高,与K_{100%}和K_{80%}相比差异不显著,与K₀相比平均显著提高了17.45%。不同施钾肥处理间水稻的结实率和千粒重无明显差异。3年结果显示,与K_{100%}处理相比,K_{90%}和K_{80%}处理平均提高水稻产量2.19%和2.32%($P>0.05$),但是K_{70%}处理降低了水稻产量6.43%($P<0.05$)。

2.5 钾肥减量对水稻钾肥利用率和经济效益的影响

小麦秸秆还田后,钾肥减量 10%~30% 的处理显著影响了水稻钾肥利用率(表 4)。钾肥减量 10%~30% 的处理(K_{90%}、K_{80%}和 K_{70%})使水稻农学效率、偏生

产力率和钾肥利用率 3 年均呈上升的趋势,贡献率维持在 14.72%~32.81%。钾肥减量 10% 处理的农学效率、偏生产力 和钾肥利用率 3 年平均比 K_{100%} 处理高 17.80%、18.36% 和 17.17%,均达到差异显著,这说明秸

表 3 小麦秸秆还田钾肥减量对水稻产量及构成的影响

Table 3 Effects of different potassium fertilizer reduced applications on yield components of rice

处理 Treatments	年份 Year	有效穗数 Valid panicle/($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	每穗粒数 Grains per spike	结实率 Filled grain rate/%	千粒重 1 000-grain weight/g	产量 Yield/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	比 100% 钾肥 增产率/%
K _{100%}	2017	356.83 $\pm$ 19.46a	106.59 $\pm$ 2.05a	0.81 $\pm$ 0.04a	23.43 $\pm$ 0.04a	7 190.64 $\pm$ 496.13a	—
K _{90%}		362.22 $\pm$ 17.57a	114.87 $\pm$ 9.44a	0.80 $\pm$ 0.09ab	21.01 $\pm$ 1.19ab	7 022.42 $\pm$ 866.99ab	-2.34
K _{80%}		397.78 $\pm$ 15.43a	106.39 $\pm$ 3.25a	0.80 $\pm$ 0.01ab	21.71 $\pm$ 0.83ab	7 398.60 $\pm$ 802.92a	2.89
K _{70%}		370.63 $\pm$ 18.10a	105.02 $\pm$ 6.75a	0.81 $\pm$ 0.01a	20.44 $\pm$ 0.65ab	6 450.37 $\pm$ 667.86b	-10.29
K ₀		350.48 $\pm$ 15.77a	104.15 $\pm$ 7.94a	0.77 $\pm$ 0.02b	19.83 $\pm$ 0.45b	5 903.22 $\pm$ 831.26b	-17.90
K _{100%}	2018	353.33 $\pm$ 41.83ab	114.37 $\pm$ 19.03a	80.07 $\pm$ 1.31a	21.41 $\pm$ 1.70a	7 766.98 $\pm$ 408.58ab	—
K _{90%}		378.10 $\pm$ 31.60ab	107.19 $\pm$ 20.81a	81.17 $\pm$ 0.74a	21.70 $\pm$ 1.02a	8 125.99 $\pm$ 585.11a	4.42
K _{80%}		383.81 $\pm$ 37.72a	101.84 $\pm$ 18.66a	80.49 $\pm$ 0.94a	22.00 $\pm$ 1.94a	7 864.40 $\pm$ 352.51a	1.25
K _{70%}		350.48 $\pm$ 23.79ab	106.62 $\pm$ 13.42a	79.23 $\pm$ 3.23a	21.58 $\pm$ 2.01a	7 351.58 $\pm$ 489.76b	-5.35
K ₀		331.43 $\pm$ 30.10b	102.46 $\pm$ 18.16a	76.68 $\pm$ 0.79b	22.22 $\pm$ 2.18a	6 759.94 $\pm$ 673.31b	-12.97
K _{100%}	2019	338.81 $\pm$ 26.73a	111.63 $\pm$ 5.50ab	83.80 $\pm$ 0.06a	30.54 $\pm$ 3.37a	8 830.45 $\pm$ 446.79ab	—
K _{90%}		340.30 $\pm$ 12.24a	125.26 $\pm$ 4.43a	83.13 $\pm$ 0.09a	28.32 $\pm$ 4.18a	9 226.74 $\pm$ 268.72a	4.49
K _{80%}		346.27 $\pm$ 14.94a	112.13 $\pm$ 4.09ab	83.83 $\pm$ 0.04a	30.92 $\pm$ 2.27a	9 079.71 $\pm$ 577.31ab	2.82
K _{70%}		343.28 $\pm$ 16.23a	102.08 $\pm$ 14.91b	85.77 $\pm$ 0.01a	31.34 $\pm$ 1.67a	8 506.82 $\pm$ 375.82ab	-3.66
K ₀		316.60 $\pm$ 25.47b	100.53 $\pm$ 2.82b	89.57 $\pm$ 0.04a	32.31 $\pm$ 1.38a	7 987.24 $\pm$ 473.24b	-10.17

