

周伊婷, 吴正, 魏雪娇, 袁玮琪, 魏宗强, 吴建富, 曾研华. 秸秆及其烧灰长期还田对水稻产量及土壤供钾能力的影响[J]. 土壤学报, 2026, ZHOU Yiting, WU Zheng, WEI Xuejia, YUAN Weiqi, WEI Zongqiang, WU Jianfu, ZENG Yanhua. Effects of Long-term Straw and Straw Ash Return on Rice Yield and Soil Potassium Supplying Capacity. [J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

秸秆及其烧灰长期还田对水稻产量及土壤供钾能力的影响*

周伊婷¹, 吴正², 魏雪娇¹, 袁玮琪¹, 魏宗强¹, 吴建富¹⁺, 曾研华³

(1. 江西农业大学国土资源与环境学院, 南昌 330045; 2. 江西传媒职业学院, 南昌 330224; 3. 江西农业大学农学院, 南昌 330045)

摘要: 为评估秸秆及其烧灰长期还田对水稻产量及土壤供钾能力的影响, 依托江西进贤自 2010 年起的长期定位试验, 设置空白对照 (CK)、单施化肥 (NPK)、秸秆全量直接还田配施化肥 (NPK+RS) 和秸秆全量烧灰还田配施化肥 (NPK+RA) 4 个处理。2023 年晚稻收获后采集 0~20 cm 土壤, 测定土壤全钾及各形态钾含量、黏土矿物吸附点位钾含量、钾释放过程和容量/强度 (Q/I) 关系, 并分析水稻产量变化。结果表明, 施肥显著提高水稻产量和土壤钾素含量。等量氮磷钾养分投入条件下, 与 NPK 相比, NPK+RS 和 NPK+RA 早稻年均产量分别提高 5.22% 和 3.53%, 晚稻分别提高 3.68% 和 2.41%。各施肥处理土壤水溶性钾差异较小; 与 NPK 相比, NPK+RS 和 NPK+RA 非交换性钾分别提高 13.16% 和 17.12%; NPK+RA 交换性钾、有效钾和全钾分别提高 5.41%、2.87% 和 3.09%, 且交换性钾和有效钾较 NPK+RS 分别提高 7.88% 和 4.99%。施肥显著提高土壤黏土矿物吸附点位钾含量, 与 NPK 相比, NPK+RS 矿物表面 (p 位点)、边缘 (e 位点) 及层间 (i 位点) 钾含量分别提高 45.07%、10.09% 和 6.27%; NPK+RA 各相应位点钾含量分别提高 49.46%、16.97% 和 11.91%。钾释放过程中, 施肥处理在快速释放阶段差异不显著; 在缓慢释放阶段, NPK+RS 和 NPK+RA 钾累积释放量较 NPK 分别提高 19.69% 和 9.07%, 释放速率分别提高 19.66% 和 9.09%, 且 NPK+RS 显著高于 NPK+RA。容量/强度 (Q/I) 分析表明, NPK+RS 与 NPK+RA 均可优化土壤供钾容量与强度, 且效果优于 NPK。综上, 等量氮磷钾养分投入条件下, 秸秆及其烧灰还田配施化肥在提高水稻产量及强化土壤供钾能力方面优于单施化肥。鉴于秸秆焚烧对环境的负面影响, 建议优先推广秸秆直接还田配施化肥模式。

关键词: 秸秆还田; 水稻产量; 钾形态与含量; 钾吸附位点; 释放动力学; 容量/强度关系

中图分类号: S158 文献标志码: A

Effects of Long-term Straw and Straw Ash Return on Rice Yield and Soil Potassium Supplying Capacity

* 国家自然科学基金项目 (32260808, 32160503) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 32260808 and 32160503)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wjf6711@126.com

作者简介: 周伊婷 (2001—), 女, 江西景德镇人, 硕士研究生, 主要从事土壤养分转化与作物养分管理研究。E-mail: 18979842192@163.com

收稿日期: 2025-08-09; 收到修改稿日期: 2026-02-24; 网络首发日期 (www.cnki.net):

ZHOU Yiting¹, WU Zheng², WEI Xuejiao¹, YUAN Weiqi¹, WEI Zongqiang¹, WU Jianfu^{1†}, ZENG Yanhua³

(1. College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. Jiangxi Vocational College of Media and Communication, Nanchang 330224, China; 3. College of Agronomy, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: 【Objective】 This study aimed to evaluate the effects of long-term straw and straw ash application on rice yield and soil potassium (K) supply capacity. 【Method】 Based on a long-term field experiment initiated in 2010 in Jinxian, Jiangxi Province, four treatments were established: no straw return and no fertilizer (CK), chemical fertilizer alone (NPK), full straw return combined with chemical fertilizer (NPK+RS), and full straw ash return combined with chemical fertilizer (NPK+RA). Soil samples (0-20 cm) were collected after the late rice harvest in 2023 to determine total K and different K fractions, K content at different adsorption sites of clay minerals, K release kinetics, and quantity/intensity (Q/I) relationship, and rice yield was analyzed accordingly. 【Result】 Fertilization significantly increased rice yield and soil K content. Under equal NPK nutrient inputs, NPK+RS and NPK+RA increased average annual yields of early rice by 5.22% and 3.53%, and late rice by 3.68% and 2.41%, respectively, compared with NPK. Water-soluble K showed little variation among fertilization treatments. Compared with NPK, non-exchangeable K in NPK+RS and NPK+RA increased by 13.16% and 17.12%, respectively. NPK+RA significantly enhanced exchangeable K, effective K, and total K by 5.41%, 2.87%, and 3.09%, respectively, and its exchangeable and effective K contents were 7.88% and 4.99% higher than those under NPK+RS. Fertilization significantly increased K contents at clay mineral adsorption sites. Compared with NPK, K contents at the mineral surface (p sites), edge (e sites), and interlayer (i sites) increased by 45.07%, 10.09%, and 6.27%, respectively, under NPK+RS; the corresponding increases under NPK+RA were 49.46%, 16.97%, and 11.91%. During K release, no significant differences were observed among fertilization treatments in the rapid-release stage. In the slow-release stage, compared with NPK, cumulative K release increased by 19.69% and 9.07%, and the release rate increased by 19.66% and 9.09% under NPK+RS and NPK+RA, respectively, with NPK+RS showing significantly higher values than NPK+RA. In addition, Q/I analysis indicated that both NPK+RS and NPK+RA optimized soil K supply capacity and intensity more effectively than NPK. 【Conclusion】 Under equal NPK nutrient inputs, straw and straw ash return combined with chemical fertilizer were superior to chemical fertilizer alone in improving rice yield and enhancing soil K supply capacity. Considering the adverse environmental impacts of straw burning, direct straw return combined with chemical fertilizer is recommended for preferential promotion.

