

长期秸秆还田下基于东北水稻高产和钾素平衡的钾肥用量研究

侯云鹏¹, 刘志全¹, 尹彩侠¹, 孔丽丽¹, 李前¹, 张磊¹, 王立春^{1*}, 徐新朋^{2*}

(1 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部东北植物营养与农业环境重点实验室, 吉林长春 130033;
2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要:【目的】通过 5 年定位试验, 系统研究东北稻区秸秆还田条件下不同钾肥用量对水稻产量、钾素利用率和土壤供钾能力的影响, 为秸秆还田下水稻钾肥合理施用提供科学依据。【方法】于 2015—2019 年在东北水稻主产区吉林省前郭县开展田间定位试验。共设 6 个钾肥用量 (K_2O) 处理, 分别为 0 (K0)、30 (K30)、60 (K60)、90 (K90)、120 (K120) 和 150 kg/hm^2 (K150), 水稻收获后, 测定籽粒产量与生物产量、植株钾含量及 0—20 和 20—40 cm 土层土壤速效钾、缓效钾和全钾含量, 并计算作物钾积累量、钾素利用效率和土壤-作物系统的钾素表观平衡状况。【结果】施钾可提高水稻籽粒产量和生物产量, 与不施钾相比, 平均增幅依次为 7.6%~14.5%、6.3%~10.9%, 以 K60 和 K90 处理籽粒产量和生物产量最高。不同施钾处理间收获指数没有显著差异。钾素表观回收率、农学利用率和偏生产力均随钾肥用量的增加而下降。K60、K90、K120 和 K150 处理 0—40 cm 土壤速效钾和缓效钾含量高于 K0 和 K30 处理, 全钾含量 6 个处理间没有显著差异。K90、K120 和 K150 处理 0—40 cm 土壤速效钾和缓效钾含量间也没有显著差异。在 5 年试验中, K0 和 K30 处理土壤钾素表观平衡均表现为亏缺, K60 处理农田钾素投入量和输出量基本平衡, 当钾肥用量增加至 90 kg/hm^2 以上, 农田钾素表观平衡呈现盈余状态, 并随钾肥用量的增加显著增加。盈余率与钾肥用量、籽粒产量、土壤速效钾含量、钾素利用效率分别进行拟合得出, 当盈余率为 0 时, 钾肥用量为 53.1 kg/hm^2 , 籽粒产量为 10035 kg/hm^2 , 0—20 和 20—40 cm 土壤速效钾含量分别为 103.04 和 91.56 mg/kg , 钾素表观回收率为 40.4%, 钾素农学利用率为 21.2 kg/kg , 钾素偏生产力为 202.2 kg/kg 。【结论】在秸秆还田条件下, 施用钾肥对水稻依然有明显增产效果。年施 K_2O 30 kg/hm^2 , 土壤钾素处于亏缺状态; 年施 K_2O 60 kg/hm^2 增产效果最好, 且土壤钾素处于基本平衡状态, 土壤速效钾和缓效钾含量处于稳定状态; 年施 K_2O 超过 90 kg/hm^2 后, 虽然钾盈余量增加, 但对土壤速效钾和缓效钾含量没有进一步增加的效果, 水稻产量甚至还有下降的趋势。以理论盈余率为 0 时钾肥用量的 95% 为置信区间, 钾肥用量在 50~56 kg/hm^2 范围内既可保证较高的水稻产量和钾素利用效率, 又可维持土壤供钾能力, 可作为东北稻区秸秆还田下水稻钾肥推荐用量。

关键词: 秸秆还田; 钾肥用量; 水稻产量; 钾素利用效率; 土壤钾; 钾素平衡

Optimum amount of potassium fertilizer based on high yield and soil potassium balance under straw return in rice production region of northeast China

HOU Yun-peng¹, LIU Zhi-quan¹, YIN Cai-xia¹, KONG Li-li¹, LI Qian¹, ZHANG Lei¹, WANG Li-chun^{1*}, XU Xin-peng^{2*}
(1 Agricultural Resources and Environment Research Institute, Jilin Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Plant Nutrition and Agro-Environment in Northeast Region, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Changchun 130033, China;
2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: 【Objectives】The effects of different amounts of potassium (K) fertilizer on rice yield, K utilization efficiency and the capacity of soil K supply under straw return in rice production region of northeast China were

收稿日期: 2020-07-13 接受日期: 2020-09-01

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD0200200); 国家自然科学基金项目 (31801938)

联系方式: 侯云鹏 E-mail: exceedfhvfa@163.com

* 通信作者 王立春 E-mail: wlc1960@163.com; 徐新朋 E-mail: xinpengxu@caas.cn

systematically studied, in order to provide scientific basis for rational K fertilizer application under straw return of rice. 【 **Methods** 】 A located field experiment was conducted in Qianguo County of Jilin Province during 2015–2019. Six rates of K fertilizer (K_2O) treatments were setup, including 0 kg/hm² (K0), 30 kg/hm² (K30), 60 kg/hm² (K60), 90 kg/hm² (K90), 120 kg/hm² (K120) and 150 kg/hm² (K150). After harvest each year, the grain and biomass yield, K content in plant were measured, and the contents of soil readily available, slowly available and total K in 0–20 cm and 20–40 cm depth were analyzed. The K accumulation, K utilization efficiency and apparent K balance in soil were calculated. 【 **Results** 】 Compared with K0 treatment, the grain and biomass yields were averagely increased by 7.6%–14.5% and 6.3%–10.9%, with the highest yields in K60 and K90 treatments. The harvest indexes were not significantly different among the K treatments. K recovery efficiency, agronomic efficiency and partial productivity declined with increasing of K application rate. The treatments of K60, K90, K120 and K150 increased the contents of readily available K and slowly available K in 0–40 cm soil, but did not in the total K contents, compared with K0 and K30 treatment. There was no significant difference in readily available K and slowly available K in 0–40 cm soil among the treatments of K90, K120 and K150. The apparent K balance of soil were in deficiency under K0 and K30 treatments during the five-years period, just in balance under the K60 treatment, and surplus under the K90, K120 and K150 treatments. When surplus rate of K was 0, the simulated K application rate was 53.1 kg/hm², the achieved grain yield would be 10035 kg/hm², readily available K contents in 0–20 cm and 20–40 cm soil be 103.04 mg/kg and 91.56 mg/kg, and the K recovery efficiency, agronomic efficiency and partial productivity be 40.4%, 21.2 kg/kg and 202.2 kg/kg, by simulating between K fertilizer rate, grain yield, soil readily available K content, K utilization efficiency and surplus rate, respectively. 【 **Conclusions** 】 Under the tested condition, the soil K apparent balance will be in deficit when annually K_2O rates is less than 30 kg/hm², just in balance when K_2O 60 kg/hm² is applied, and in surplus when K_2O rate is higher than 90 kg/hm². The high rice yield will be achieved at K_2O rate of 60–90 kg/hm², and the soil readily available and slowly available K contents will not be further increased at K_2O rate higher than 90 kg/hm². The simulated application rate with annual soil K surplus of zero is at the range of K_2O 50–56 kg/hm², in which the rice yield, the K fertilizer utilization efficiency and the capacity of soil K supply will be the highest under this experimental condition.