表 4 小麦秸秆还田钾肥减量对水稻钾肥利用率及经济效益的影响

Table 4 Effects of different potassium fertilizer reduced applications on utilization rate of potassium and economy

处理 Treatments	年份 Year	贡献率 Contribution rate/%	农学效率 Agronomic efficiency/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	偏生产力 Partial factor productivity/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	钾肥利用率 Applied efficiency/%	施钾量 Potassium fertilizer/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	肥料投入 Fertilizer input/($\text{yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$)	经济效益 Output/($\text{yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$)
K _{100%}	2017	32.14 $\pm$ 7.17a	25.42 $\pm$ 3.77a	79.89 $\pm$ 1.51c	38.61 $\pm$ 3.28c	90	1 943.99	16 535.96a
K _{90%}		29.43 $\pm$ 5.19a	26.16 $\pm$ 4.43a	86.69 $\pm$ 3.70b	45.53 $\pm$ 1.44b	81	1 899.75	16 147.87ab
K _{80%}		32.81 $\pm$ 5.79a	34.66 $\pm$ 9.11a	102.76 $\pm$ 1.15a	45.33 $\pm$ 1.38b	72	1 857.38	17 157.02a
K _{70%}		23.13 $\pm$ 7.17a	24.56 $\pm$ 9.05a	102.39 $\pm$ 2.60a	50.84 $\pm$ 0.31a	63	1 814.79	14 762.66b
K ₀		—	—	—	—	0	1 508.86	13 662.42b
K _{100%}	2018	26.33 $\pm$ 2.14a	24.69 $\pm$ 2.30b	123.46 $\pm$ 3.65b	28.33 $\pm$ 1.86c	90	1 970.31	18 146.16ab
K _{90%}		22.33 $\pm$ 4.47b	29.13 $\pm$ 3.98a	132.39 $\pm$ 6.24ab	35.33 $\pm$ 3.42b	81	1 925.15	19 121.17a
K _{80%}		22.00 $\pm$ 1.59b	26.30 $\pm$ 6.73ab	148.11 $\pm$ 2.62a	35.33 $\pm$ 6.13ab	72	1 881.89	18 486.91a
K _{70%}		27.00 $\pm$ 7.33a	22.59 $\pm$ 5.72b	139.21 $\pm$ 3.88ab	48.00 $\pm$ 4.62a	63	1 838.43	17 202.17b
K ₀		—	—	—	—	0	1 526.12	15 982.12b
K _{100%}	2019	18.62 $\pm$ 0.57bc	17.15 $\pm$ 0.43c	109.23 $\pm$ 0.71d	33.57 $\pm$ 0.17b	90	2 107.63	20 674.93ab
K _{90%}		23.40 $\pm$ 1.45a	23.94 $\pm$ 2.38a	150.90 $\pm$ 2.15a	36.91 $\pm$ 0.28ab	81	2 061.99	21 743.00a
K _{80%}		21.63 $\pm$ 2.88b	24.90 $\pm$ 1.55a	139.40 $\pm$ 2.29b	38.49 $\pm$ 0.10ab	72	2 017.75	21 407.90ab
K _{70%}		14.72 $\pm$ 2.10c	19.36 $\pm$ 1.94b	126.26 $\pm$ 2.68c	55.38 $\pm$ 0.30a	63	1 973.97	19 973.62ab
K ₀		—	—	—	—	0	1 656.03	18 951.05b