Key words: Straw return; Rice yield; Potassium fractions and contents; Potassium adsorption sites; Release kinetics; Quantity/intensity relationship

土壤钾素是土壤肥力的关键要素和作物钾素营养的主要来源。我国高产作物品种的推广和农业集约化水平的提高,加剧了土壤速效钾耗竭,我国约有三分之一的耕地土壤处于缺钾或严重缺钾状态^[1]。然而,我国钾肥资源缺乏,钾肥进口量依赖度达 50%^[2],寻找经济高效的土壤钾素补充途径对保障农业高产稳产及提高化肥利用效率至关重要。我国秸秆资源丰富,2022 年秸秆资源量约为 8.6 亿 t^[3],且秸秆富含钾素,是潜在的优质钾肥替代资源。研究^[4]表明,单位耕地面积水稻秸秆还田当季可提供钾(K₂O)养分量约 152.6 kg·hm⁻²。此外,秸秆还田还能改善土壤理化性质,提高土壤养分供应能力,促进作物生长发育^[5]。因此,秸秆还田可替代部分化肥,补充土壤钾素,实现减施增效。

土壤供钾能力受多种因素影响,主要与土壤钾素含量及其赋存形态^[6]、分布位置^[7]以及释放过程^[8]等密切相关。按照植物可利用程度,土壤钾通常被归类为速效钾(含水溶性与交换性钾)、缓效钾(非交换性钾)及矿物钾。其中,水溶性钾是作物直接吸收的形态,反映供钾强度;交换性钾是作物吸收的主要来源,反映供钾容量;非交换性钾通过平衡转化与交换性钾相互作用,反映供钾潜力^[9]。在微观结构上,钾素在黏土矿物上的吸附主要分布于矿

物表面(p位点)、晶片边缘(e位点)以及矿物层间(i位点), p位点吸持的为交换性钾, e位点和i位点为非交换性钾^[10]。不同位点钾的含量差异可表征土壤钾的释放速率^[11]。长期种植条件下, 作物持续带走土壤交换性钾, 非交换性钾逐渐释放以维持钾素动态平衡。通过对钾素释放特性的研究, 能够揭示土壤钾的释放机制和动态规律, 评价土壤供钾能力^[12]。自Beckett于1964年首次提出利用容量/强度(Q/I)曲线评价土壤钾素状况以来, 该方法被广泛采用, 通过分析Q/I曲线可获得钾释放速率、潜力等关键参数, 科学评估土壤供钾能力^[13]。

秸秆直接还田是秸秆资源化利用的重要方式之一。谭德水等^[14]通过13年定位试验发现, 在氮磷肥基础上配施秸秆可显著提高作物产量, 且不同程度地提高了土壤水溶性钾、交换性钾与非交换性钾含量, 并使矿物钾比例下降。袁浩亮等^[15]研究证实, 以秸秆还田替代部分化肥, 可提高土壤有机质、全氮及速效钾含量, 同时仍能实现水稻稳产。秸秆不仅能以有机残体的形式直接还田, 还可经燃烧转化为草木灰后施入土壤。易姝等^[16]研究表明, 施加草木灰可提升土壤pH且增加速效钾含量, 改善土壤肥力状况。王爱玲等^[17]通过比较秸秆焚烧与直接还田的生态效应, 发现两种方式均能提高土壤速效钾含量, 且初期焚烧处理对速效钾含量的提升幅度高于直接还田处理。秸秆直接还田和秸秆烧灰还田在提高作物产量、补充土壤钾库以及减少化学钾肥投入方面具有重要意义, 但秸秆田间直接烧灰还田不仅浪费有机资源, 还会造成大气污染, 不利于农业环保化和可持续发展。本研究立足于我国农业土壤钾素持续消耗与钾肥资源高度依赖进口的现实矛盾, 结合秸秆资源化利用的需求, 比较长期秸秆直接还田与烧灰还田两种模式下水稻产量, 土壤不同形态钾及黏土矿物吸附点位钾含量, 土壤钾释放过程及容量/强度关系, 从养分释放与供应的维度, 评估不同秸秆利用方式对土壤供钾效能的影响, 为秸秆资源合理利用提供科学依据和技术指导。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

长期定位试验自2010年起, 在江西省进贤县杨溪村(国家级耕地质量监测点, 28°20′7.14″N, 116°5′29.73″E)开展。试验区属亚热带季风气候, 年平均气温17.5℃, 年均降水量1600~1800mm。试验田土壤为第四纪红黏土发育而成的水稻土, 试前土壤的基础理化性质已在前期研究中报道^[18]: pH 5.48, 有机质 34.16 g·kg⁻¹, 全氮 2.27 g·kg⁻¹, 碱解氮 126.00 mg·kg⁻¹, 有效磷(P) 13.68 mg·kg⁻¹, 速效钾(K) 81.24 mg·kg⁻¹。2010—2016年种植的早、晚稻品种分别为陆两优996和五丰优T025; 2017—2018年早、晚稻品种分别为五丰优286和H优518; 2019—2023年早、晚稻品种分别为五丰优286和泰优871。

1.2 试验设计

试验设置4个处理: (1)空白对照(CK): 秸秆不还田、不施化肥; (2)单施化肥(NPK): 水稻机收后, 将秸秆全部移除, 仅施加氮、磷、钾化肥; (3)秸秆全量直接还田配施化肥(NPK+RS): 水稻机收后, 将秸秆粉碎至约5cm长度并均匀覆盖地表, 经灌水旋耕后作为下季水稻基肥; (4)秸秆全量烧灰还田配施化肥(NPK+RA): 水稻机收后, 将秸秆粉碎至约5cm长度并均匀覆盖地表, 待秸秆晒干后燃烧成灰, 随后灌水旋耕作为下季水稻基肥。

采用田间大区试验设计, 各处理区面积均为326.7m², 不同处理间以水泥埂隔离, 防止水分与养分渗透, 并实行单独排灌。取样时将每个大区进一步划分为3个采样单元, 作为大区内的重复。除空白对照外, 其余施肥处理均遵循等养分投入原则: 早稻季氮、磷、钾(N、P₂O₅、K₂O)养分总投入量分别为165、75、150kg·hm⁻²; 晚稻季氮、磷、钾(N、P₂O₅、K₂O)养分总投入量分别为195、87.75、175.5kg·hm⁻²。每季秸秆还田的N、P₂O₅和K₂O养分输入

平均值分别为 45、10、110 kg·hm⁻²，每季秸秆灰分还田的 N、P₂O₅ 和 K₂O 养分输入平均值分别为 2、6、100 kg·hm⁻²，通过化肥补足养分差额，各处理具体施肥用量见表 1。施肥制度如下：氮肥（尿素，460 g·kg⁻¹，以 N 计）早稻季按基肥 50%（*m/m*，下同）、分蘖肥 20%、穗肥 30% 的比例分次投入，晚稻季按基肥 40%、分蘖肥 20%、穗肥 40% 的比例投入；磷肥（钙镁磷肥，120 g·kg⁻¹，以 P₂O₅ 计）两季均一次性作基肥施入；钾肥（氯化钾，600 g·kg⁻¹，以 K₂O 计）两季均按分蘖肥 70%、穗肥 30% 的比例分次投入。移栽时早稻的株行距设置为 13.3 cm×23.3 cm，晚稻 13.3 cm×26.6 cm，其余田间管理按常规高产栽培要求执行。

表 1 各处理氮、磷、钾养分投入量

Table 1 N, P₂O₅, and K₂O nutrient input rates under different treatments

稻季 Rice season	处理 Treatment	N/(kg·hm ⁻²)			P ₂ O ₅ /(kg·hm ⁻²)			K ₂ O/(kg·hm ⁻²)		
		化肥 Fertilizer	秸秆 Straw	秸秆灰 Straw ash	化肥 Fertilizer	秸秆 Straw	秸秆灰 Straw ash	化肥 Fertilizer	秸秆 Straw	秸秆灰 Straw ash
早稻 Early rice	CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	NPK	165	0	0	75	0	0	150	0	0
	NPK+RS	120	45	0	65	10	0	40	110	0
	NPK+RA	163	0	2	69	0	6	50	0	100
晚稻 Late rice	CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	NPK	195	0	0	87.75	0	0	175.5	0	0
	NPK+RS	150	45	0	77.75	10	0	65.5	110	0
	NPK+RA	193	0	2	81.75	0	6	75.5	0	100

注：CK 表示秸秆不还田、不施肥；NPK 表示单施化肥；NPK+RS 表示秸秆全量直接还田配施化肥；NPK+RA 表示秸秆全量烧灰还田配施化肥。下同。Note: CK represents no straw return and no fertilizer; NPK represents chemical fertilizer alone; NPK+RS represents full straw return combined with chemical fertilizer; NPK+RA represents full straw ash return combined with chemical fertilizer. The same below.