Key words: straw return; potassium application rate; rice yield; potassium utilization efficiency; soil potassium; potassium balance

钾 (K) 是作物必需的大量营养元素之一, 在细胞酶、蛋白质、淀粉、纤维素和维生素的合成, 营养物质的运输和吸收, 抵抗非生物和生物胁迫以及提高作物产质量等方面起着关键作用^[1]。施用钾肥可以改善作物对钾的吸收利用, 是保证作物增产、稳产的重要农业措施^[2]。

东北平原是我国水稻重要的产区, 常年种植面积约 507.1 万 hm², 总产量为 10 335 万 t 左右, 分别占全国水稻总播种面积的 16.8% 和总产的 17.7%^[3], 对保障国家粮食安全具有不可替代的作用。在养分管理中, 钾相比于氮 (N) 和磷 (P), 钾在提高谷物产量方面的作用较低且缓慢^[4-6]。故人们只注重氮、磷养分的投入, 而钾肥用量普遍不足, 不能维持土壤钾素的收支平衡, 农田钾素亏缺已成为农业生产可

持续发展的限制因素之一^[7]。然而受到我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意义。近年来, 随着农业现代化进程的发展, 水稻秸秆还田面积逐步增大。水稻吸收的钾素 70% 以上存在于秸秆中, 是重要的钾素资源^[8]。但由于秸秆还田后腐解周期较长, 其在当季的有效性与其钾存在较大差异^[9], 不适宜盲目的降低化肥钾用量, 因此研究秸秆还田条件下的钾肥用量对水稻生长发育和土壤供钾能力的影响极其重要。目前, 较多的研究表明, 通过合理利用秸秆生物质资源可以提高土壤有机质含量, 改善土壤结构, 提高土壤养分含量, 对作物具有普遍的增产效应^[10-12]; 而还田后作物秸秆中 90% 的钾离子可以快速释放并进入土壤, 与传统钾肥作用相近^[13]。但由于秸

秆钾的释放与植物钾素吸收的时效性并不一致,同时秸秆钾素投入后易受淋洗、入渗、径流等环境因素的影响,损失量较大,其有效性较化肥钾差^[14]。与秸秆离田相比,秸秆还田配施钾肥提高土壤供钾能力效果显著^[15];而当季秸秆还田可在降低钾肥用量20.0%~49.1%的同时,保证水稻小幅增产^[16]。但以上研究多从单一方面关注秸秆还田对作物产量或土壤供钾能力和水稻养分吸收利用的影响研究仍十分不足,且目前尚无东北稻区长期秸秆还田下钾肥适宜用量的有效评估。本研究在东北稻区通过5年定位试验研究,拟分析秸秆还田下不同钾肥用量对水稻产量、钾素利用效率、土壤供钾能力以及农田钾素表现平衡等综合影响,明确秸秆还田下钾肥适宜用量,以期为东北水稻秸秆资源利用和钾肥合理施用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区基本概况

试验于2015—2019年在吉林省前郭县套浩太村(44°49.6'38.15"N, 124°27.5'29.6"E)进行,试验区位于东北平原南端,平均海拔142.6 m,年降水量467 mm,年均气温4.6℃,年均日照时数2900 h左右,无霜期平均146天。试验地土壤类型为草甸土,试验起始时0—20和20—40 cm土壤养分状况:有机质含量分别为26.38和21.37 g/kg,水解性氮含量分别为125和97.6 mg/kg,有效磷含量分别为19.0和14.7 mg/kg,速效钾含量分别为104和92.7 mg/kg,缓效钾含量分别为900和817 mg/kg,全钾含量分别为12.2和11.3 g/kg, pH分别为6.82和6.73。

1.2 试验设计

试验在秸秆还田条件下,共设置6个钾肥(K₂O)用量处理,分别为0 kg/hm²(K0)、30 kg/hm²(K30)、60 kg/hm²(K60)、90 kg/hm²(K90)、120 kg/hm²(K120)和150 kg/hm²(K150)。不同施钾处理氮(N)、磷(P₂O₅)肥用量相同,分别为200和80 kg/hm²。氮肥按基肥40%、分蘖期40%、孕穗期20%施用,磷肥一次性基施,钾肥按基肥70%、孕穗期30%施用。供试氮肥为尿素(N 46%),磷肥为磷酸二铵(P₂O₅ 46%, N 18%),钾肥为氯化钾(K₂O 60%)。供试水稻品种为吉粳518。5月16日至21日移栽,大田栽插密度为20万穴/hm²,9月30日至10月2日收获。小区面积为30 m²,随机区组排列,重复3次。小区间筑埂并

用塑料薄膜包裹,并且各小区有独立的灌/排水沟,防止试验各小区窜水窜肥。其他田间管理措施按常规生产田进行。

秸秆用量:为保证试验一致性,根据试验区水稻秸秆生产水平,统一用量为9000 kg/hm²,折合K₂O 90 kg/hm²。秸秆还田前经机器粉碎,长度约为10 cm,于上季水稻收获后进行翻压、整平。

1.3 测定项目与方法

每季水稻收获时,在每个小区中取3个有代表性的1 m × 1 m样方测定籽粒产量,测定籽粒样品水分含量,并将其转换为水稻标准水分含量14%计算产量。从每个小区随机采集10穴植株样品,分为稻草和稻谷两部分;105℃杀青后,70℃烘干至恒重,称重估算生物量。样品称重后经粉碎,采用H₂SO₄-H₂O₂消煮—火焰光度法测定钾含量。

每季水稻收获后,用直径5 cm、长度50 cm的管状取样器,在每个小区采集0—40 cm土壤样品,每20 cm分为一层,每个小区采集10个土样,充分混匀,拣出杂草和碎石,按照“四分法”取1 kg带回实验室,采用鲍士旦^[17]的方法测定土壤速效钾、缓效钾和全钾含量,风干后用木槌研磨,取过1 mm筛的土壤样品5 g,加入1 mol/L醋酸铵溶液(土液比1:10)浸提,震荡30 min后过滤,用火焰光度计测定土壤速效钾含量;再取过1 mm筛的土壤样品5 g,加入2 mol/L的硝酸溶液(土液比1:4)浸提,用火焰光度计测定缓效钾含量,缓效钾含量等于硝酸提取钾减去醋酸铵提取钾。取过0.25 mm筛的土壤样品5 g和氢氧化钠2.50 g放入镍坩锅中,700℃高温条件下完全熔融,用火焰光度计测定全钾含量。

1.4 数据处理与分析

钾素利用效率包括钾素表现回收率、钾素农学利用率和钾素偏生产力^[18];

钾素表现回收率(%) = (收获期施钾区作物吸钾量 - 不施钾区作物吸钾量) / 施钾量 × 100;

钾素农学利用率(kg/kg) = (施钾区作物产量 - 不施钾区作物产量) / 施钾量;

钾素偏生产力(kg/kg) = 施钾区作物产量 / 施钾量;

收获指数 = 籽粒产量 / 总生物量;

土壤钾素表现盈亏量(kg/hm²) = 投入钾素总量 - 作物吸收钾素总量;

钾素盈余率(%) = (投入钾素总量 - 作物吸收钾

素总量)/作物吸收钾素总量 $\times 100$;

试验数据采用 Excel 进行整理, 用 SAS 9.0 软件进行两因素 (年份和施肥处理) 方差分析, 处理间多重比较采用 LSD-test ($P < 0.05$ 为显著) 法; 用 SigmaPlot 10.0 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同施钾处理水稻产量

