

杨丽雯,陈剑珠,宁川川,等. 秸秆和稻糠对稻田土壤硅素转化及水稻硅吸收的影响[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(1): 128-136.  
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.01.014

## 秸秆和稻糠对稻田土壤硅素转化及水稻硅吸收的影响

杨丽雯, 陈剑珠, 宁川川, 蔡昆争

华南农业大学资源环境学院/农业农村部华南热带农业环境重点实验室/  
广东省生态循环农业重点实验室, 广州 510642

**摘要** 为促进有机物料循环利用、提高稻田土壤硅有效性,设计2季水稻盆栽试验,试验设7个处理:对照(CK)、0.5% 秸秆(JG1)、1% 秸秆(JG2)、1.5% 秸秆(JG3)、0.5% 稻糠(DK1)、1% 稻糠(DK2)、1.5% 稻糠(DK3),研究2种有机物料稻秆和稻糠不同用量对土壤硅形态、水稻植株硅吸收和地上部干物质积累量、土壤肥力的影响。结果显示,2种富硅有机物料显著提高土壤水溶性硅、有效硅、有机结合态硅、无定形硅含量,总体上与用量成正比,以稻糠处理的提高幅度较高。与CK相比,1%、1.5% 稻糠施用分别使土壤水溶性硅含量提高18.85%~46.58%,有效硅含量提高11.51%~118.82%,有机结合态硅含量提高21.88%~51.95%,铁锰氧化物结合态硅含量提高3.38%~19.17%,无定形硅含量提高6.41%~22.14%。2种有机物料提高水稻茎叶硅含量和积累量,稻糠施用效果更显著;与CK相比,秸秆和稻糠施用分别使水稻茎叶硅积累量显著提高0.60~2.51倍、1.33~4.08倍。2种有机物料提高水稻地上部干物质积累量,在不同程度上增加土壤有机质和速效氮、磷、钾养分含量。综上,2种有机物料都能增加土壤肥力,提高土壤硅有效性,促进水稻对硅的吸收,其中稻糠的提高幅度更大,但从实践应用的角度来看,秸秆更具有一定的应用前景。

**关键词** 水稻; 秸秆; 稻糠; 土壤硅形态; 硅有效性; 硅吸收

**中图分类号** S511 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)01-0128-09

水稻(*Oryza sativa* L.)是典型的硅高累积植物,其茎叶中二氧化硅的含量可达10%~20%,相对于秸秆,稻糠硅的积累量更大<sup>[1]</sup>。硅对水稻而言是必需元素,硅能提高水稻植株的机械强度和韧性,提高水稻对生物胁迫(病害、虫害等)和非生物胁迫(重金属、盐、干旱、紫外辐射等)的抗性,从而促进其健康生长<sup>[2-3]</sup>。土壤中硅的总含量很高,但可供植物吸收利用的有效硅有限,加之水稻连续种植从土壤中带走大量的硅,通常每季可带走100~500 kg/hm<sup>2</sup><sup>[4]</sup>。如果不补充硅,容易导致稻田缺硅,尤其南方广泛分布的由花岗岩、红砂岩以及红色黏土等母质发育而成的土壤,据统计,我国大约50%的水田缺硅<sup>[5]</sup>。水稻秸秆还田是补充土壤硅素的最简单有效的方法,可在相当程度上缓解或消除土壤供硅不足的问题<sup>[6-7]</sup>。

水稻产量不断提升的同时产生了大量的农业废弃物。近年来,我国大力推行秸秆还田技术和机械

化,秸秆还田不仅能够促进农业生物质资源的有效利用,还有助于农业生态环境的保护<sup>[8-9]</sup>。水稻秸秆含有丰富的有机碳和氮、磷、钾及各种微量元素,还田能将其自身的部分营养元素归还到土壤中,在一定程度上缓解土壤养分下降;秸秆还田还能改善土壤的结构和理化性状,增强土壤的保水保肥能力,增强土壤微生物和酶活性,加速有机物分解和土壤养分转化,长期实施秸秆还田能明显提升土壤肥力和作物养分吸收<sup>[8, 10-11]</sup>。秸秆中的硅素是以植硅体的形式归还土壤,植硅体是非水溶非晶态的SiO<sub>2</sub>,需经若干年自然风化才能释放出硅酸供植物利用,但其溶解速度要明显快于矿物风化速度<sup>[2]</sup>。尽管秸秆还田对水稻硅营养的影响已有较多报道<sup>[12-14]</sup>,但对于其如何干预土壤不稳定硅库和硅有效性仍缺乏系统的研究。稻糠通常用作畜禽饲料不会返田,然而,稻壳含有高浓度的硅、氮和钾,以及较低浓度的磷、硫和锌,使其成为一种极具吸引力的土壤改良剂<sup>[1, 15]</sup>。

收稿日期:2024-04-02

基金项目:国家自然科学基金项目(32201328)