注:氮肥、磷肥、钾肥和复合肥成本 2017 年分别按 1.97、0.73、2.81 元·kg⁻¹和 2.70 元·kg⁻¹,稻谷按 2.57 元·kg⁻¹计;2018 年分别按 2.00、0.74、2.86 元·kg⁻¹和 2.74 元·kg⁻¹,稻谷按 2.70 元·kg⁻¹计;2019 年分别按 2.17、0.80、3.08 元·kg⁻¹和 2.97 元·kg⁻¹;稻谷按 2.58 元·kg⁻¹计;不计人工等其他成本。

Note: In 2017, the cost of nitrogen, phosphorus, potassium and compound fertilizer was 1.97, 0.73, 2.81, and 2.70 yuan·kg⁻¹, respectively. In 2018, the cost of each was 2.00, 0.74, 2.86, and 2.74 yuan·kg⁻¹, respectively. In 2019, the cost of each was 2.17, 0.80, 3.08, and 2.97 yuan·kg⁻¹, respectively. The cost of grain in three years was 2.57, 2.70, and 2.58 yuan·kg⁻¹, respectively. Workforce and other prices were out of consideration.

秆还田后钾肥适当减量可以显著提高钾肥利用效率。

随着钾肥用量的减少,经济效益呈先逐渐升高后下降的趋势。2017年,减钾20%处理条件下水稻生产获得最大的经济效益;2018年和2019年,减钾10%处理条件下的经济效益最高。当减钾量大于20%时,经济效益呈下降趋势。

3 讨论

3.1 小麦秸秆还田条件下钾肥减量对土壤全钾和速效钾含量的影响

本文的研究结果表明,小麦秸秆还田配施钾肥可以显著提高土壤全钾和速效钾含量,进而影响水稻对钾素的吸收利用及产量^[16-20],这与前人的研究结果一致^[21-24]。这可能是因为:秸秆腐解过程中钾素以离子态释放,增加了土壤水溶钾和速效钾含量,从而促进了水稻对钾素的吸收和产量的形成^[25]。同时,秸秆腐解过程产生的有机酸和氨基酸等物质,可以加速土壤矿物钾的释放,降低缓效钾的固定,从而增加土壤速效钾含量^[10,26]。廖育林等^[27]研究表明,化学钾肥和秸秆释放钾素以速效钾或缓效钾形式存在,提高了土壤供钾能力和土壤速效钾在全钾中的比例,有利于水稻吸收。梁成华等^[28]研究表明,秸秆还田后产生的腐解液、根系分泌物以及微生物代谢物均可以促进含钾矿物的缓慢溶解,显著提高土壤供钾能力。这与本文秸秆还田配施钾肥能够提高土壤速效钾含量(图1)的结果一致。

3.2 小麦秸秆还田条件下钾肥减量对水稻植株钾素吸收利用的影响

本文结果表明,钾肥减量20%以内,水稻生育前期的钾素含量和累积量差异不显著,在抽穗期以后差异显著(表2、图2),这可能是因为,在生育前期,钾肥施用加大了土壤环境中钾离子浓度,促进钾素向水稻根际的迁移^[29],提高水稻对钾素的吸收。同时秸秆腐解可以释放大量速效钾,满足水稻生长前期的钾素需求,维持水稻的钾素吸收。袁嫚嫚等^[30]研究表明,在水稻轮作体系下,秸秆还田配施化肥可以提高作物的养分累积量,增加肥料的利用率。张磊等^[31]研究表明,在秸秆还田条件下水稻季减少25%钾肥用量,土壤可以保持钾素平衡。本文的结果还表明,随着钾肥施用量的减少,水稻在不同生育时期钾素累积量呈现下降的趋势,尤其是生育后期更为明显,这可能是因为钾肥进入土壤中容易被土壤胶体和有机质吸附,或者被黏粒矿物所固定,降低了水稻对钾素的利用;另