由表 1 可知, 年份对籽粒产量和生物产量影响显著, 对收获指数影响不显著; 钾肥用量对籽粒产量、生物产量影响极显著, 对收获指数影响不显著; 两因素间的交互效应仅对籽粒产量和生物产量影响显著。与不施钾肥处理相比, 施钾各处理在不同年份均显著提高了籽粒产量和生物产量, 5 年平均增幅分别为 7.6%~14.5%、6.3%~10.9%, 增幅均达显著水平 ($P < 0.05$)。在不同钾肥用量下, 籽粒产量和生物产量在钾肥用量 30~60 kg/hm² 范围内随钾肥用量的增加而增加, 当钾肥用量增加至 90 kg/hm² 后, 籽粒产量和生物产量呈下降趋势。而不同钾肥用量条件下收获指数无显著差异 ($P > 0.05$)。此外, 随着试验年限的增加, 施钾增产效果呈先增后降趋势, 以 2016 和 2017 年增产效果最高。

2.2 不同施钾处理钾素利用效率

2015—2019 年连续 5 年定位试验结果 (图 1) 显示, 年份对钾素表观回收率、农学利用率和偏生产力影响不显著, 钾肥用量对钾素表观回收率、农学利用率和偏生产力影响均极显著, 而两因素间的交互效应均未达显著水平。在同一年份钾素农学利用率在钾肥用量 30~60 kg/hm² 范围内差异不显著 ($P > 0.05$), 当钾肥用量增加至 90 kg/hm² 后, 钾素农学利用率显著下降; 而钾素表观回收率和钾素偏生产力均随钾肥用量的增加呈显著下降趋势。在相同施钾水平下, 水稻钾素表观回收率和农学利用率随试验年限的延长呈先增后降趋势, 其中以 2017 年最高; 而不同年份间钾素偏生产力无显著差异。

2.3 不同施钾处理土壤速效钾、缓效钾和全钾含量

图 2 显示, 连续施用钾肥年限对 0—20 和 20—40 cm 土壤速效钾和缓效钾含量影响显著, 对土壤全钾含量影响不显著, 钾肥用量对 0—20 和 20—40 cm 土壤速效钾含量和缓效钾含量影响极显著, 对土壤全钾含量影响不显著, 而两因素间的交

互效应均未达显著水平。在同一年份, 当施钾量在 60 kg/hm² 以上时, 0—20 和 20—40 cm 土壤速效钾和缓效钾含量显著高于不施钾肥处理, 各施钾处理间差异不显著。与试验起始时相比, 不施钾肥 (K0) 和低施钾量 (K30) 处理两个土层的土壤速效钾含量均呈下降趋势, 截止至 2019 年水稻收获后, 0—20 和 20—40 cm 土层速效钾含量较试验起始时分别下降了 10.3%、5.2% 和 6.9%、3.6%, 差异均达显著水平 ($P < 0.05$); 施钾量增加至 60 kg/hm² 及以上时, 土壤速效钾含量与起始时差异均未达显著水平 ($P > 0.05$), 而不同施钾处理土壤缓效钾和全钾含量与试验起始时差异均未达显著水平 ($P > 0.05$)。

2.4 不同施钾处理农田钾素收支表观平衡

表 2 表明, 5 年连续种植水稻, K0 和 K30 处理钾素均处于亏缺状态, 亏缺率分别为 21.5%~29.4% 和 6.6%~16.5%, 平均钾素亏缺率为 26.4% 和 12.9%。每季水稻钾肥用量增加至 60 kg/hm², 不同年份间钾素盈余率在 -3.1%~5.4%, 5 年平均盈余率仅为 1.2%, 可认为 K60 处理农田钾素收支呈平衡状态。当每季水稻钾肥用量增加至 90 kg/hm², 不同年份间钾素盈余率在 17.9%~29.6%, 5 年平均盈余率为 22.4%, 农田钾素收支呈现盈余状态, 并随钾肥用量的增加呈增加趋势。

2.5 盈余率与钾肥用量、籽粒产量、土壤速效钾含量和钾素利用效率的关系

回归分析结果 (图 3) 显示, 钾盈余率与籽粒产量呈极显著二次相关 ($P < 0.01$, $r = 0.6417$); 与 0—20 和 20—40 cm 土壤速效钾含量呈极显著线性相关 (0—20 cm $P < 0.01$, $r = 0.7745$; 20—40 cm $P < 0.01$, $r = 0.7495$); 与钾素表观回收率呈极显著指数相关 ($P < 0.01$, $r = 0.9742$); 与钾素农学利用率呈极显著线性相关 ($P < 0.01$, $r = 0.9528$); 与钾素偏生产力呈极显著指数相关 ($P < 0.01$, $r = 0.9473$); 将回归方程联立并通过内插法计算, 当盈余率为 0 时, 钾肥用量为 53.1 kg/hm², 籽粒产量为 10035 kg/hm², 0—20 和 20—40 cm 土壤速效钾含量分别为 103.04 和 91.56 mg/kg, 钾素表观回收率为 40.4%, 农学利用率为 21.2 kg/kg, 偏生产力为 202.2 kg/kg; 计算所得的理论籽粒产量、土壤速效钾含量和钾素利用效率与实际最高产量处理 (K60) 相近。以理论盈余率为 0 时施钾量的 95% 作为置信区间, 计算出施钾范围在 50~56 kg/hm²。

表 1 不同施钾处理籽粒产量、生物产量和收获指数
Table 1 Grain yield, biomass yield and harvest index under different K treatments