杨丽雯, E-mail: 2836029586@qq.com

通信作者:蔡昆争, E-mail: kzcai@scau.edu.cn

秸秆和稻糠的直接施用对水稻硅吸收和土壤硅库的作用值得研究。

本研究采用水稻盆栽试验,模拟秸秆和稻糠不同用量还田对土壤不同形态硅含量、水稻硅养分吸收和土壤肥力的影响,以期合理秸秆还田和稻田硅素补充提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验点基本概况

试验在广州市天河区北部(113°21'E,23°9'N)华南农业大学生态系农场进行,该地属亚热带季风湿润气候,光照充足,年平均气温 20~22℃,年平均降雨量约 1 720 mm。

1.2 试验材料

供试土壤取自华南农业大学启林北农场附近的水稻田,其土壤基本理化性质如表 1 所示。水稻品种为华航 31 号(粤审稻 2010022),由华南农业大学农学院提供。所用的富硅有机物料(秸秆和稻糠)为华航 31 号田间成熟后自留,秸秆用铡刀铡成约 1 cm 的小段,稻糠过筛去除杂质。秸秆和稻糠养分含量如表 1 所示。

表 1 土壤基本理化性质和有机物料养分含量  
Table 1 Basic physical and chemical properties of soil and nutrient content of organic materials

项目 Items	2022 年盆栽试验 Pot trial in 2022			2023 年盆栽试验 Pot trial in 2023		
	土壤 Soil	秸秆 Straw	稻糠 Husk	土壤 Soil	秸秆 Straw	稻糠 Husk
pH	6.35			6.02		
有机质/(g/kg) Organic matter	26.14			21.67		
碱解氮/(mg/kg) Alkali-hydrolyzable nitrogen	105			99.70		
速效磷/(mg/kg) Available phosphorus	94.84			102.97		
速效钾/(mg/kg) Available potassium	34.63			47.86		
有效硅/(mg/kg) Available silicon	41.33			68.89		
全氮/(mg/g) Total nitrogen		9.23	7.28		8.73	6.80
全磷/(mg/g) Total phosphorus		0.46	0.07		1.26	0.83
全钾/(mg/g) Total potassium		28.30	5.60		21.38	6.73
全硅/(mg/g) Total silicon		19.90	34.86		14.52	25.9 9

1.3 试验设计

本研究共进行 2 季盆栽试验,以水稻为研究对象,分别于 2022 年 8 月至 11 月(晚稻)和 2023 年 3 月至 7 月(早稻)在四周通风的大棚内开展试验。设置秸秆用量水平与土壤质量比分别为 0.5%、1%、1.5%,记为 JG1、JG2、JG3,稻糠用量水平与土壤质量比分别为 0.5%、1%、1.5%,记为 DK1、DK2、DK3 以及不施用秸秆和稻糠的对照组(CK),共 7 个处理,每个处理 4 个重复,在成熟期取样,共 28 盆。试验用盆为 20 cm×28 cm×17 cm(下口径×上口径×高)的黑色塑料盆,每盆装 7 kg 过孔径 2 mm 筛的干土(2 季的供试土壤不同),将秸秆和稻糠混入土中,加水搅拌均匀浸泡 1 周。水稻提前在秧田育苗,待其长到 3 叶 1 心时移栽,每盆 3 穴,每穴 2 株秧苗,随机区组排列。在移栽后 7 d 和抽穗期前 14 d 各施 6 g 复合肥(15-15-15)和 3 g 尿素。试验期间各处理的病虫害防治等栽培管理措施一致。

1.4 水稻植株取样与测定

在水稻成熟期内,每盆各随机选取长势良好的 1 穴样株,用镰刀沿其土壤表面将稻株割下,带回实验室。将水稻植株冲洗干净后,分成茎、叶、穗,并将新鲜样品于 105℃的烘箱内杀青 30 min,于 75℃烘干至恒质量,冷却后称取各部分干质量,相加得出水稻地上部干物质总量。将茎、叶用小型万能粉碎机磨成粉末,测定硅含量,并根据水稻植株硅含量和干质量计算水稻茎叶部硅积累量。硅含量采用高温碱熔解法测定<sup>[16]</sup>。

1.5 土壤取样与测定

水稻植株取样后,于 2 穴水稻中间的位置,用土钻从上到下取土柱,3 个土柱混合成 1 个土样,风干后研磨过孔径 1 mm 筛,用于测定 pH、有机质、碱解氮、速效磷、速效钾以及不同形态硅含量。土壤 pH 用 pH 计(ST2100,奥豪斯仪器常州有限公司)测定,水土质量比为 2.5:1。土壤有机质用重铬酸钾容量法-稀释热法测定;土壤碱解氮用碱解扩散法分析;土壤速效磷采用 NaHCO<sub>3</sub>提取,钼锑抗比色法测定;速效钾采用 NH<sub>4</sub>OAc 浸提,火焰光度法测定<sup>[17]</sup>。土壤水溶性硅采用 0.02 mol/L CaCl<sub>2</sub>浸提-硅钼蓝比色法测定,根据 Song 等<sup>[18]</sup>的逐级连续提取法,按有效态硅、有机结合态硅、铁锰氧化物结合态硅、无定形硅的顺序提取,提取后各种硅含量的测定采用硅钼蓝比色法测定。