一方面秸秆钾素在水稻生育前期大量释放,而在水稻生育后期,籽粒钾向茎叶转移,水稻需钾量下降,且土壤溶液中的秸秆钾和化学钾肥比例下降,导致水稻的钾素吸收下降。谢佳贵等^[32]研究表明,秸秆还田条件下钾素不足,对提高作物生育前期的钾素收获指数及回收率有显著影响。Zhao等^[33]研究表明,秸秆还田下钾肥亏缺不利于钾肥的利用率以及作物籽粒的吸钾量,这与本文研究结果一致。

3.3 小麦秸秆还田条件下钾肥减量对水稻产量的影响

本文结果表明,小麦秸秆还田条件下钾肥减量30%后水稻产量在前两年显著降低。可能的原因是:小麦秸秆还田后钾肥减量30%条件下土壤全钾和速效钾含量在水稻拔节期到抽穗期下降,造成水稻钾素吸收减弱,从而导致产量的下降。Singh等^[34]研究表明,水稻在生殖生长阶段需要大量的钾素,水稻抽穗期充足的钾肥供应可以提高水稻籽粒的质量。Huang等^[35]研究表明,秸秆还田在氮磷钾肥减量30%的条件下会导致供钾水平不足,作物抗性下降,从而影响产量。此外,充足的钾素可改善水稻土的还原环境,促进水稻根系对 Fe^{3+} 等养分的吸收,从而实现增产^[36-37]。本文研究结果发现,钾肥减量10%~20%条件下水稻产量提升,可能是因为钾肥减量提高了水稻秸秆氮钾比(表5)。3年内, $K_{90\%}$ 和 $K_{80\%}$ 的水稻氮钾比平均为0.45和0.43,均高于 $K_{100\%}$ (0.35)和 K_0 (0.37),这说明钾肥减量10%~20%更有利于钾在水稻体内的转移,从而提高产量。Zhang等^[38]研究认为,水稻高产需要合适的氮钾比,钾肥减量导致氮钾比升高,钾肥过量导致氮钾比过低,均不利于水稻产量形成,而通过合理施用氮磷钾肥能够调节氮钾比例,提高水稻养分吸收,进而促进水稻增产。

4 结论

(1)连续3年小麦秸秆还田条件下,与配方施肥相比($K_{100\%}$),钾肥减量10%对土壤速效钾素含量影响

表5 小麦秸秆还田不同减钾处理下水稻成熟期
秸秆(茎叶)氮钾比

Table 5 Effects of potassium reduction on N/K ratio of straw (stem and leaf) in mature stage of rice under wheat straw returning to soil condition

年份 Year	$K_{100\%}$	$K_{90\%}$	$K_{80\%}$	$K_{70\%}$	K_0
2017	0.48	0.57	0.51	0.46	0.42
2018	0.30	0.41	0.42	0.38	0.37
2019	0.28	0.36	0.35	0.32	0.33

不显著,但可以提高水稻钾素累积量;钾肥减量20%~30%条件下降低了土壤速效钾素含量和水稻钾素累积量;钾肥减量10%~30%均可以提高水稻钾素净累积量。

(2)小麦秸秆还田条件下钾肥减量10%~20%,对水稻产量影响不显著,但可以提高水稻钾素利用率和经济效益,是减肥增效的种植模式。

参考文献:

- [1] Larson B, Frisvold G. Fertilizers to support agricultural development in sub-Saharan Africa: What is needed and why[J]. *Food Policy*, 1996, 21(6):509-525.
- [2] Pettigrew W T. Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton[J]. *Physiologia Plantarum*, 2008, 133(4):670-681.
- [3] Römhild V, Kirkby E. Research on potassium in agriculture: Needs and prospects[J]. *Plant and Soil*, 2010, 335(1):155-180.
- [4] 李建军, 辛景树, 张会民, 等. 长江中下游粮食主产区25年来稻田土壤养分演变特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1):92-103.
LI Jian-jun, XIN Jing-shu, ZHANG Hui-min, et al. Evolution characteristics of soil nutrients in the main rice production regions, the middle-lower reach of Yangtze River of China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2015, 21(1):92-103.
- [5] Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT Database[DB/OL].[2019-10-16]. <http://faostat.fao.org/>.
- [6] Zorb C, Senbayram M, Peiter E. Potassium in agriculture—status and perspectives[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2014, 171(9):656-669.
- [7] 李书田, 刘晓永, 何萍. 当前我国农业生产中的养分需求分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6):1416-1432.
LI Shu-tian, LIU Xiao-yong, HE Ping. Analyses on nutrient requirements in current agriculture production in China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2017, 23(6):1416-1432.
- [8] 霍丽丽, 赵立欣, 孟海波, 等. 中国农作物秸秆综合利用潜力研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13):218-224.
HUO Li-li, ZHAO Li-xin, MENG Hai-bo, et al. Study on straw multi-use potential in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(13):218-224.
- [9] Haberman A, Dag A, Shtern N, et al. Long-term impact of potassium fertilization on soil and productivity in intensive olive cultivation[J]. *Agronomy-Basel*, 2019, 9(9):525-539.
- [10] 解文艳, 周怀平, 杨振兴, 等. 秸秆还田方式对褐土钾素平衡与钾库容量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4):936-942.
XIE Wen-yan, ZHOU Huai-ping, YANG Zhen-xing, et al. Effect of different straw return modes on potassium balance and potassium pool in cinnamon soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2015, 21(4):936-942.
- [11] Jiang W T, Liu X H, Wang Y, et al. Responses to potassium application and economic optimum K rate of maize under different soil indigenous K supply[J]. *Sustainability*, 2018, 10(7):2267-2277.
- [12] Zhu Q, Ozores-Hampton M, Li Y, et al. Potassium rates affected potassium uptake and use efficiency in drip-irrigated tomato[J]. *Agronomy Journal*, 2017, 109(6):2945-2956.
- [13] 刘秋霞, 戴志刚, 鲁剑巍, 等. 湖北省不同稻作区域秸秆还田替代钾肥效果[J]. 中国农业科学, 2015, 48(8):1548-1557.
LIU Qiu-xia, DAI Zhi-gang, LU Jian-wei, et al. Effect of the substitution of straw incorporation for K fertilization in different rice producing regions of Hubei Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(8):1548-1557.
- [14] 傅伟, 刘坤平, 陈洪松, 等. 秸秆还田替代化学钾肥对喀斯特峰丛洼地春玉米产量及土壤钾素的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(12):1823-1831.
FU Wei, LIU Kun-ping, CHEN Hong-song, et al. Spring maize yield and soil potassium balance under replacement of potassium with straw in karst peak-cluster depression[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(12):1823-1831.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Analysis of soil agricultural chemistry[M]. 3rd Edition. Beijing:China Agriculture Press, 2000.
- [16] Oosterhuis D M, Loka D A, Kawakami E M, et al. The physiology of potassium in crop production[J]. *Advances in Agronomy*, 2014, 126:203-233.
- [17] Maschmann E, Slaton N, Cartwright R, et al. Rate and timing of potassium fertilization and fungicide influence rice yield and stem rot[J]. *Agronomy Journal*, 2010, 102(1):163-170.
- [18] Yadavinder S, Bijay S, Ladha J K, et al. Long-term effects, of organic inputs on yield and soil fertility in the rice-wheat rotation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(3):845-853.
- [19] Zhang G, Johkan M, Hohjo M, et al. Plant growth and photosynthesis response to low potassium conditions in three lettuce (*Lactuca sativa*) types[J]. *Horticulture Journal*, 2017, 86(2):229-237.
- [20] Wang Y, Li B, Du M, et al. Mechanism of phytohormone involvement in feedback regulation of cotton leaf senescence induced by potassium deficiency[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2012, 63(16):5887-5901.
- [21] Panaullah G M, Timsina J, Saleque M A, et al. Nutrient uptake and apparent balances for rice-wheat sequences. III. Potassium[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2006, 29(1):173-187.
- [22] 王强盛, 甄若宏, 丁艳锋, 等. 钾肥用量对优质粳稻钾素积累利用及稻米品质的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(10):1444-1450.
WANG Qiang-sheng, ZHEN Ruo-hong, DING Yan-feng, et al. Effects of potassium fertilizer application rates on plant potassium accumulation and grain quality of Japonica rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(10):1444-1450.
- [23] Sui N, Yu C R, Song G L, et al. Comparative effects of crop residue incorporation and inorganic potassium fertilisation on apparent potassium balance and soil potassium pools under a wheat-cotton system[J]. *Soil Research*, 2017, 55(8):723-734.
- [24] 李继福, 鲁剑巍, 任涛, 等. 稻田不同供钾能力条件下秸秆还田替代钾肥效果[J]. 中国农业科学, 2014, 47(2):292-302.
LI Ji-fu, LU Jian-wei, REN Tao, et al. Effect of straw incorporation