年份 Year	处理 Treatment	籽粒产量 (kg/hm ²) Grain yield	生物产量 (kg/hm ²) Biomass production	收获指数 Harvest index
2015	K0	9156 ± 261 c	18500 ± 245 c	0.49 ± 0.01 a
	K30	9880 ± 396 b	19670 ± 399 b	0.50 ± 0.01 a
	K60	10587 ± 479 a	20596 ± 302 a	0.51 ± 0.02 a
	K90	10503 ± 377 ab	20578 ± 330 a	0.51 ± 0.01 a
	K120	10257 ± 495 ab	20213 ± 236 ab	0.51 ± 0.01 a
	K150	10048 ± 244 ab	19912 ± 596 ab	0.50 ± 0.01 a
2016	K0	8786 ± 262 c	17798 ± 355 c	0.49 ± 0.01 a
	K30	9558 ± 436 b	18989 ± 165 b	0.50 ± 0.02 a
	K60	10126 ± 374 a	19680 ± 416 a	0.51 ± 0.01 a
	K90	10053 ± 439 a	19662 ± 337 a	0.51 ± 0.01 a
	K120	9777 ± 275 ab	19138 ± 361 b	0.51 ± 0.02 a
	K150	9698 ± 135 ab	19126 ± 235 b	0.51 ± 0.01 a
2017	K0	9291 ± 259 c	18539 ± 567 c	0.50 ± 0.01 a
	K30	10087 ± 282 b	19945 ± 655 b	0.51 ± 0.01 a
	K60	10829 ± 235 a	21120 ± 302 a	0.51 ± 0.01 a
	K90	10715 ± 207 a	20878 ± 271 a	0.51 ± 0.01 a
	K120	10427 ± 215 ab	20520 ± 338 ab	0.51 ± 0.01 a
	K150	10323 ± 249 ab	20318 ± 495 ab	0.51 ± 0.01 a
2018	K0	8875 ± 280 c	17591 ± 499 b	0.50 ± 0.01 a
	K30	9359 ± 122 b	18725 ± 362 a	0.50 ± 0.01 a
	K60	9933 ± 106 a	19525 ± 452 a	0.51 ± 0.02 a
	K90	9816 ± 153 ab	19094 ± 408 a	0.51 ± 0.01 a
	K120	9660 ± 155 ab	19061 ± 536 a	0.51 ± 0.02 a
	K150	9483 ± 187 ab	19036 ± 381 a	0.50 ± 0.01 a
2019	K0	9103 ± 425 c	19031 ± 250 b	0.48 ± 0.01 a
	K30	9782 ± 278 b	19905 ± 305 a	0.49 ± 0.01 a
	K60	10288 ± 293 a	20551 ± 623 a	0.50 ± 0.01 a
	K90	10207 ± 186 ab	20480 ± 329 a	0.50 ± 0.01 a
	K120	10098 ± 431 ab	20423 ± 678 a	0.49 ± 0.02 a
	K150	9920 ± 293 ab	20304 ± 344 a	0.49 ± 0.01 a
均值 Mean	K0	9042 ± 168.9 c	18292 ± 102 d	0.49 ± 0.01 a
	K30	9733 ± 194.8 b	19447 ± 223 c	0.50 ± 0.02 a
	K60	10353 ± 107.2 a	20294 ± 240 a	0.51 ± 0.01 a
	K90	10259 ± 117.0 a	20138 ± 91 a	0.51 ± 0.01 a
	K120	10044 ± 73.9 ab	19871 ± 105 b	0.51 ± 0.01 a
	K150	9895 ± 116.9 b	19739 ± 153 b	0.50 ± 0.01 a
方差分析 ANOVA				
年份 Year (Y)		*	*	ns
施钾处理 K treatment (K)		**	**	ns
Y × K		*	*	ns

注 (Note): 同列数值后不同小写字母表示同一年份各处理间差异显著 Values followed by different small letters in the same column mean significant difference among treatments ($P < 0.05$) in the same year; ns— $P > 0.05$; *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.

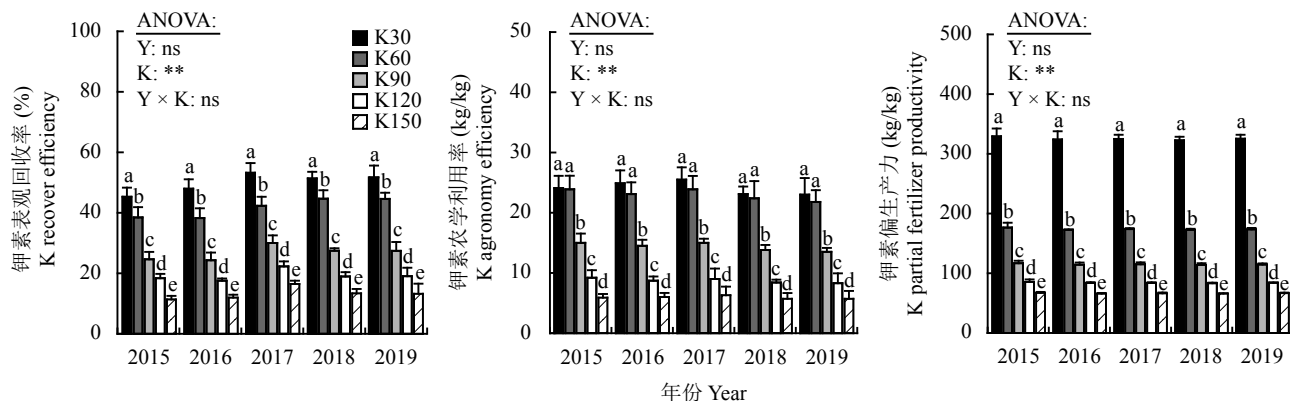


图 1 不同施钾处理钾素利用效率

Fig. 1 K utilization efficiency under different K treatments

[注 (Note): Y—年份 Year; K—施钾处理 K treatment.; KRE—K recover efficiency; KAE—K agronomy efficiency; KPFP—K partial fertilizer productivity; 柱上不同小写字母表示同一年份各处理间差异达到显著水平 ($P < 0.05$) Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$) in the same year; ns—差异不显著 Not significant; **— $P < 0.01$.]

3 讨论

3.1 长期秸秆还田下施用钾肥对水稻产量的影响

钾是植物生长发育所必需的矿质元素, 植株对钾素的吸收、同化和利用直接影响籽粒产量^[19]。相关研究表明, 施钾可显著提高水稻产量^[20]。本研究中, 不同年际间水稻产量由于受环境和气候条件的影响有所波动, 但施钾处理间规律相似。施钾处理水稻籽粒产量、生物产量和收获指数均高于不施钾肥处理。主要是由于施钾能够显著提高作物光合效率、延缓叶片衰老, 促进碳水化合物转化, 增加灌浆强度, 进而提高生物产量和光合产物转化为经济产量的能力^[21-22]。但钾肥用量并非越多越好, 相关研究指出, 当钾肥超过一定量后, 水稻产量随之降低^[23-24]。本研究结果也表明, 当钾肥用量增加至 90 kg/hm²后, 水稻籽粒产量、生物产量和收获指数均呈下降趋势。主要是由于当钾肥用量超过作物所需时, 会引起水稻拔节前吸钾比例较大, 从而减少有效穗数, 造成减产^[25]。

3.2 长期秸秆还田下施用钾肥对钾素利用效率的影响

表征农田肥料利用效率在国际上常用肥料养分回收率、农学利用率和偏生产力等 3 个指标^[26]。分别从作物对施入土壤中肥料的回收效率、单位施肥量所增加的作物产量以及籽粒产量等 3 方面描述作物对肥料的利用效率。而肥料利用效率由产量和施肥量共同决定。较多的研究表明, 随着施肥水平的提高, 肥料利用效率均呈下降趋势^[27-28], 往往作物获得

了最高产量施肥量, 而肥料利用效率并不是最高^[29]。本研究中, 随着施钾量的增加, 钾素表观回收率、农学利用率和偏生产力均呈下降趋势, 以 K30 处理最高; 而水稻产量随钾肥用量的增加先增后降, 以 K60 处理最高。主要原因是 K60 处理的钾素投入量高于 K30 处理; 而与 K90、K120 和 K150 处理相比, K60 处理钾素利用效率和产量也有一定提高。这表明秸秆还田下适宜的施钾量虽然会使钾素利用效率有所降低, 但可提高水稻产量, 而钾肥投入不足虽使得钾肥利用效率较高, 但是以获得较低的作物产量和耗竭土壤肥力为代价获得的。而过量施钾不仅无法进一步提高产量, 还使钾肥利用效率显著降低。因此应综合考虑产量和土壤养分状况等因素, 以获得较高的产量和避免耗竭土壤养分, 减少钾肥的损失^[30-31]。