1.6 统计分析

试验数据用 Microsoft Excel 2019 进行计算整

理,用 SPSS 25.0 软件进行双因素方差分析、Duncan’s 多重比较和 Pearson 相关性分析,用 Origin 2023b 软件作图。图表中数据均为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 秸秆和稻糠对土壤硅形态的影响

双因素方差分析结果显示,富硅有机物料类型对土壤氧化物结合态硅、无定形硅影响极显著( $P<0.01$ ),用量对土壤水溶性硅、有效硅、有机结合态硅、铁锰氧化物结合态硅均影响极显著( $P<0.01$ ),二者交互作用对铁锰氧化物结合态硅影响显著( $P<0.05$ )。在 2 季试验中,秸秆和稻糠施用均可以一定程度上提高土壤不同形态硅含量(表 2)。富硅有机物料处理下土壤水溶性硅含量高于 CK,增幅为 4.89%~46.58%,其中以稻糠施用的处理最为明显。1.5% 富硅有机物料用量处理的土壤水溶性硅含量均显著高于 0.5% 用量( $P<0.05$ )。土壤有效硅含量随着富硅有机物料用量的增加而提高,2022 年晚稻在

富硅有机物料处理下,土壤有效硅含量与 CK 相比显著提高( $P<0.05$ );在同等用量时,稻糠处理下有效硅含量显著高于秸秆处理( $P<0.05$ ),且在不同用量稻糠之间差异显著( $P<0.05$ ),如 DK1、DK2、DK3 有效硅含量较 CK 分别增加 71.03%、88.57%、118.82%。可见,有机物料类型和用量对土壤有效硅含量的变化有一定的影响。随着富硅有机物料的添加,土壤有机结合态硅含量也相应增加,较 CK 处理,秸秆和稻糠分别使有机结合态硅含量提高 1.28%~56.44%、9.00%~51.95%。在 2023 年早稻试验中,DK3 处理下的土壤铁锰氧化物结合态硅含量显著高于 CK,提高了 19.17%。土壤无定形硅含量随着富硅有机物料用量的增加而增加,以 DK3 处理的土壤无定形硅含量最高,其增幅高达 22.13%;在相同有机物料用量条件下,稻糠处理的无定形硅含量均高于秸秆,其原因可能与稻糠本身的硅含量较高有关。

表 2 秸秆和稻糠处理下土壤不同形态硅含量的变化

Table 2 Different fractions of silicon content in soil treated with straw and husk

年份 Year	处理 Treatments	水溶性硅/ (mg/kg) Water-soluble Si	有效硅/(mg/kg) Available Si	有机结合态硅/ (mg/kg) Organic Si	铁锰氧化物结合 态硅/(mg/kg) Fe/Mn-oxide Si	无定形硅/ (g/kg) Amorphous Si
2022	CK	6.14±0.37d	34.48±1.55e	48.28±2.21e	133.70±1.57a	1.31±0.01cd
	JG1	6.44±0.53cd	52.02±5.54d	56.63±1.11d	136.55±3.03a	1.33±0.01cd
	JG2	7.52±0.16b	54.74±1.36cd	70.30±5.01bc	137.68±1.97a	1.42±0.01d
	JG3	8.50±0.43a	54.96±0.93cd	75.53±3.01a	137.92±2.40a	1.56±0.03b
	DK1	7.24±0.65bc	58.97±1.55c	68.84±2.49c	133.70±8.81a	1.39±0.04c
	DK2	8.88±0.33a	65.02±6.36b	70.66±0.43bc	138.22±6.23a	1.46±0.01c
	DK3	9.00±1.24a	75.45±3.29a	73.36±2.36ab	141.32±6.20a	1.60±0.02a
	材料类型 Material type	*	**	*	**	**
	用量 Addition rate	**	**	**	**	**
	材料类型×用量 Material type×Addition rate	ns	**	**	*	ns
2023	CK	7.16±0.26d	80.37±3.03cd	79.86±2.12d	80.37±0.84b	2.34±0.06b
	JG1	7.80±0.19cd	79.86±3.40d	80.88±1.29cd	89.62±1.78ab	2.35±0.05b
	JG2	8.76±0.15b	82.94±0.98bcd	83.46±3.41cd	97.33±1.76a	2.37±0.01b
	JG3	8.37±0.43bc	92.19±3.69b	90.65±4.89bc	90.65±4.67ab	2.49±0.04ab
	DK1	7.67±0.24cd	79.34±2.14d	87.05±2.12cd	68.04±6.77c	2.41±0.02b
	DK2	8.51±0.23bc	89.62±3.61bc	97.33±1.76ab	87.0±1.75ab	2.49±0.03ab
	DK3	9.98±0.27a	102.98±3.56a	100.93±4.28a	95.78±1.97a	2.59±0.09a
	材料类型 Material type	ns	ns	**	**	**
	用量 Addition rate	**	**	**	**	ns
	材料类型×用量 Material type×Addition rate	**	ns	ns	**	ns

注:不同小写字母分别表示处理之间差异显著( $P<0.05$ );\*和\*\*分别表示在 0.05 显著和 0.01 水平极显著,ns 表示不显著。下同。Note: Different lowercase letters indicate the significance of the difference between different treatments ( $P<0.05$ ). \* and \*\* indicate a significant at the 0.05 level and a very significant difference at the 0.01 level, respectively; ns indicates no significant difference. The same as follows.