1.3 测定指标与方法

水稻产量在每季成熟期测定，对小区内植株进行全量收割与脱粒，去除杂质，晒干后称重，计算单位面积产量。2023 年晚稻收获后，每处理划分 3 个采样单元，按照“S”形路线随机多点采集 0~20 cm 耕作层土壤样品 3 份，自然风干，研磨过筛供有关指标测定。

1.3.1 土壤钾素形态 土壤全钾通过氢氧化钠熔融；水溶性钾以去离子水浸提；交换性钾用 1 mol·L⁻¹ 中性 NH₄OAc 浸提；非交换性钾用 1 mol·L⁻¹ 热 HNO₃ 浸提；有效钾用 2 mol·L⁻¹ 冷 HNO₃ 浸提，用火焰光度计（FP6410，棱光，上海）测定浸提液中钾浓度^[19]。

1.3.2 土壤黏土矿物吸附点位钾 称取 2.00 g（记录样品质量 *m*）土样于 50 mL 离心管（记录管样总质量 *m*₀），各处理设置 3 次重复。通过连续浸提法依次分离各点位钾，首先加入 20 mL（*V*₁）蒸馏水，经振荡（150 r·min⁻¹，30 min）和离心（4 500 r·min⁻¹，5 min）后，收集滤液，用火焰光度计测定 K 浓度（*c*₁），并记录弃去滤液后的离心管质量（*m*₁）；随后分别向上述沉淀中加入 20 mL（*V*₂）0.5 mol·L⁻¹ 中性 CaCl₂ 溶液和 20 mL（*V*₃）1 mol·L⁻¹ 中性 NH₄OAc 溶液，重复上述振荡、离心、过滤步骤，依次测定其对应 K 浓度（*c*₂，*c*₃），同时记录弃去滤液后的离心管质量（*m*₂，*m*₃）。另取土样采用 1 mol·L⁻¹ 热 HNO₃ 浸提，测定酸性钾（*Q*_酸）^[11]。不同点位钾含量的计算方法如下：

$$Q_{水}=c_1V_1/m \quad (1)$$

$$Q_p=(c_2V_2-c_1\Delta V_1)/m \quad (2)$$

$$Q_e=(c_3V_3-c_2\Delta V_2)/m \quad (3)$$

$$Q_i=Q_{酸}-Q_{水}-Q_p-Q_e \quad (4)$$

式中, $\Delta V_1=(m_1-m_0)/\rho_1$, $\Delta V_2=(m_2-m_0)/\rho_2$, ρ_1 和 ρ_2 分别为蒸馏水和 CaCl_2 溶液密度 ($\rho_1=1.00 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$, $\rho_2=1.02 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$); $Q_{\text{水}}$ 、 Q_{p} 、 Q_{e} 和 Q_{i} 分别表示水溶性钾以及 p、e 和 i 位钾含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.3.3 土壤钾释放动力学 称取 2.00 g 土样于 50 mL 离心管, 各处理设置 3 次重复。加入 $0.005 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 草酸 20 mL, $180 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡 30 min 后于 $25 \text{ }^\circ\text{C}\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下培养 1~1 008 h (共 42 d)。分别在第 1、8、10、32 小时和 2、3、4、5、7、9、11、14、18、22、26、30、34、38、42 天时取样, 于 $6000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 5 min 后过滤, 用火焰光度计测定滤液中 K 浓度^[20]。通过四种典型动力学方程 (一级动力学、Elovich、双常数速率及抛物线扩散方程) 对土壤钾随时间的累积释放量进行拟合。各模型表达式如下:

$$\text{一级动力学方程 (First-order equation): } y=a\times(1-\exp(-bx)) \quad (5)$$

$$\text{Elovich 方程 (Elovich equation): } y=a+b\times\ln(x) \quad (6)$$

$$\text{双常数速率方程 (Two-constant rate equation): } y=ax^{(b)} \quad (7)$$

$$\text{抛物线扩散方程 (Parabolic diffusion equation): } y=a+bx^{(1/2)} \quad (8)$$

式中, x 、 y 分别表示释放时间 (h) 和钾累积释放量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); a 、 b 为各方程的参数。

1.3.4 土壤钾容量/强度关系 称取 4.00 g 土样 (过 1 mm 筛) 7 份于 50 mL 离心管, 各处理设置 3 次重复。分别加入 40 mL 含不同浓度 KCl (0、0.05、0.10、0.50、1.00、1.50、2.00 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) 和相同浓度 CaCl_2 ($0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 的混合溶液。摇匀, $180 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡 4 h 后于 $25 \text{ }^\circ\text{C}\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下平衡 24 h。过滤后, 用原子吸收 (AA7000, 岛津, 日本) 测定钾、钙、镁含量^[21]。土壤活性钾 (K_L) 含量用 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 中性 NH_4OAc 浸提估算而来^[22]。各参数的计算公式如下:

$$\Delta K=C_{K0}-C_K \quad (9)$$

$$\text{AR}=C_K/(C_{\text{Ca}}+C_{\text{Mg}})^{1/2} \quad (10)$$

$$K_X=K_L(-\Delta K_0) \quad (11)$$

$$-\Delta G=RT\ln\text{AR}_0 \quad (12)$$

式中, ΔK 为平衡前后溶液中钾的浓度差, $\text{cmol}\cdot\text{L}^{-1}$; AR 为钾离子活度比, $(\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})^{1/2}$; C_{K0} 代表平衡前溶液中 K^+ 的浓度, $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$; C_K 、 C_{Ca} 、 C_{Mg} 分别为平衡溶液中 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的浓度, $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。以 AR 为横坐标, ΔK 为纵坐标绘制曲线, 根据线性部分在横轴的截距计算得出钾平衡活度比, 即 AR_0 , $(\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})^{1/2}$; 在纵轴的截距计算得出专性吸附态钾, 即 $-\Delta K_0$, $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$; 直线斜率用 PBC^{K} 表示。 K_X 为专性吸附态钾, $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$; K_L 为活性钾, $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$; $-\Delta G$ 为 K^+ 和 $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ 的交换自由能, $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$; R 为气体常数, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; T 为绝对温度, K 。

1.4 数据处理

试验数据通过 Excel 2021 进行整理, SPSS 26.0 进行统计分析, 利用最小显著差异法 (LSD) 检验数据在 $P<0.05$ 水平上的显著性差异。图形绘制及回归拟合分析由 Origin 2024 完成。

2 结果

2.1 秸秆及其烧灰长期还田对水稻产量及土壤钾素含量的影响

由表 2 可知, 长期施肥对水稻产量影响显著。与 CK 相比, NPK、NPK+RS 和 NPK+RA 处理早、晚稻年均产量分别显著增加了 96.08%~106.33% 和 60.37%~66.26% ($P<0.05$)。在等量氮磷钾养分投入条件下, 与 NPK 相比, NPK+RS 和 NPK+RA 处理早、晚稻年均产量显著提高, 早稻增幅分别为 5.22% 和 3.53% ($P<0.05$), 晚稻增幅分别为 3.68% 和 2.41% ($P<0.05$)。