3.3 长期秸秆还田下施用钾肥对土壤供钾能力与农田钾素平衡的影响

作物生长发育所需钾素主要来自于土壤, 土壤是植物生长的养分“库”。而施用钾肥是补充土壤钾库储量和供钾能力的重要途径。由于土壤养分含量的不同取决于农田多年养分平衡状况的累积^[32], 因此钾素管理是否合理, 除了要考虑产量、经济效益和肥料利用效率等指标外, 土壤供钾能力变化和农田钾素平衡状况也应作为钾肥施用是否合理的重要依据。肖克等^[33]指出, 单施化肥钾条件下, 当前推荐钾肥用量并不能弥补作物收获带走的钾量, 使土壤钾素耗竭^[34], 而增加钾肥用量虽然可以减少土壤负表观钾平衡, 但不能获得较高的收益和钾素利用效

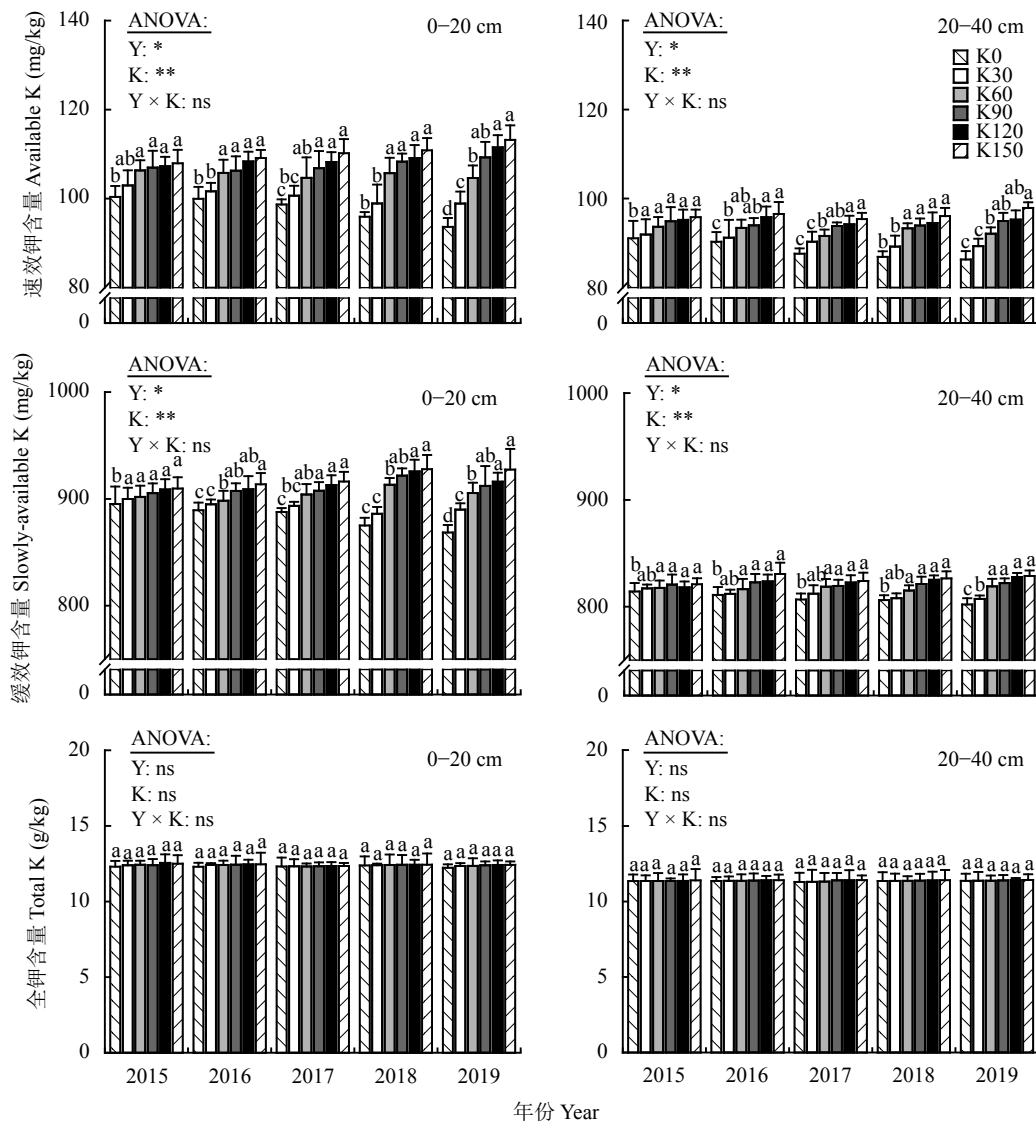


图2 不同施钾处理0—20和20—40 cm土层土壤速效钾、缓效钾和全钾含量

Fig. 2 The contents of readily available, slowly available and total K in 0–20 cm and 20–40 cm soil layers under different K treatments

[注 (Note) : Y—年份 Year; K—施钾处理 K treatment. 柱上不同小写字母表示同一年份各处理间差异显著 Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments in the same year ($P < 0.05$); ns—差异不显著 Not significant; **— $P < 0.01$.]

率。因此,利用秸秆钾素资源,是解决土壤钾素亏缺最有效的途径^[35]。但是,单施秸秆并不能维持土壤钾素收支平衡,秸秆还田需配施一定量的钾肥才可使土壤钾素处于平衡或盈余状况^[9,15,36-37]。本研究发现,与试验起始时相比,在秸秆还田下不施钾肥处理(K0)和低施钾量处理(K30)由于钾素移走量高于钾素投入量,土壤钾素表观平衡表现为亏缺状态,并降低了土壤速效钾含量;当钾肥用量增加至60 kg/hm²,水稻5年平均钾素移走量占钾素投入总量的99.5%,钾素投入与支出基本保持平衡,土壤速效钾含量与试验起始时相近;而当钾肥用量增加至90

kg/hm²后,钾素投入总量远高于水稻对钾素的需求,使土壤钾素表观平衡呈盈余状态。可见,秸秆还田的意义在于只能替代部分化肥钾,减缓土壤钾素耗竭。虽然东北地区土壤含钾丰富^[32],在速效钾亏缺状态下,土壤缓效钾还可不断转化为速效钾,维持土壤速效钾库平衡,但长期钾素亏缺会造成农田钾素库容减少,土壤供钾能力下降。因此在水稻养分管理中,需要在秸秆还田下增施适量化学钾肥,维持土壤钾的供应能力。

3.4 长期秸秆还田下水稻钾肥适宜用量确定

目前,确定肥料适宜用量大多用施肥量与作物

表 2 不同施钾处理土壤钾素表现平衡
Table 2 Apparent K balance of soil under different K treatments