- substitute for K-fertilizer under different paddy soil K supply capacities[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(2):292-302.
- [25] Zhan A, Zou C Q, Ye Y L, et al. Estimating on-farm wheat yield response to potassium and potassium uptake requirement in China[J]. *Field Crops Research*, 2016, 191:13-19.
- [26] Wu L, Zhang W J, Wei W J, et al. Soil organic matter priming and carbon balance after straw addition is regulated by long-term fertilization [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2019, 135:383-391.
- [27] 廖育林, 鲁艳红, 谢坚, 等. 长期施用钾肥和稻草对红壤双季稻田土壤供钾能力的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(2):456-467.
LIAO Yu-lin, LU Yan-hong, XIE Jian, et al. Effects of long-term application of chemical potassium fertilizer and incorporation of rice straw on potassium supplying capacity of red soil in double cropping paddy field[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(2):456-467.
- [28] 梁成华, 罗磊, 杜立宇, 等. 腐殖酸对耕地棕壤固钾与释钾作用的影响研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(3):468-472.
LIANG Cheng-hua, LUO Lei, DU Li-yu, et al. Effect of humic acids on fixation and release of potassium in cultivated brown soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(3):468-472.
- [29] Chen G, Li C L, Gao Z Y, et al. Driving the expression of RAA1 with a drought-responsive promoter enhances root growth in rice, its accumulation of potassium and its tolerance to moisture stress[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2018, 147:147-156.
- [30] 袁漫漫, 邬刚, 胡润, 等. 稻油轮作下秸秆还田配施化肥对作物产量及肥料利用率的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(12):101-108.
YUAN Man-man, WU Gang, HU Run, et al. Effects of straw returning plus fertilization on crop yield and fertilizer use efficiency in rice-rapeseed rotation system[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(12):101-108.
- [31] 张磊, 张维乐, 鲁剑巍, 等. 秸秆还田条件下不同供钾能力土壤水稻、油菜、小麦钾肥减量研究[J]. 中国农业科学, 2017, 50(19):3745-3756.
ZHANG Lei, ZHANG Wei-le, LU Jian-wei, et al. Study of optimum potassium reducing rate of rice, wheat and oilseed rape under different soil K supply levels with straw incorporation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(19):3745-3756.
- [32] 谢佳贵, 侯云鹏, 尹彩侠, 等. 施钾和秸秆还田对春玉米产量、养分吸收及土壤钾素平衡的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2014, 20(5):1110-1118.
XIE Jia-gui, HOU Yun-peng, YIN Cai-xia, et al. Effect of potassium application and straw returning on spring maize yield, nutrient absorption and soil potassium balance[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2014, 20(5):1110-1118.
- [33] Zhao X L, Wang H Y, Lu D J, et al. The effects of straw return on potassium fertilization rate and time in the rice-wheat rotation[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2019, 65(2):176-182.
- [34] Singh B, Singh Y, Imas P, et al. Potassium nutrition of the rice-wheat cropping system[J]. *Advances in Agronomy*, 2003:81:203-259.
- [35] Huang S, Zeng Y J, Wu J F, et al. Effect of crop residue retention on rice yield in China: A meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2013, 154:188-194.
- [36] Saleque M A, Kirk G J D. Root-induced solubilization of phosphate in the rhizosphere of lowland rice[J]. *New Phytologist*, 1995, 129(2):325-336.
- [37] Yeluripati J, Nayak D, Adhya T. Potassium application reduces methane emission from a flooded field planted to rice[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2006, 42(6):532-541.
- [38] Zhang F, Niu J F, Zhang W F, et al. Potassium nutrition of crops under varied regimes of nitrogen supply[J]. *Plant and Soil*, 2010, 335(1):21-34.