就 13 年总产量而言, 早稻呈现 NPK+RS>NPK+RA>NPK>CK 的趋势, 处理间差异显著 ($P<0.05$); 晚稻表现为: NPK+RS≈NPK+RA>NPK>CK。综上, 秸秆及其烧灰长期还田对双季稻有显著增产效应, 且早稻季增幅更大。

表 2 不同施肥处理双季稻产量

Table 2 Yield of double-cropping rice under different fertilization treatments

稻季	处理	总产量	年均产量
Rice season	Treatment	Total yield/(t·hm ⁻²)	Annual average yield/(t·hm ⁻²)
早稻	CK	43.14±3.84d	3.32±0.68c
	NPK	84.67±2.68c	6.51±0.75b
	NPK+RS	89.04±2.46a	6.85±0.78a
晚稻	NPK+RA	87.66±2.96b	6.74±0.83a
	CK	63.92±3.68c	4.92±0.53c
	NPK	102.60±2.18b	7.89±0.71b
晚稻	NPK+RS	106.35±3.28a	8.18±0.61a
	NPK+RA	105.08±2.70a	8.08±0.73a

注: 同列数值后标注的不同小写字母表示相同稻季不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。Note: Different lowercase letters following values within the same column indicate significant differences among treatments within the same rice season ($P<0.05$). The same below.

由表 3 可知, 施肥显著提高土壤全钾含量, NPK、NPK+RS 和 NPK+RA 处理土壤全钾含量较 CK 分别显著增加 13.25%、14.83%和 16.75% ($P<0.05$)。等量氮磷钾养分投入条件下, NPK+RA 处理全钾含量较 NPK 显著提高 3.09%, 而与 NPK+RS 处理差异不显著。各施肥处理较 CK 均显著提高了土壤水溶性钾、交换性钾、有效钾和非交换性钾含量。等量氮磷钾养分投入条件下, 各处理水溶性钾含量无显著差异; NPK+RA 处理交换性钾含量较 NPK 和 NPK+RS 处理分别提高 5.41%和 7.88% ($P<0.05$), 有效钾含量分别提高 2.87%和 4.99% ($P<0.05$)。说明秸秆烧灰长期还田配施化肥有利于提升土壤供钾容量。NPK+RA 与 NPK+RS 处理非交换性钾含量无显著差异, 但均显著高于 NPK, 增幅分别为 17.12%和 13.16% ($P<0.05$), 说明秸秆及其烧灰长期还田配施化肥可有效提升土壤供钾潜力。

表 3 不同施肥处理土壤各形态钾含量

Table 3 Potassium fractions in soil under different fertilization treatments

处理	水溶性钾	交换性钾	有效钾	非交换性钾	全钾
Treatment	Water-soluble K/(mg·kg ⁻¹)	Exchangeable K/(mg·kg ⁻¹)	Effective K/(mg·kg ⁻¹)	Non-exchangeable K/(mg·kg ⁻¹)	Total K/(g·kg ⁻¹)
CK	8.33±1.53b	31.67±0.58c	69.33±3.06c	375.84±18.03c	17.13±0.12c
NPK	23.33±0.58a	123.33±0.58b	232.00±3.46b	479.40±23.14b	19.40±0.20b
NPK+RS	25.00±2.00a	120.50±0.50b	227.33±3.06b	542.49±12.68a	19.67±0.31ab
NPK+RA	24.33±1.53a	130.00±3.46a	238.67±2.31a	561.46±7.06a	20.00±0.20a

相关性分析(表 4)表明, 水稻产量与土壤各形态钾含量间存在显著或极显著的正相关性。早、晚稻产量与水溶性钾、交换性钾、有效钾及非交换性钾之间均达到了极显著正相关水平 ($P<0.01$), 其中有效钾与水稻产量的相关性最强。不同钾形态之间, 全钾与水溶性钾、交换性钾和有效钾均呈显著正相关 ($P<0.05$); 与非交换性钾呈极显著正相关 ($P<0.01$); 水溶性钾、交换性钾、有效钾和非交换性钾两两之间均呈极显著正相关 ($P<0.01$)。

表 4 双季稻产量及土壤各形态钾素间的相关性

Table 4 Correlation analysis between double-cropping rice yield and different soil K fractions

指标 Index	早稻产量 ^①	晚稻产量 ^②	水溶性钾 ^③	交换性钾 ^④	有效钾 ^⑤	非交换性钾 ^⑥	全钾 ^⑦
早稻产量 ^①	1						
晚稻产量 ^②	—	1					
水溶性钾 ^③	0.987**	0.991**	1				
交换性钾 ^④	0.985**	0.985**	0.961**	1			
有效钾 ^⑤	0.994**	0.995**	0.976**	0.994**	1		
非交换性钾 ^⑥	0.919**	0.919**	0.902**	0.883**	0.904**	1	
全钾 ^⑦	0.702*	0.688*	0.647*	0.689*	0.681*	0.835**	1

注: *和**分别代表在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 概率水平下, 相关性达到显著与极显著程度。Note: * and ** represent statistical significance at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively. ①Early rice yield, ②Late rice yield, ③Water-soluble K, ④Exchangeable K, ⑤Effective K, ⑥Non-exchangeable K, ⑦Total K.

2.2 秸秆及其烧灰长期还田对土壤黏土矿物吸附点位钾的影响

由表 5 可知, 各位点钾的含量由高到低依次为 i 位钾、e 位钾、p 位钾, 长期施肥显著改变了各位点钾含量。与 CK 相比, 各施肥处理的 p、e 和 i 位钾含量增幅分别为 37.86%~106.05%、46.31%~71.13%和 49.30%~67.08%, 差异均达显著水平 ($P<0.05$)。等量氮磷钾养分投入条件下, 与 NPK 相比, NPK+RS 和 NPK+RA 处理的 p 位钾含量增幅分别为 45.07%和 49.46%; e 位钾含量增幅分别为 10.09%和 16.97%; i 位钾含量增幅分别为 6.27%和 11.91%, 差异显著 ($P<0.05$)。表明长期施肥能够显著提高土壤黏土矿物吸附的钾含量, 促进钾的积累, 增强土壤供钾潜力, 且秸秆及其烧灰还田配施化肥的效果优于单施化肥。

表 5 不同施肥处理土壤黏土矿物吸附点位钾含量

Table 5 Potassium contents at different adsorption sites of soil clay minerals under different fertilization treatments

处理 Treatment	K_p /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	K_e /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	K_i /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
CK	22.00±1.00c	49.67±1.15d	335.84±16.09c
NPK	30.33±0.58b	72.67±3.06c	501.40±21.60b
NPK+RS	44.00±2.65a	80.00±1.73b	532.82±12.56a
NPK+RA	45.33±1.53a	85.00±1.00a	561.12±8.11a

注: K_p 、 K_e 和 K_i 分别代表 p 位钾、e 位钾和 i 位钾。Note: K_p , K_e , and K_i represent K adsorbed at p, e, and i sites, respectively.