2.2 富硅有机物料对水稻植株硅养分含量和积累量的影响

双因素方差分析结果显示,富硅有机物料类型和用量对水稻茎叶部硅含量(图1)和积累量(图2)均影响极显著( $P<0.01$ ),且二者间交互作用极显著( $P<0.01$ )。随着富硅有机物料的添加,水稻茎叶硅含量也相应增加。富硅有机物料处理下水稻茎、叶硅含量与CK相比均显著提高( $P<0.05$ ),秸秆和稻糠处理下叶片硅含量分别增加0.36~1.58倍、0.93~2.64倍,茎的硅含量分别增加0.45~2.06倍、0.55~2.41倍;在用量相同条件下,稻糠处理的叶片硅含量

显著高于秸秆处理( $P<0.05$ )。可见,与秸秆相比,稻糠处理下水稻植株茎叶硅含量增加效果更显著。从水稻植株硅积累量来看,较CK处理,富硅有机物料显著增加水稻茎叶硅积累量( $P<0.05$ ),秸秆增加0.60~2.51倍,稻糠1.33~4.08倍;同水平用量条件下,秸秆和稻糠处理之间差异显著( $P<0.05$ ),同一富硅有机物料不同用量之间也存在显著差异( $P<0.05$ )。这说明,富硅有机物料用量及类型对水稻植株硅吸收累积有一定影响,1.5%稻糠施用(DK3)可以促进水稻对土壤硅养分的吸收。

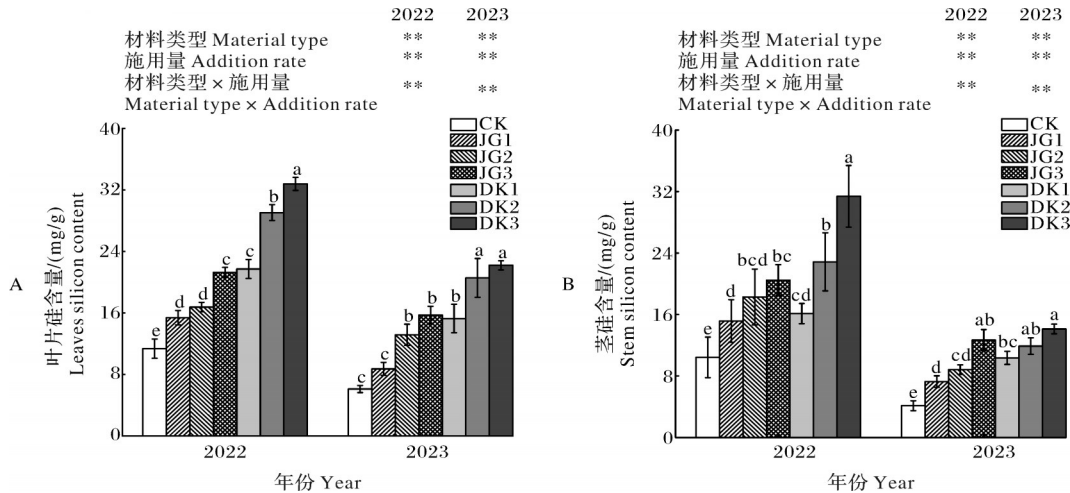


图1 秸秆和稻糠处理下水稻植株叶(A)和茎(B)硅含量的变化  
Fig.1 Silicon content in leaves(A) and stems(B) treated with straw and husk

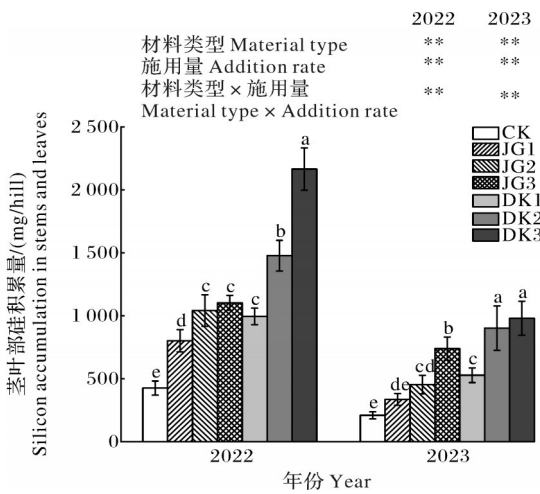


图2 秸秆和稻糠处理下水稻植株茎叶部硅积累量的变化  
Fig.2 Silicon accumulation in stems and leaves treated with straw and husk