年份 Year	处理 Treatment	投入量 Input (kg/hm ²)		作物移走量 (kg/hm ²) Crop removal	表观平衡 (kg/hm ²) Apparent balance	盈余率 (%) Surplus rate
		秸秆钾 Straw K	化肥钾 Chemical K			
2015	K0	90	0	125.5 ± 1.5 c	-35.5 ± 3.9 f	-28.0 ± 2.4 f
	K30	90	30	139.1 ± 3.7 b	-19.1 ± 1.8 e	-13.6 ± 0.6 e
	K60	90	60	148.6 ± 1.2 a	1.4 ± 0.2 d	1.1 ± 0.1 d
	K90	90	90	147.7 ± 1.8 a	32.3 ± 0.8 c	21.9 ± 0.6 c
	K120	90	120	147.6 ± 2.3 a	62.4 ± 2.5 b	42.6 ± 2.5 b
	K150	90	150	142.6 ± 2.5 a	97.4 ± 5.3 a	68.5 ± 4.9 a
2016	K0	90	0	119.6 ± 1.8 c	-29.6 ± 2.4 f	-24.6 ± 3.8 f
	K30	90	30	134.8 ± 4.8 b	-14.8 ± 1.7 e	-10.9 ± 1.5 e
	K60	90	60	142.4 ± 5.4 a	7.6 ± 1.5 d	5.4 ± 1.1 d
	K90	90	90	141.2 ± 4.0 a	38.8 ± 2.1 c	29.6 ± 1.6 c
	K120	90	120	139.7 ± 3.9 a	70.3 ± 3.2 b	52.0 ± 2.7 b
	K150	90	150	138.4 ± 4.5 ab	101.6 ± 4.5 a	73.5 ± 4.3 a
2017	K0	90	0	124.6 ± 1.9 c	-34.6 ± 2.3 f	-27.7 ± 1.2 f
	K30	90	30	143.7 ± 3.6 b	-23.7 ± 3.6 e	-16.5 ± 2.1 e
	K60	90	60	154.9 ± 3.2 a	-4.9 ± 0.7 d	-3.1 ± 2.0 d
	K90	90	90	152.9 ± 2.9 ab	27.1 ± 2.5 c	17.9 ± 1.8 c
	K120	90	120	149.2 ± 4.8 b	60.8 ± 1.8 b	40.8 ± 2.6 b
	K150	90	150	147.9 ± 3.2 b	92.1 ± 3.2 a	62.5 ± 4.3 a
2018	K0	90	0	114.7 ± 1.5 d	-24.7 ± 1.5 f	-21.5 ± 3.1 f
	K30	90	30	128.5 ± 0.4 c	-8.5 ± 0.4 e	-6.6 ± 0.3 e
	K60	90	60	145.8 ± 4.4 a	4.2 ± 0.9 d	3.0 ± 0.9 d
	K90	90	90	141.5 ± 2.0 ab	38.5 ± 2.0 c	27.2 ± 1.8 c
	K120	90	120	138.8 ± 4.4 b	71.2 ± 4.3 b	51.8 ± 3.1 b
	K150	90	150	135.5 ± 3.5 b	104.5 ± 4.2 a	77.4 ± 4.0 a
2019	K0	90	0	127.6 ± 4.7 d	-37.6 ± 1.3 f	-29.4 ± 2.6 f
	K30	90	30	143.5 ± 3.6 c	-23.5 ± 2.9 e	-16.2 ± 1.9 e
	K60	90	60	154.2 ± 3.2 a	-4.2 ± 0.6 d	-2.6 ± 1.0 d
	K90	90	90	152.2 ± 2.7 ab	27.8 ± 2.1 c	18.4 ± 2.9 c
	K120	90	120	150.9 ± 3.5 ab	59.1 ± 3.5 b	39.2 ± 3.2 b
	K150	90	150	146.8 ± 3.7 bc	93.2 ± 3.0 a	63.7 ± 3.7 a
平均 Average	K0	90	0	122.4 ± 4.4 d	-32.4 ± 1.5 f	-26.4 ± 2.7 f
	K30	90	30	137.9 ± 4.2 c	-17.9 ± 1.6 e	-12.9 ± 1.0 e
	K60	90	60	149.2 ± 2.7 a	0.8 ± 0.2 d	1.2 ± 0.1 d
	K90	90	90	147.1 ± 1.8 a	32.9 ± 1.8 c	22.4 ± 1.5 c
	K120	90	120	145.2 ± 3.7 ab	64.8 ± 2.7 b	44.8 ± 3.4 b
	K150	90	150	142.2 ± 3.1 bc	97.8 ± 4.5 a	68.8 ± 4.5 a

注 (Note): 同列数值后不同小写字母表示同一年份各处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in the same column mean significant difference among treatments in the same year ($P < 0.05$).

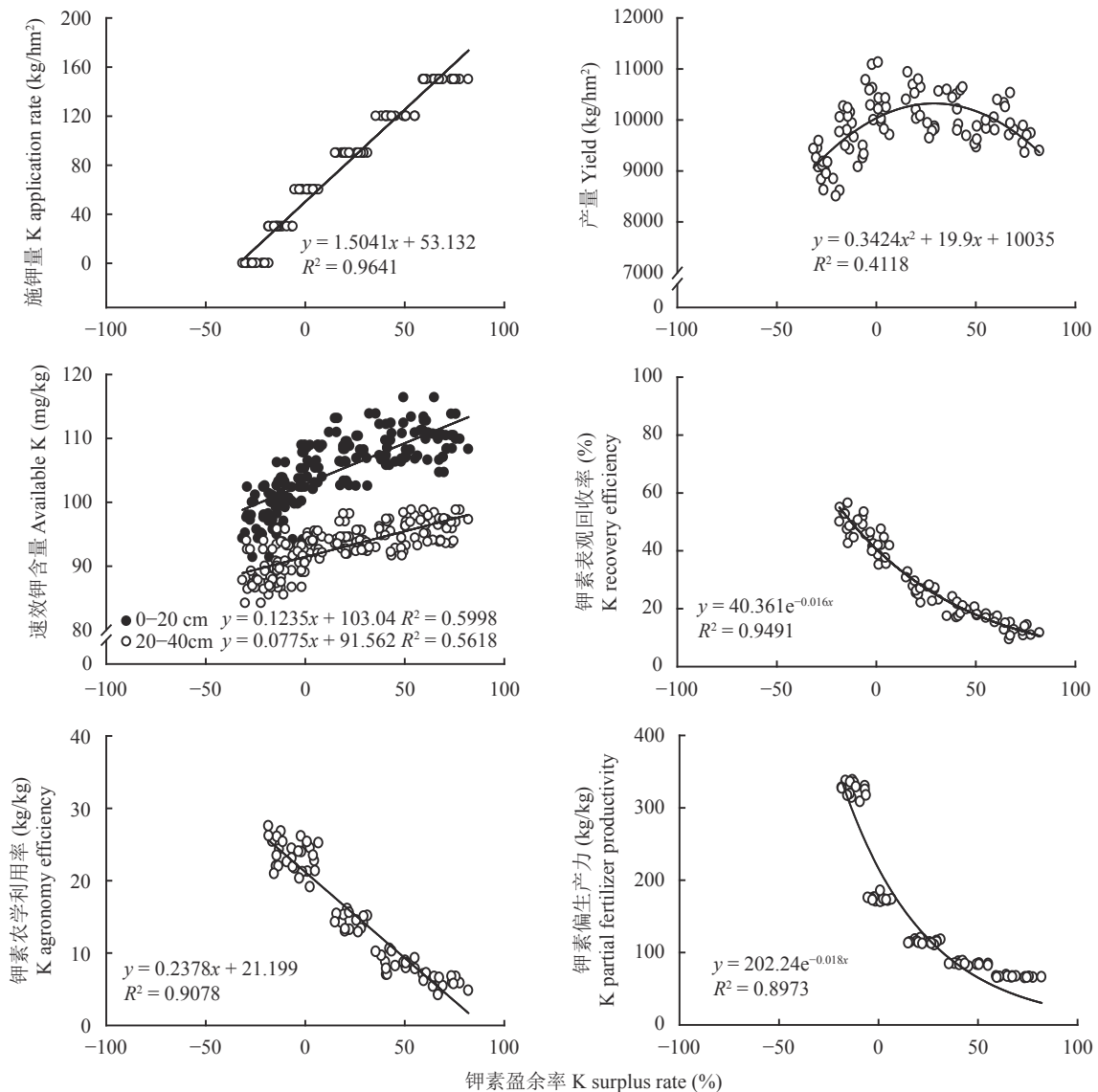


图3 钾素盈余率与施钾量、籽粒产量、土壤速效钾含量和钾素利用效率的关系

Fig. 3 The correlation of K surplus rate with K application rate, grain yield, soil readily available K content and K utilization efficiencies