2.3 秸秆及其烧灰长期还田对土壤钾素释放的影响

为评价不同处理下土壤钾的释放规律, 本研究利用四种典型的动力学模型对土壤钾随时间的释放过程进行拟合分析。各处理对应模型的决定系数 (R^2) 与回归标准误 (SE) 见表 6。所选模型中, 双常数速率方程的 R^2 平均值最高, SE 平均值最低, 说明在本试验条件下其对土壤钾释放过程的拟合效果最佳。

表 6 不同施肥处理土壤钾释放动力学方程参数

Table 6 Kinetic parameters of soil potassium release equations under different fertilization treatments

处理 Treatment	一级动力学方程 First-order equation		Elovich 方程 Elovich equation		双常数速率方程 Two-constant rate equation		抛物线扩散方程 Parabolic diffusion equation	
	R^2	SE	R^2	SE	R^2	SE	R^2	SE
	CK	0.666	10.20	0.827	7.35	0.978	2.64	0.994
NPK	0.831	6.63	0.976	2.48	0.996	1.02	0.974	2.58
NPK+RS	0.666	19.48	0.922	9.40	0.986	3.97	0.977	5.11
NPK+RA	0.541	17.58	0.900	8.20	0.974	4.19	0.980	3.68

注: R^2 为决定系数, SE 为回归标准误。Note: R^2 is the coefficient of determination; SE is the standard error of estimate.

图 1 为双常数速率方程拟合的草酸浸提条件下土壤钾素累积释放曲线。可以看出, 钾的释放表现出阶段性特征, 其中 0~120 h 是快速释放阶段, 120~1 008 h 是缓慢释放阶段。表 7 为各释放阶段钾累积释放量和释放速率, 与 CK 相比, 施肥显著提高两个阶段钾累积释放量和释放速率。等量氮磷钾养分投入条件下, 在快速释放阶段, 施肥处理间钾累积释放量和释放速率无显著差异; 而在缓慢释放阶段, NPK+RS 和 NPK+RA 处理钾累积释放量较 NPK 分别增加 19.69%和 9.07%, 钾释放速率分别提高 19.66%和 9.09%, 差异显著 ($P<0.05$)。综上, 长期施肥有助于促进土壤钾素的释放, 且秸秆及其烧灰还田配施化肥效果优于单施化肥, 体现在显著提高缓慢释放阶段的钾释放量和释放速率。

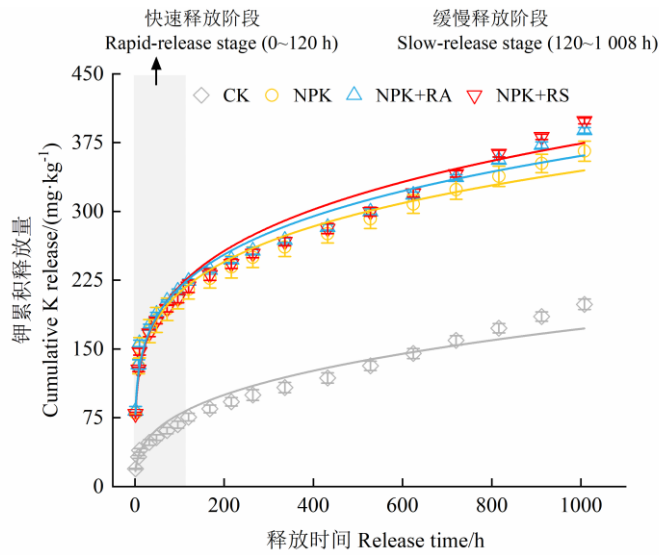


图 1 不同施肥处理土壤钾素释放动力学曲线

Fig. 1 Kinetic curves of soil potassium release under different fertilization treatments

表 7 不同施肥处理土壤钾素各释放阶段的累积释放量与释放速率

Table 7 Cumulative amount and rate of soil potassium release during different stages under different fertilization treatments

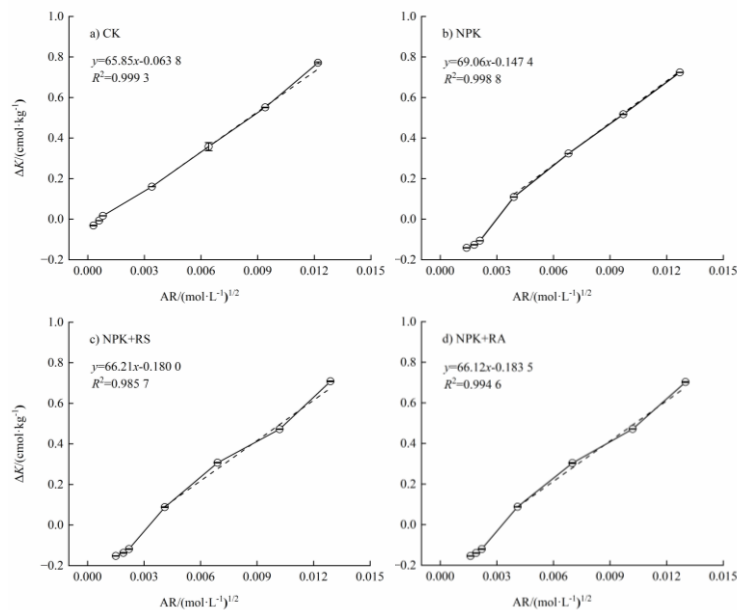
处理 Treatment	钾累积释放量 Cumulative K release/(mg·kg ⁻¹)			钾释放速率 K release rate/(mg·d ⁻¹)		
	S ₁	S ₂	S	S ₁	S ₂	S
CK	75.67±4.16b	123.00±5.00d	198.67±5.69c	15.13±0.83b	3.32±0.14d	4.73±0.14c
NPK	215.00±10.54a	150.67±1.53c	365.67±11.02b	43.00±2.11a	4.07±0.04c	8.71±0.26b
NPK+RS	218.33±6.66a	180.33±3.51a	398.67±3.21a	43.67±1.33a	4.87±0.09a	9.49±0.08a
NPK+RA	224.00±2.00a	164.33±4.16b	388.33±3.06a	44.80±0.40a	4.44±0.11b	9.25±0.07a

注: S₁、S₂、S 分别表示快速释放阶段、缓慢释放阶段和整个释放阶段。Note: S₁, S₂, and S represent the rapid-release stage, the slow-release stage, and the entire release stage, respectively.

2.4 秸秆及其烧灰长期还田对土壤钾 Q/I 关系的影响

各处理的土壤钾 Q/I 关系曲线如图 2 所示, 均包含低 AR 的非线性部分及高 AR 的线性部分。表 8 为各处理 Q/I 曲线参数, 这些参数的变化反映了不同处理土壤供钾能力的差异。

AR_0 是土壤钾平衡活度比, 可衡量土壤钾素有效性或强度。由表 8 可知, 施肥提高了 AR_0 , 其中 NPK+RS 和 NPK+RA 处理效果更显著, 较 CK 分别提高 180.41% 和 186.60%; 较 NPK 分别提高 27.70% 和 30.52%, 说明秸秆及其烧灰长期还田能有效增强土壤钾的有效性。土壤活性钾 (K_L) 反映平衡状态下土壤固相与液相之间 K^+ 的交换量, 由非专性吸附态钾 ($-\Delta K_0$) 和专性吸附态钾 (K_X) 共同组成, 可衡量土壤供钾容量。与 CK 相比, 各施肥处理大幅提高了 $-\Delta K_0$ 和 K_X 值; 等量氮磷钾养分投入条件下, NPK+RS 处理 $-\Delta K_0$ 值略高于 NPK, K_X 值略低于 NPK, NPK+RA 处理 $-\Delta K_0$ 和 K_X 较 NPK 分别提高 20.00% 和 4.55%。说明长期施肥有助于促进土壤钾素活化, 并增加专性吸附 K^+ 的数量, 其中, 秸秆烧灰还田的作用更为突出。PBC^K 是土壤溶液中钾活度比每变化一个单位时, 钾容量随之产生的变化, 各处理 PBC^K 值表现为: NPK > NPK+RS ≈ NPK+RA ≈ CK, 说明长期施加化肥可在一定程度上提升土壤的钾缓冲能力。钾交换自由能 ($-\Delta G$) 是标准条件下土壤溶液中钾离子与钙、镁离子发生等当量交换时的自由能变, 表征土壤对钾的选择性吸附强度, 其值越大表示土壤对钾的吸附越强, 作物吸钾阻力越大。NPK+RS 和 NPK+RA 处理 $-\Delta G$ 较 CK 分别降低 14.83% 和 15.13%, 较 NPK 分别降低 3.94% 和 4.27%, 说明秸秆及其烧灰长期还田能降低土壤对钾的选择性吸附, 促进作物对钾的吸收利用。综上, 长期施肥通过优化 Q/I 曲线参数, 提高了土壤钾的容量和强度, 实现更稳定的钾素供应, 并且秸秆及其烧灰还田配施化肥的效果优于单施化肥。