2.3 富硅有机物料对水稻植株地上部干物质积累量的影响

双因素方差分析结果显示,富硅有机物料类型和用量对水稻地上部干物质积累量的影响在不同季

节呈现不同的效果(图3)。2022年晚稻试验中,富硅有机物料类型对地上部干物质积累量影响显著( $P<0.05$ );2023年早稻试验中,富硅有机物料用量对地上部干物质积累量影响极显著( $P<0.01$ )。在2022年晚稻试验中,秸秆和稻糠处理下地上部干物质积累量均高于CK,其中DK2、DK3显著提高6.94%、30.81%。而在2023年早稻试验中,除DK2和DK3处理外,其他处理的地上部干物质积累量均低于CK,其原因可能是富硅有机物料中的有机物质在分解过程中会消耗土壤中的氮素等养分,导致可供水稻吸收的速效养分减少,且在分解过程中可能会产生一些对水稻生长不利的物质,如有机酸、酚类化合物等,从而抑制了水稻植株生物量的增长。

2.4 富硅有机物料对土壤化学特性的影响

双因素方差分析结果显示,富硅有机物料类型对土壤有机质、速效钾含量影响极显著( $P<0.01$ ),用量对土壤化学特性影响均极显著( $P<0.01$ ),二者间交互作用对土壤速效钾影响极显著( $P<0.01$ )(表3)。

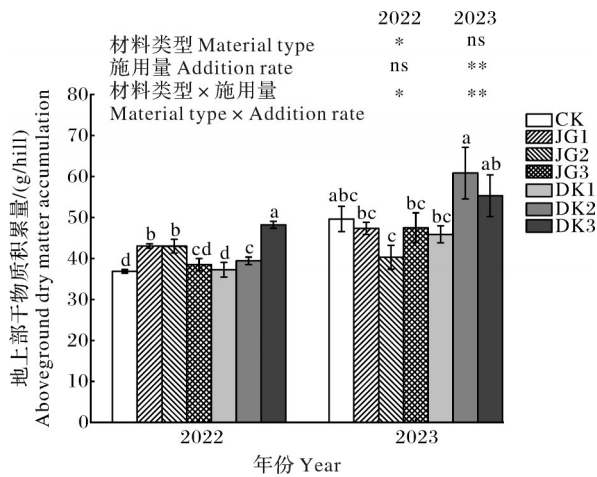


图 3 秸秆和稻糠处理下水稻植株地上部干物质积累量的变化

Fig.3 The aboveground dry matter accumulation treated with straw and husk

富硅有机物料处理下土壤 pH 和土壤养分含量有一定程度提高,具体表现在富硅有机物料施用使土壤有机质、碱解氮、速效钾含量分别提高 1.29%~29.41%、0.57%~13.51%, -4.52%~105.63%; 在 2022 年晚稻试验中,较 CK 组,稻糠处理下土壤 pH、速效磷含量增加显著( $P<0.05$ )。土壤有机质和速效钾含量随着富硅有机物料的增加而增加,JG3 处理显著高于其他处理( $P<0.05$ )。

2.5 土壤各形态硅含量与土壤化学特性、硅吸收量及生物量的相关性分析

相关分析结果显示,土壤有效硅与水溶性硅、有机结合态硅、无定形硅呈极显著正相关( $P<0.01$ )。水稻茎叶硅积累量与土壤 pH、土壤有机质、水溶性硅、铁锰氧化物结合态硅含量、地上部干物质总积累量呈极显著正相关( $P<0.01$ )(表 4)。表明水稻对硅的吸收积累量与土壤中形态硅含量有不可分割的关系。

表 3 秸秆和稻糠处理下土壤化学特性的变化

Table 3 Soil chemical properties treated with straw and husk

年份 Year	处理 Treatments	pH	有机质 /(g/kg) Organic matter	碱解氮/(mg/kg) Alkali-hydrolyzable nitrogen	速效磷/(mg/kg) Available phosphorus	速效钾/(mg/kg) Available potassium
2022	CK	6.60±0.03c	27.11±0.35d	109.38±1.31c	88.59±3.29c	32.84±0.45d
	JG1	6.63±0.03c	30.46±0.21b	111.00±3.49bc	90.03±0.71c	40.93±0.72c
	JG2	6.73±0.04b	30.89±0.48ab	114.63±4.40ab	92.93±1.15bc	50.86±3.91b
	JG3	6.76±0.02b	31.80±1.43a	116.63±3.64a	97.39±0.98ab	67.53±6.85a
	DK1	6.72±0.05b	27.46±0.26d	110.00±3.34bc	99.94±4.69a	33.40±0.46d
	DK2	6.78±0.07b	28.21±0.79cd	111.50±1.00bc	98.78±4.58ab	33.76±0.88d
	DK3	6.90±0.05a	28.77±1.10c	113.13±1.60abc	96.70±6.45ab	34.19±0.65d
	材料类型 Material type	**	**	ns	**	**
	用量 Addition rate	**	**	**	**	**
	材料类型×用量 Material type×Addition rate	**	**	ns	*	**
2023	CK	6.12±0.01ab	23.39±0.01c	97.13±1.68d	96.92±3.35b	36.26±0.92c
	JG1	6.11±0.02bc	25.45±1.43bc	99.75±3.03cd	99.24±2.57a	52.57±12.70b
	JG2	6.04±0.02cd	28.55±1.03ab	110.25±2.26a	89.69±1.11c	53.13±10.03b
	JG3	6.11±0.01bc	30.27±2.03a	107.63±0.88ab	90.52±0.90bc	70.59±8.26a
	DK1	5.98±0.03d	23.73±1.42c	105.00±1.43abc	89.03±0.49c	34.62±4.49c
	DK2	5.99±0.04d	24.08±1.32c	101.75±1.64bcd	85.13±0.75c	35.05±1.11c
	DK3	6.19±0.02a	26.83±0.40abc	100.63±1.68cd	96.25±2.49ab	35.60±2.58c
	材料类型 Material type	ns	**	ns	ns	**
	用量 Addition rate	**	**	**	**	**
	材料类型×用量 Material type×Addition rate	**	ns	**	**	**