产量拟合, 利用二次多项式模型、线性加平台模型、二次型加平台模型、指数模型和平方根模型等计算推荐施肥量^[38], 但这些模型均缺乏对土壤养分变化和农田养分收支平衡状况的考虑。推荐施肥量虽然可获得最高的籽粒产量或经济效益, 但却不能确保农田养分收支平衡, 具有一定局限性。因此推荐施肥量应同时关注作物的产量效应、土壤养分变化和农田养分收支平衡等方面。张君等^[39]以作物产量、土壤无机氮含量和氮素平衡等作为氮肥推荐的依据, 提出的氮肥投入阈值可实现作物高产和降低土壤氮素损失量的双重目标。本研究对钾肥用量与钾素盈余率拟合发现, 两者呈极显著的线性关系, 因

此用盈余率与水稻产量、土壤速效钾含量和钾素利用效率的关系确定钾肥用量更为合理。本研究中, 盈余率与水稻产量、土壤速效钾含量和钾素利用效率均呈极显著的二次、线性和指数相关, 当盈余率为0时, 钾肥用量为53.1 kg/hm², 籽粒产量为10035 kg/hm², 0—20和20—40 cm土壤速效钾含量分别为103.04和91.56 mg/kg, 钾素表观回收率、农学利用率和偏生产力分别为40.4%、21.2 kg/kg和202.2 kg/kg; 其结果与实际最高产量处理(K60)间相近。由此可确定适宜钾肥用量为53.1 kg/hm², 以理论盈余率为0时施钾量的95%作为置信区间, 计算施钾范围在50~56 kg/hm²。在该施钾范围内既可获得较

高的水稻产量又能维持土壤钾素收支平衡, 可作为秸秆还田下钾肥适宜用量依据。

本研究通过 5 年定位试验确定的适宜施钾量, 可作为秸秆还田下一种兼顾产量与环境效益的优化施钾阈值。但本研究中秸秆还田量为当前该区域水稻秸秆平均产量水平, 而不同区域的秸秆产量必定存在差异。因此, 在不同秸秆还田量下, 钾素养分管理应以区域平均适宜施钾量为基础, 并考虑不同秸秆量还田后带入的秸秆钾素与养分平衡情况, 以此确定钾素用量。进而适当减少化肥钾施用量, 提高钾肥的利用率, 增加农田系统的经济效益。

4 结论

在东北稻区秸秆还田下, 施钾依然具有显著的增产效果, 但当施钾量达到 60 kg/hm² 时, 籽粒产量最高, 再增加钾用量不会提高甚至在一定程度上降低水稻产量。施用钾肥可显著提高 0—40 cm 土壤中的速效钾和缓效钾含量, 对全钾含量没有显著影响。但是当施钾量超过 90 kg/hm² 时, 土壤速效钾和缓效钾含量没有显著增加。年施 K₂O 60 kg/hm², 土壤钾素处于平衡状态, 5 年后土壤速效钾和缓效钾含量与试验起始时没有显著变化。不施钾和年施 K₂O 30 kg/hm², 土壤钾素均处于亏缺状态。利用钾肥用量与钾素盈余率进行拟合, 计算出本试验条件下, K₂O 用量为 53.1 kg/hm² 时, 盈余率为 0, 最佳施钾范围在 50~56 kg/hm²。

参 考 文 献:

- [1] 陆景陵. 植物营养学[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1994.
Lu J L. Plant nutrition[M]. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1994.
- [2] Singh B, Singh Y, Imas P, *et al.* Potassium nutrition of the rice-wheat cropping system[J]. *Advances in Agronomy*, 2004, 81: 203–258.
- [3] 国家统计局. 中国统计年鉴2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook 2019[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [4] Tan D, Jin J Y, Jiang L H, *et al.* Potassium assessment of grain producing soils in north China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 148: 65–71.
- [5] 王寅, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 长江流域直播冬油菜氮磷钾硼肥施用效果[J]. *作物学报*, 2013, 39(8): 1491–1500.
Wang Y, Lu J W, Li X K, *et al.* Effects of nitrogen, phosphorus, potassium, and boron fertilizers on winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) direct-sown in the Yangtze River Basin[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(8): 1491–1500.
- [6] 侯云鹏, 陆晓平, 赵世英, 等. 平衡施肥对春玉米产量及养分吸收的影响[J]. *玉米科学*, 2014, 22(4): 126–131.
Hou Y P, Lu X P, Zhao S Y, *et al.* Effect of balanced fertilization on spring maize yield and nutrient absorption[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2014, 22(4): 126–131.
- [7] He P, Yang L P, Xu X P, *et al.* Temporal and spatial variation of soil available potassium in China (1990–2012)[J]. *Field Crops Research*, 2015, 173: 49–56.
- [8] Yu C J, Qin J G, Xu J, *et al.* Straw combustion in circulating fluidized bed at low-temperature: Transformation and distribution of potassium[J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2010, 88(5): 874–880.
- [9] 郑志斌, 江秋菊, 张跃强, 等. 长期施用化肥和秸秆对紫色土非交换性钾释放特性研究[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2017, 39(9): 139–144.
Zheng Z B, Jiang Q J, Zhang Y Q, *et al.* Study of the effects of long-term chemical fertilization and straw returning on the characteristics of nonexchangeable potassium release in purple soil[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2017, 39(9): 139–144.
- [10] Wang X B, Wu H J, Dai K. Tillage and crop residue effects on rainfed wheat and maize production in northern China[J]. *Field Crops Research*, 2011, 132: 106–116.
- [11] 成臣, 汪建军, 程慧焯, 等. 秸秆还田与耕作方式对双季稻产量及土壤肥力质量的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55(1): 247–257.
Cheng C, Wang J J, Cheng H H, *et al.* Effects of straw returning and tillage system on crop yield and soil fertility quality in paddy field under double-cropping-rice system[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(1): 247–257.
- [12] 韩宾, 李增嘉, 王芸, 等. 土壤耕作及秸秆还田对冬小麦生长状况及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(2): 48–53.
Han B, Li Z J, Wang Y, *et al.* Effects of soil tillage and returning straw to soil on wheat growth status and yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(2): 48–53.
- [13] Li J F, Lu J W, Li X K, *et al.* Dynamics of potassium release and adsorption on rice straw residue[J]. *PLoS ONE*, 2014, 9(2): e90440.
- [14] 姜超强, 郑青松, 祖朝龙. 秸秆还田对土壤钾素的影响及其替代钾肥效应研究进展[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(4): 1158–1165.
Jiang C Q, Zheng Q S, Zu C L. Research progress on effects of straw returning on soil potassium and its substitute for potassium fertilizer[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(4): 1158–1165.
- [15] 曾研华, 范呈根, 吴建富, 等. 等养分条件下稻草还田替代双季早稻氮钾肥比例的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(3): 658–668.
Zeng Y H, Fan C G, Wu J F, *et al.* Replacement ratio of nitrogen and potassium fertilizer by straw incorporation in early rice under the same nitrogen, phosphorus and potassium input[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(3): 658–668.
- [16] 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 J F, Lu J W, Ren T, *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.
- [17] 鲍士旦, 土壤农化分析(第3版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (3rd Edition)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [18] 侯云鹏, 李前, 孔丽丽, 等. 不同缓/控释氮肥对春玉米氮素吸收利用、土壤无机氮变化及氮平衡的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(20): 3928–3940.
Hou Y P, Li Q, Kong L L, *et al.* Effects of different slow/controlled release nitrogen fertilizers on spring maize nitrogen uptake and utilization, soil inorganic nitrogen and nitrogen balance[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3928–3940.
- [19] 陆志峰, 鲁剑巍, 潘勇辉, 等. 钾素调控植物光合作用的生理机制[J]. *植物生理学报*, 2016, 52(12): 1773–1784.
Lu Z F, Lu J W, Pan Y H, *et al.* Physiological mechanisms in potassium regulation of plant photosynthesis[J]. *Plant Physiology Journal*, 2016, 52(12): 1773–1784.
- [20] 郭鑫年, 蒙静, 田旭东, 等. 钾肥用量对水稻钾素分配累积、钾肥利用效率及平衡的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2019, (6): 154–160.
Guo X N, Meng J, Tian X D, *et al.* Effects of potassium application on the distribution, utilization efficiency of potassium in rice and soil potassium balance[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019, (6): 154–160.
- [21] Battie-Laclau P, Laclau J P, Beri C, *et al.* Photosynthetic and anatomical responses of *Eucalyptus grandis* leaves to potassium and sodium supply in a field experiment[J]. *Plant Cell and Environment*, 2014, 37: 70–81.
- [22] 彭海欢, 翁晓燕, 徐红霞, 等. 缺钾胁迫对水稻光合特性及光合防御机制的影响[J]. *中国水稻科学*, 2006, 20(6): 621–625.
Peng H H, Weng X Y, Xu H X, *et al.* Effects of potassium deficiency on photosynthesis and photo-protection mechanisms in rice plants[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2006, 20(6): 621–625.
- [23] 韦还和, 孟天瑶, 李超, 等. 钾肥用量对甬优籼梗杂交稻物质积累及其产量的影响[J]. *作物学报*, 2016, 42(8): 1201–1214.
Wei H H, Meng T Y, Li C, *et al.* Effects of potassium fertilizer rate on biomass accumulation and grain yield of Yongyou *Japonica/indica* hybrids series[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(8): 1201–1214.
- [24] 徐新朋, 王秀斌, 李大明, 等. 双季稻最佳磷肥和钾肥用量与密度组合研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(3): 598–608.
Xu X P, Wang X B, Li D M, *et al.* Optimum combination of phosphorus, potassium and density for double-rice systems[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(3): 598–608.
- [25] 王强盛, 甄若宏, 丁艳锋, 等. 钾肥用量对优质梗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 Q S, Zhen R H, Ding Y F, *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.
- [26] Dobermann A, Witt C, Dawe D, *et al.* Site-specific nutrient management for intensive rice cropping systems in Asia[J]. *Field Crops Research*, 2002, 74: 37–66.
- [27] 李珺, 刘双全, 仇少君, 等. 典型黑土不同施氮量对马铃薯产量和氮素利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(5): 850–857.
Li J, Liu S Q, Qiu S J, *et al.* Effects of different nitrogen rates on potato yield and nitrogen use efficiency in a typical black soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(5): 850–857.
- [28] Qiu S J, Xie J G, Zhao S C, *et al.* Long-term effects of potassium fertilization on yield, efficiency, and soil fertility status in a rain-fed maize system in Northeast China[J]. *Field Crops Research*, 2014, 163: 1–9.
- [29] 侯云鹏, 王立春, 李前, 等. 覆膜滴灌条件下基于玉米产量和土壤磷素平衡的磷肥适用量研究[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(20): 3573–3584.
Hou Y P, Wang L C, Li Q, *et al.* Research on optimum phosphorus fertilizer rate based on maize yield and phosphorus balance in soil under film mulched drip irrigation conditions[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(20): 3573–3584.
- [30] 米国华, 伍大利, 陈延玲, 等. 东北玉米化肥减施增效技术途径探讨[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(14): 2758–2770.
Mi G H, Wu D L, Chen Y L, *et al.* The ways to reduce chemical fertilizer input and increase fertilizer use efficiency in maize in Northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(14): 2758–2770.
- [31] 唐旭, 计小江, 李超英, 等. 水稻-大麦长期轮作体系钾肥效率及土壤钾素平衡[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(1): 90–99.
Tang X, Ji X J, Li C Y, *et al.* Study on potassium use efficiency and apparent soil potassium balance under long-term rice-barley rotation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(1): 90–99.
- [32] 冀宏杰, 张怀志, 张维理, 等. 我国农田土壤钾平衡研究进展与展望[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(6): 920–930.
Ji H J, Zhang H Z, Zhang W L, *et al.* Farmland potassium balance in China: A review[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(6): 920–930.
- [33] 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.
Xiao K, Tang J, Li J F, *et al.* Optimum amount of potassium fertilizer applied under continuous rice-rapeseed rotation[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(8): 1226–1233.
- [34] 廖育林, 郑圣先, 鲁艳红, 等. 长期施钾对红壤水稻土水稻产量及土壤钾素状况的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(6): 1372–1379.
Liao Y L, Zheng S X, Lu Y H, *et al.* Effects of long-term K fertilization on rice yield and soil K status in reddish paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2009, 15(6): 1372–1379.
- [35] 柴如山, 安之冬, 马超, 等. 我国主要粮食作物秸秆钾养分资源量及还田替代钾肥潜力[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(2): 201–211.
Chai R S, An Z D, Ma C, *et al.* Potassium resource quantity of main

- grain crop straw and potential for straw incorporation to substitute potassium fertilizer in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(2): 201–211.
- [36] 程文龙, 韩上, 武际, 等. 连续秸秆还田替代钾肥对作物产量及土壤钾素平衡的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2019, (5): 72–78.
Cheng W L, Han S, Wu J, *et al.* Effect of continuous straw incorporation substitute for K-fertilizer on crop yield and soil potassium balance[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019, (5): 72–78.
- [37] 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 Y L, Lu Y H, Xie J, *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.
- [38] 贾良良, 陈新平, 张福锁, 等. 北京市冬小麦氮肥适宜用量评价方法的研究[J]. *中国农业大学学报*, 2001, 6(3): 67–73.
Jia L L, Chen X P, Zhang F S, *et al.* Study of optimum N supplying rate in winter wheat in Beijing area[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2001, 6(3): 67–73.
- [39] 张君, 赵沛义, 潘志华, 等. 基于产量及环境友好的玉米氮肥投入阈值确定[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(12): 136–143.
Zhang J, Zhao P Y, Pan Z H, *et al.* Determination of input threshold of nitrogen fertilizer based on environment-friendly agriculture and maize yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(12): 136–143.