注: ΔK 表示平衡前后溶液中钾离子的浓度差, AR 表示钾离子活度比。Note: ΔK represents the difference in potassium concentration in the solution before and after equilibrium, and AR represents the potassium activity ratio.

图 2 不同施肥处理土壤钾素容量/强度 (Q/I) 关系曲线

Fig. 2 Soil potassium quantity/intensity (Q/I) relationship curves under different fertilization treatments

表 8 不同施肥处理土壤钾素 Q/I 曲线特征参数

Table 8 Soil potassium Q/I relationship parameters under different fertilization treatments

处理 Treatment	$AR_0 \times 10^{-3}$ /(mol·L ⁻¹) ^{1/2}	K_L /(cmol·kg ⁻¹)	$-\Delta K_0$ /(cmol·kg ⁻¹)	K_s /(cmol·kg ⁻¹)	PBC ^K /[cmol·kg ⁻¹ /(mol·L ⁻¹) ^{1/2}]	$-\Delta G$ /(kJ·mol ⁻¹)
CK	0.97	0.12	0.06	0.06	65.85	17.19
NPK	2.13	0.37	0.15	0.22	69.06	15.24
NPK+RS	2.72	0.38	0.18	0.20	66.21	14.64
NPK+RA	2.78	0.41	0.18	0.23	66.12	14.59

注: AR_0 , 钾平衡活度比; K_L , 活性钾; $-\Delta K_0$, 非专性吸附态钾; K_s , 专性吸附态钾; PBC^K, 钾潜在缓冲容量; $-\Delta G$, K⁺ 和 Ca²⁺+Mg²⁺交换自由能。Note: AR_0 , Equilibrium activity ratio of K; K_L , Labile K; $-\Delta K_0$, Non-specifically adsorbed K; K_s , Specifically adsorbed K; PBC^K, Potential buffering capacity of K; $-\Delta G$, Exchange free energy between K⁺ and (Ca²⁺+Mg²⁺).

3 讨论

3.1 秸秆及其烧灰长期还田对水稻产量与土壤钾素状况的影响

研究表明, 秸秆还田能提高水稻产量^[23]。本研究结果显示, 秸秆及其烧灰还田处理的早、晚稻产量均显著高于 CK 和 NPK 处理(表 2), 与已有研究结论一致。这说明秸秆及其烧灰还田在保障水稻产量稳定的同时, 有助于降低化肥投入。因此, 在农业生产中应注重秸秆还田与化肥减量的配合施用。

土壤全钾及不同形态钾含量是评估土壤供钾能力的基础指标。本研究中, 秸秆及其烧灰还田处理较 CK 显著提高了土壤全钾及各形态钾素含量(表 3), 证实秸秆还田可补充钾素, 缓解土壤钾素亏缺, 提高土壤供钾能力^[24]。进一步比较发现, 两种秸秆还田方式在提升土壤钾素水平方面总体优于单施化肥, 具体表现为: 相较于单施化肥, 秸秆直接还田处理显著提高土壤非交换性钾含量; 烧灰还田处理显著提高交换性钾、非交换性钾、有效钾和全钾含量(表 3)。究其机理, 秸秆直接还田通过改善土壤团聚体结构强化了土壤对钾的固持能力^[25], 同时, 其腐解过程中产生的有机酸可促进土壤矿物钾释放^[26], 并为微生物代谢提供碳源, 在生物化学层面加速了钾的活化释放^[27]。秸秆烧灰还田可提高土壤 pH, 改善土壤孔隙度及团聚体稳定性^[28], 并增强土壤胶体对钾离子的吸附^[16]。此外, 本研究中秸秆烧灰还田处理的交换性钾和有效钾含量高于直接还田处理(表 3), 可能与秸秆灰分中的钾以无机态一次性补充至土壤中, 肥效释放更为迅速有关^[23]。然而, 秸秆焚烧会导致大量养分损失, 不利于养分循环, 还会加剧空气污染; 相比之下, 秸秆直接还田通过微生物分解逐渐释放养分, 有助于维持土壤养分平衡, 更能兼顾生态效益与农业可持续发展。

相关性分析显示, 土壤全钾及各形态钾含量均与水稻产量呈显著正相关(表 4), 说明提升土壤钾素水平是保障水稻增产的关键因素。此外, 各形态钾素之间表现出极显著的相关性(表 4), 反映了其在土壤中活跃的相互转化机制, 共同调控钾的有效性与供应能力, 与前人^[29]研究结果基本一致。本研究中, 水溶性钾、交换性钾和有效钾之间相关系数极高(表 4), 说明交换性钾和有效钾易转化为水溶性钾, 快速供作物吸收; 而非交换性钾与全钾的相关性最高(表 4), 说明非交换性钾是土壤钾素的重要储备形态, 其含量对土壤供钾能力具有关键影响。

3.2 秸秆及其烧灰长期还田对黏土矿物吸附点位钾含量及钾释放特征的影响

黏土矿物吸附的钾处于动态平衡中, 当土壤钾素亏缺时, 黏土矿物固定的钾会释放, 钾素盈余时则会增强固定^[30]。本研究中, 各施肥处理较 CK 均显著提升了 p、e 和 i 位钾的含量(表 5), 说明外源钾输入是补充土壤黏土矿物固定钾的重要途径。与单施化肥相比, 秸

秆及其烧灰还田处理对各吸附位点钾含量提升更显著(表5),说明秸秆还田在增加黏土矿物钾素累积方面具有更优的效果,与前人^[11]研究结果基本一致。其可能原因在于,秸秆还田能够增加土壤有机质并改善土壤结构,从而增强黏土矿物对钾离子的吸附与固持能力^[16,25]。

土壤中各形态钾素之间存在动态平衡,当外源钾不足时,作物根系会增强有机酸的分泌以活化矿物钾,从而提升钾的有效性以满足生长需求^[31]。基于此,本研究采用草酸提取法模拟缺钾条件下作物根系对非交换性钾的活化与释放过程,评估不同还田方式对土壤钾释放的影响。与CK相比,各施肥处理在两个阶段的钾累积释放量和释放速率均显著提高(表7),说明长期施肥可缓解作物携出导致的钾库耗竭,补充土壤钾库,这与前述各形态钾含量变化相符。在快速释放阶段,秸秆及其烧灰还田处理与单施化肥处理间差异不显著(表7),这与杨雅等^[20]研究结果有所不同,可能是因为该阶段主要释放的是以离子态存在于土壤溶液及胶体表面的钾^[32],而本研究中各施肥处理的水溶性钾和交换性钾含量接近(表3)。随着浸提时间延长,黏土矿物表面易释放钾逐渐耗竭后,e位和i位钾开始释放,进入缓慢释放阶段,释放速率降低,并逐渐趋于稳定^[11]。在该阶段,秸秆及其烧灰还田处理较单施化肥显著提升了钾的释放量与速率(表7),即两种处理e位和i位钾的含量均显著高于单施化肥处理(表5)。综合而言,两种秸秆还田方式均能有效补充土壤钾库,增强土壤钾的缓慢释放能力,为长期稳定供钾提供支撑。值得注意的是,秸秆直接还田处理在缓慢释放阶段的释放量与速率均优于烧灰还田(表7),这证明了秸秆直接还田具有更持久的释钾效应,更有利于实现钾素的长期稳定供应。