表 4 土壤各形态硅含量与土壤化学特性、硅吸收量及生物量的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of silica content in various forms of soil with soil chemical characteristics, silicon uptake and biomass

项目 Items	水溶性硅 Water-soluble Si	有效硅 Available Si	有机结合态硅 Organic Si	铁锰氧化物结合 态硅 Fe/Mn-oxide Si	无定形硅 Amorphous Si	硅积累量 Silicon accumulation	干物质总量 Dry matter weight
pH	-0.137	-0.677**	-0.659**	0.954**	-0.916**	0.665**	0.579**
有机质 Organic matter	0.047	-0.341*	-0.277*	0.585**	-0.538**	0.348**	0.237
水溶性硅 Water-soluble Si	1	0.613**	0.648**	-0.131	0.378**	0.404**	0.143
有效硅 Available Si		1	0.881**	-0.676**	0.858**	-0.039	-0.248
有机结合态硅 Organic Si			1	-0.659**	0.831**	-0.057	-0.306*
铁锰氧化物结合态硅 Fe/Mn-oxide Si				1	-0.920**	0.631**	0.594**
无定形硅 Amorphous Si					1	-0.440**	-0.491**
硅积累量 Silicon accumulation						1	0.582**
干物质总量 Dry matter weight							1

3 讨 论

3.1 富硅有机物料对土壤硅有效性的影响

硅是植物生长的有益元素,土壤中硅的形态和有效性对生态系统功能的影响至关重要。水稻从土壤溶液中吸收的溶解硅的形式为单硅酸<sup>[3, 19]</sup>。土壤水溶性硅通常以单硅酸的形式存在,其浓度范围在 0.1~0.6 nmol/L,能够被作物直接吸收和利用<sup>[20]</sup>,并与其他形态的硅保持着动态平衡。在分级提取的 4 种土壤非晶态硅中,有效硅是当季作物能直接吸收利用的硅素,其有效性最高;有机结合态硅是活性硅的一部分,可以转化为植物可吸收的水溶性硅,从而成为土壤中水溶性硅的一个关键储备来源;铁锰氧化物结合态硅主要是指吸附在黏粒 Fe/Mn-O 表面的硅酸,其活性低;无定形硅溶解度低,但在特定条件下能转化为有效硅<sup>[6, 18]</sup>。各形态硅对水稻硅素营养的供应具有重要的作用,它们之间存在着相互转化的动态平衡关系。高明等<sup>[12]</sup>的大田和盆栽试验结果均表明施用水稻秸秆后,土壤有效硅含量提高 10%~35%,水溶性硅含量增加 6%~104%。Song 等<sup>[21]</sup>研究表明,与单独施氮、磷、钾相比,稻草还田显著提高了土壤生物利用硅的水平,从 29.9% 提高到 61.6%。本试验结果表明,秸秆和稻糠施用显著提高土壤水溶性硅、有效硅、有机结合态硅和无定形硅含量;与秸秆相比,稻糠的效果更好,如秸秆和稻糠施用分别使土壤水溶性硅含量增加 4.89%~38.44% 和 7.12%~46.58%,无定形硅含量增加 0.43%~19.08% 和 3.00%~22.14%(表 3)。其原因一方面是

富硅有机物料施用后,自身含有的水溶性硅会逐渐释放到土壤溶液中,使土壤水溶性硅含量得以较大幅度提高<sup>[13, 22]</sup>;另一方面水稻植株中的硅主要属于无定形硅<sup>[2]</sup>,而土壤有效硅和水溶性硅主要来源于无定形硅的转化。另外,富硅有机物料施用后,有机物的分解有助于增加腐殖质,与土壤中的硅结合形成有机结合态硅,从而促进土壤活性硅的积累。Meunier 等<sup>[23]</sup>研究指出,在 pH 4~9 范围内,金属氧化物对硅酸的吸附作用与土壤 pH 呈正相关,这会导致土壤中硅的有效性降低。本研究中有有机物料施用后对铁锰氧化物结合态硅的影响不显著,可能是土壤 pH 的变化幅度有限,但其影响机制有待进一步研究。相关性分析表明,土壤无定形硅与土壤水溶性硅、有效硅、有机结合态硅极显著正相关( $P<0.01$ )。有研究指出,无定形硅的分解和迁移对土壤有效硅的分布产生显著影响,富硅有机物料长期还田能够显著提高土壤无定形硅、有机结合态硅、铁锰氧化物结合态硅含量,从而增强土壤有效硅库<sup>[7]</sup>。因此,富硅有机物料施用可以通过促进土壤中非晶态硅含量的提高,从而增强土壤中硅的有效性。

3.2 富硅有机物料对水稻植株硅吸收的影响

秸秆还田能显著增加土壤有机质含量,同时也能提高土壤中氮、磷等养分的含量,这主要是因为秸秆中的有机物质在分解过程中释放了多种营养元素,从而提高了土壤的肥力,促进作物生长<sup>[8, 11]</sup>。本试验中,富硅有机物料提高了土壤 pH、土壤有机质和速效养分含量(表 3),为水稻生长提供良好的外部环



境。水稻良好生长是高产的前提,秸秆还田对水稻生长的影响已有较多研究<sup>[24-26]</sup>,但对水稻硅素营养的研究较少。有机物料中硅的含量水平反映了水稻硅素营养的供应状况。Koyama等<sup>[27]</sup>研究指出,有机物料还田能够通过提供营养元素来增加植物的生物量,促进植物对硅的吸收和积累。宁东峰等<sup>[28]</sup>研究指出,施用硅肥后水稻秸秆中的硅含量有增加的趋势。在低氮水平下,水稻秸秆中的硅含量与施硅量呈正比<sup>[29]</sup>。本研究与前人的研究结果<sup>[30]</sup>相似,与富硅有机物料不施用处理相比,施用有机物料使水稻茎叶硅含量和积累量显著增加( $P<0.05$ ),水稻茎叶硅积累量随富硅有机物料用量的增加而增加,稻糠对水稻硅营养的影响更大(图1、图2)。究其原因,除了生物量差异外,硅含量增加,导致硅积累量在处理间差异显著。相关分析表明,水稻硅积累量与水稻地上部干物质积累量、土壤有机质、土壤水溶性硅、铁锰氧化物结合态硅呈极显著正相关( $P<0.01$ )。综合分析,在农业生产实践中,可以把富硅有机物料作为补充土壤硅的肥料。

秸秆和稻糠施用在不同程度上增加了土壤pH、有机质和速效养分含量,从而提高了土壤肥力。同时,除了铁锰氧化物结合态硅,富硅有机物料(特别是1.5%稻糠)施用显著增加土壤水溶性硅、有效硅、有机结合态硅及无定形硅含量,总体上这些硅含量随着用量的增加而增加。秸秆和稻糠施用均能显著增加水稻茎叶硅养分吸收和累积,稻糠施用更有利于水稻吸收硅。综合本研究结果,2种富硅有机物料能够丰富土壤不稳定硅库,增加土壤硅有效性,促进水稻对硅素的吸收。从硅的有效性方面来看,稻糠比秸秆提高的幅度更大,但是综合考虑到稻糠的成本问题,从生产实践的角度来看,秸秆更适合回田补充硅养分。