3.3 秸秆及其烧灰长期还田对土壤钾容量/强度关系的影响及其机理

本研究中,各处理的Q/I曲线形状相似(图2)但参数存在差异(表8),表明不同施肥处理对土壤供钾能力的影响不同,与已有研究^[13,33]结果基本一致。本研究中,各施肥处理表现出较高的 AR_0 、 $-\Delta K_0$ 和 K_x 以及较低的 $-\Delta G$,且秸秆及其烧灰还田处理效果更显著(表8)。张会民等^[34]也报道了类似规律, $-\Delta K_0$ 、 K_x 和 AR_0 值均表现由高到低依次为化肥与有机肥配施、单施化肥、不施肥。已有研究^[35]指出,交换性钾和非交换性钾含量较高的土壤通常具有更高的 AR_0 ,本研究中秸秆及其烧灰还田处理通过提高土壤交换性钾和非交换性钾含量(表3),进而增强了钾素有效性。秸秆及其烧灰还田处理 $-\Delta K_0$ 较高,说明秸秆还田促进了钾素活化,提升钾供应容量。一方面,秸秆中的钾离子直接增加了土壤活性 K^+ 的浓度;另一方面,秸秆还田可提高土壤CEC,从而增强土壤胶体对 K^+ 的吸附^[36]。此外,本研究中各施肥处理的 K_x 差异不显著(表8),说明秸秆及其烧灰还田对土壤供钾能力的提升主要源自非专性吸附态钾的释放。关于 PBC^K ,有研究^[37]认为,长期不施钾肥会提高土壤对钾的缓冲能力,导致 PBC^K 增大,但也有研究^[38]指出施钾后土壤 PBC^K 无明显变化。本研究结果显示,长期秸秆及其烧灰还田对土壤 PBC^K 值影响不显著(表8)。Woodruff^[39]提出的土壤缺钾阈值为 $14.64\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$,当土壤 $-\Delta G$ 大于 $14.64\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 时,土壤容易缺钾。本研究中,CK和NPK处理 $-\Delta G$ 均高于该阈值(表8),而秸秆及其烧灰还田处理降低了 $-\Delta G$,说明两种还田方式均有助于降低土壤缺钾风险。综上,秸秆及其烧灰长期还田配施化肥能够同时提升土壤供钾的容量与强度,从而实现更高效、稳定的钾素供应,且综合效果优于单施化肥。

4 结论

长期施肥和秸秆还田能够提高水稻产量并改善土壤供钾能力。等量氮磷钾养分投入条件下,秸秆及其烧灰还田配施化肥处理的效果优于单施化肥,主要体现在:(1)显著提高双季稻产量;(2)显著提升土壤非交换性钾以及黏土矿物吸附点位钾含量,增强土壤供钾潜力;(3)优化土壤钾素的释放过程,促进钾的稳定持续供应;(4)提高土壤钾素供应容量

与强度。鉴于秸秆焚烧对大气环境及生态安全的负面影响,建议在生产中优先推广秸秆直接还田配施化肥的模式。该模式在减少化学钾肥投入、降低生产成本的同时,有助于实现土壤钾素的持续供给,满足水稻生长需求。

参考文献 (References)

- [1] Liu K L, Du J X, Ma C B, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of soil potassium in main dry-farming grain arable land of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(3): 673-684. [柳开楼, 都江雪, 马常宝, 等. 中国主要旱作粮食耕地土壤钾素的时空演变特征[J]. *土壤学报*, 2023, 60(3): 673-684.]
- [2] Wang S J. Current situation and future development trends of potassium resource development and utilization at home and abroad[J]. *Fertilizer & Health*, 2024, 51(6): 35-43. [王石军. 国内外钾资源开发利用现状及未来发展趋势[J]. *肥料与健康*, 2024, 51(6): 35-43.]
- [3] Liu J J, Yan X B, Zhang M Y, et al. Analysis of yield distribution and utilization of crop straw resources in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2025, 42(3): 751-760. [刘俊杰, 严晓斌, 张美怡, 等. 中国农作物秸秆资源产量分布及利用分析[J]. *农业资源与环境学报*, 2025, 42(3): 751-760.]
- [4] 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. [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.]
- [5] Chen H R, Wang X Y, Xiang Y L, et al. Effects of different straw incorporation methods on soil quality and its effect evaluation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(6): 1651-1664. [陈绘融, 王小燕, 向依玲, 等. 不同秸秆还田方式对土壤质量的影响及其效应评价[J]. *土壤学报*, 2025, 62(6): 1651-1664.]
- [6] Xie J C, Zhou J M. Research progress of soil potassium and application of potassium fertilizer in China[J]. *Soils*, 1999, 31(5): 244-254. [谢建昌, 周健民. 我国土壤钾素研究和钾肥使用的进展[J]. *土壤*, 1999, 31(5): 244-254.]
- [7] Das D, Dwivedi B S, Datta S P, et al. Potassium supplying capacity of a red soil from eastern India after forty-two years of continuous cropping and fertilization[J]. *Geoderma*, 2019, 341: 76-92.
- [8] Li T, Wang H Y, Chen X Q, et al. Release kinetics and bioavailability of nonexchangeable potassium in soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(5): 1078-1087. [李婷, 王火焰, 陈小琴, 等. 土壤非交换性钾释放动力学特征及其生物有效性[J]. *土壤学报*, 2015, 52(5): 1078-1087.]
- [9] Ye T H, Xue X X, Lu J W, et al. Effects of potassium fertilization on crops yield, potassium uptake, and soil potassium fertility in rice-oilseed rape cropping systems[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2022, 68(7): 873-885.
- [10] Murrell T S, Mikkelsen R L, Sulewski G, et al. *Improving Potassium Recommendations for Agricultural Crops*[M]. Cham: Springer International Publishing, 2021.
- [11] Yuan J, Ye J M, Wang J D, et al. Mechanism of improving soil potassium balance and supply capacity in peanut-sweet potato rotation system by organic and chemical fertilizer combined application[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(11): 2071-2082. [袁洁, 叶佳敏, 汪吉东, 等. 化肥有机肥配施改善花生-甘薯轮作土壤钾平衡和供钾能力的机理[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(11): 2071-2082.]
- [12] Sparks D L, Huang P M. *Physical chemistry of soil potassium*[M]//Munson R D. *Potassium in agriculture*. Madison: American Society of Agronomy, 1985: 201-276.
- [13] Zhu D D, Lu J W, Cong R H, et al. Potassium management effects on quantity/intensity relationship of soil potassium under rice-oilseed rape rotation system[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2020, 66(9): 1274-1287.
- [14] Tan D S, Jin J Y, Huang S W, et al. Effect of long-term application of potassium fertilizer and wheat straw to soil on yield of crops and soil potassium in fluvo-aquic soil and brown soil of northcentral China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(1): 106-112. [谭德水, 金继运, 黄绍文, 等. 长期施钾与秸秆还田对华北潮土和褐土区作物产量及土壤钾素的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(1): 106-112.]
- [15] Yuan H L, Zhang J L, Lu Y H, et al. Effects of Chinese milk vetch and straw substituting fertilizers on double rice yields,

- nutrients and soil integrated fertilities[J]. *Soils*, 2023, 55(6): 1216-1222. [袁浩亮, 张江林, 鲁艳红, 等. 紫云英和秸秆替代部分化肥对双季稻产量、养分含量及土壤综合肥力的影响[J]. *土壤*, 2023, 55(6): 1216-1222.]
- [16] Yi S, Zhao Z H, Liang Y X. Effect of returning straw ash as fertilizer to field on soil[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29(4): 891-895. [易姝, 赵展恒, 梁玉祥. 秸秆灰直接还田对土壤的影响[J]. *西南农业学报*, 2016, 29(4): 891-895.]
- [17] Wang A L, Gao W S, Hong C M. Study on the ecological effect of crop residues burned or incorporated in field in North Central Irrigated Area of China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(1): 142-144. [王爱玲, 高旺盛, 洪春梅. 华北灌溉区秸秆焚烧与直接还田生态效应研究[J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(1): 142-144.]
- [18] Zeng Y H, Wu J F, Zeng Y J, et al. Effects of straw incorporation with reducing chemical fertilizers on nutrient absorption and utilization and grain yield of double-cropping late rice under mechanical harvest[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(3): 454-462. [曾研华, 吴建富, 曾勇军, 等. 机收稻草全量还田减施化肥对双季晚稻养分吸收利用及产量的影响[J]. *作物学报*, 2018, 44(3): 454-462.]
- [19] Bao S D. *Soil and agricultural chemistry analysis*[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. *土壤农化分析*[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [20] Yang Y, Xia X G, Fan X P, et al. Long-term straw returning increase the capacity and intensity of soil potassium supply in a rice and wheat rotation system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(4): 589-597. [杨雅, 夏贤格, 范先鹏, 等. 长期秸秆还田提升稻麦轮作系统土壤供钾容量和强度[J]. *植物营养与肥科学报*, 2022, 28(4): 589-597.]
- [21] Han Y L, Ma W, Zhou B Y, et al. Straw return increases crop grain yields and K-use efficiency under a maize-rice cropping system[J]. *The Crop Journal*, 2021, 9(1): 168-180.
- [22] Evangelou V P, Blevins R L. Effect of long-term tillage systems and nitrogen addition on potassium quantity-intensity relationships[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52(4): 1047-1054.
- [23] Xiong Z H, Liu J Q, Ye L, et al. Characterization of crop yield and nutrient apparent balance between direct and burning straw return in rice-rapeseed rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2025, 58(16): 3293-3303. [熊志豪, 刘君权, 叶琳, 等. 稻油轮作系统秸秆直接还田与焚烧还田的作物产量和养分表现平衡特征[J]. *中国农业科学*, 2025, 58(16): 3293-3303.]
- [24] Vijayakumar S, Gobinath R, Kannan P, et al. Optimizing potassium mining in rice-wheat system: Strategies for promoting sustainable soil health - A review[J]. *Farming System*, 2024, 2(3): 100099.
- [25] Song Y Y, Cao Y, Duan X Y, et al. Effects of different straw-returning depths on soil aggregate composition and organic carbon distribution[J]. *Soils*, 2022, 54(2): 344-350. [宋依依, 曹阳, 段鑫盈, 等. 秸秆还田深度对土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. *土壤*, 2022, 54(2): 344-350.]
- [26] Xie W Y, Zhou H P, Yang Z X, 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. [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]. *植物营养与肥科学报*, 2015, 21(4): 936-942.]
- [27] Duan Y, Chen L, Li Y M, et al. N, P and straw return influence the accrual of organic carbon fractions and microbial traits in a Mollisol[J]. *Geoderma*, 2021, 403: 115373.
- [28] Wang Y, Kuang F H, Ma S L, et al. Effects of shredded straw and burned straw returning to the field on soil porosity and organic carbon in cultivated layer of calcareous purple soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(3): 526-536, 693. [王越, 况福虹, 马胜兰, 等. 秸秆粉碎和焚烧还田对石灰性紫色土耕层土壤孔隙和有机碳的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(3): 526-536, 693.]
- [29] Cai Z H. Effects of different long-term cropping systems on potassium forms, supply characteristics and availability of red soil in Panxi area[D]. Yaan, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2021. [蔡泽慧. 种植制度对攀西地区红壤钾素形态、有效性及供应特征的影响[D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2021.]
- [30] Li N, Han X R, Yang J F, et al. Effects of long-term fertilization on the availability of K adsorbed by clay minerals and profile distribution in brown soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(6): 1412-1417. [李娜, 韩晓日, 杨劲峰, 等.]

- 长期施肥对棕壤矿物吸附点位钾有效性及其剖面分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1412-1417.]
- [31] Du S Y, Fang Y T, Lu J W. Progress on effects of root exudates on nutrient uptake and utilization of crops[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(2): 147-157. [杜思垚, 方娅婷, 鲁剑巍. 根系分泌物对作物养分吸收利用的影响研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(2): 147-157.]
- [32] Guo H M. Effects of continuous application of biochar on the transformation and availability of potassium forms in soil[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2024. [郭航明. 连续施用生物炭对土壤钾形态转化及其有效性影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2024.]
- [33] Dai K, Li J Z, Zhang L M, et al. Effects of 20 consecutive years of potassium application on soil potassium quantity-intensity (Q/I) relationship in flue-cured tobacco-rape rotation system[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(6): 1401-1413. [代快, 李江舟, 张立猛, 等. 20年持续施钾对烤烟/油菜轮作土壤钾素 Q/I 关系的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(6): 1401-1413.]
- [34] Zhang H M, Xu M G, Lü J L, et al. Effect of long-term fertilization on potassium quantity-intensity relationship in paddy and purple soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(4): 640-645. [张会民, 徐明岗, 吕家珑, 等. 长期施肥对水稻土和紫色土钾素容量和强度关系的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(4): 640-645.]
- [35] Shivanna M, Chidanandappa H M, Ramachandra C, et al. Quantity-intensity parameters of potassium in some selected hilly zone soils of Karnataka under paddy land use cover[J]. Mysore Journal of Agricultural Sciences, 2010, 11(2): 330-338.
- [36] Liu D H, Du L Y, Liang C H, et al. Effect of long-term located fertilization on the quantity-intensity characteristics of potassium in sheltered vegetable field soil[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2009, 35(1): 43-47. [刘代欢, 杜立宇, 梁成华, 等. 长期定位施肥对蔬菜保护地土壤钾素 Q/I 特性的影响[J]. 湖南农业大学学报 (自然科学版), 2009, 35(1): 43-47.]
- [37] Li N. Effect of long-term fertilization on supply of soil potassium and availability[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2012. [李娜. 长期定位施肥对棕壤钾素供应特征及有效性影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012.]
- [38] Assimakopoulos J H, Yassoglou N J, Bovis C P. Effects of incubation at different water contents, air-drying and K-additions on potassium availability of a Vertisol sample[J]. Geoderma, 1994, 61(3/4): 223-236.
- [39] Woodruff C M. Cation activities in the soil solution and energies of cationic exchange[J]. Soil Science Society of America Journal, 1955, 19(1): 98-99.

(责任编辑: 陈荣府)