## 参考文献 References

- [1] LIMMER M A, LINAM F A, SEYFFERTH A L. The effect of rice residue management on rice paddy Si, Fe, As, and methane biogeochemistry[J/OL]. *Science of the total environment*, 2023, 903: 166496 [2024-04-02]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166496>.
- [2] GUNTZER F, KELLER C, MEUNIER J D. Benefits of plant silicon for crops: a review[J]. *Agronomy for sustainable development*, 2012, 32(1): 201-213.
- [3] COSKUN D, DESHMUKH R, SONAH H, et al. The controversies of silicon's role in plant biology[J]. *New phytologist*, 2019, 221(1): 67-85.
- [4] TUBANA B S, BABU T, DATNOFF L E. A review of silicon in soils and plants and its role in US agriculture[J]. *Soil science*, 2016, 181(9/10): 393-411.
- [5] YANG X M, SONG Z L, VAN ZWIETEN L, et al. Spatial distribution of plant-available silicon and its controlling factors in paddy fields of China[J/OL]. *Geoderma*, 2021, 401: 115215 [2024-04-02]. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115215>.
- [6] YANG X M, SONG Z L, YU C X, et al. Quantification of different silicon fractions in broadleaf and conifer forests of Northern China and consequent implications for biogeochemical Si cycling[J/OL]. *Geoderma*, 2020, 361: 114036 [2024-04-02]. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114036>.
- [7] PUPPE D, KACZOREK D, SCHALLER J, et al. Crop straw recycling prevents anthropogenic desilication of agricultural soil-plant systems in the temperate zone: results from a long-term field experiment in NE Germany[J/OL]. *Geoderma*, 2021, 403: 115187 [2024-04-02]. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115187>.
- [8] 黄巧义, 黄建凤, 黄旭, 等. 早稻秸秆还田和减钾对晚稻产量和土壤肥力的影响[J]. *环境科学*, 2022, 43(10): 4706-4715. HUANG Q Y, HUANG J F, HUANG X, et al. Effects of early rice straw returning with reducing potassium fertilizer on late rice yield and soil fertility[J]. *Environmental science*, 2022, 43(10): 4706-4715 (in Chinese with English abstract).
- [9] CHE W K, PIAO J L, GAO Q, et al. Response of soil physico-chemical properties, soil nutrients, enzyme activity and rice yield to rice straw returning in highly saline-alkali paddy soils[J]. *Journal of soil science and plant nutrition*, 2023, 23(3): 4396-4411.
- [10] GUPTA R K, YADVINDER-SINGH, LADHA J K, et al. Yield and phosphorus transformations in a rice-wheat system with crop residue and phosphorus management[J]. *Soil Science Society of America journal*, 2007, 71(5): 1500-1507.
- [11] LIU G, YU H Y, MA J, et al. Effects of straw incorporation along with microbial inoculant on methane and nitrous oxide emissions from rice fields[J]. *Science of the total environment*, 2015, 518: 209-216.
- [12] 高明, 魏朝富, 谢德体. 有机肥对紫色水稻土有效硅的影响[J]. *西南农业大学学报*, 1996, 18(3): 272-275. GAO M, WEI C F, XIE D T. Effects of organic manures on availability of silicon in purple paddy soil[J]. *Journal of Southwest University (natural science edition)*, 1996, 18(3): 272-275 (in Chinese with English abstract).
- [13] 曾研华, 吴建富, 范呈根, 等. 化肥减施条件下稻草还田供硅对双季稻产量及硅素养分吸收的影响[J]. *核农学报*, 2018, 32(2): 344-352. ZENG Y H, WU J F, FAN C G, et al. Effects of straw incorporation supplying silicon on grain yield and silicon absorption of double cropping rice under chemical fertilizer reduced[J]. *Journal of nuclear agricultural sciences*, 2018, 32

- (2):344-352 (in Chinese with English abstract).
- [14] HUGHES H J, HUNG D T, SAUER D. Silicon recycling through rice residue management does not prevent silicon depletion in paddy rice cultivation[J]. Nutrient cycling in agroecosystems, 2020, 118(1):75-89.
- [15] RUNKLE B R K, SEYFFERTH A L, REID M C, et al. Socio-technical changes for sustainable rice production: rice husk amendment, conservation irrigation, and system changes [J/OL]. Frontiers in agronomy, 2021, 3: 741557 [2024-04-02]. <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.741557>.
- [16] 戴伟民, 张克勤, 段彬伍, 等. 测定水稻硅含量的一种简易方法[J]. 中国水稻科学, 2005, 19(5): 460-462. DAI W M, ZHANG K Q, DUAN B W, et al. Rapid determination of silicon content in rice (*Oryza sativa*) [J]. Chinese journal of rice science, 2005, 19(5): 460-462 (in Chinese with English abstract).
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese).
- [18] SONG Z L, WANG H L, STRONG P J, et al. Increase of available soil silicon by Si-rich manure for sustainable rice production[J]. Agronomy for sustainable development, 2014, 34(4):813-819.
- [19] GUO F S, SONG Z L, SULLIVAN L, et al. Enhancing phytolith carbon sequestration in rice ecosystems through basalt powder amendment [J]. Science bulletin, 2015, 60(6): 591-597.
- [20] KLOTZBÜCHER T, MARXEN A, JAHN R, et al. Silicon cycle in rice paddy fields: insights provided by relations between silicon forms in topsoils and plant silicon uptake[J]. Nutrient cycling in agroecosystems, 2016, 105(2):157-168.
- [21] SONG A L, LI Z M, LIAO Y L, et al. Soil bacterial communities interact with silicon fraction transformation and promote rice yield after long-term straw return[J]. Soil ecology letters, 2021, 3(4):395-408.
- [22] SEYFFERTH A L, KOCAR B D, LEE J A, et al. Seasonal dynamics of dissolved silicon in a rice cropping system after straw incorporation [J]. Geochimica et cosmochimica acta, 2013, 123:120-133.
- [23] MEUNIER J D, SANDHYA K, PRAKASH N B, et al. pH as a proxy for estimating plant-available Si: a case study in rice fields in Karnataka (South India) [J]. Plant and soil, 2018, 432(1):143-155.
- [24] 丁奇, 吴建富, 李涛, 等. 稻草全量还田对双季水稻生长和土壤肥力的影响[J]. 江西农业大学学报, 2014, 36(1): 44-49. DING Q, WU J F, LI T, et al. The effect of total straw incorporation on rice growth and soil fertility [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2014, 36(1): 44-49 (in Chinese with English abstract).
- [25] 曹正男, 赵振东, 张海龙, 等. 黑龙江省水稻秸秆还田现状及展望[J]. 中国稻米, 2022, 28(2): 20-23. CAO Z N, ZHAO Z D, ZHANG H L, et al. Status and prospect of returning rice straw to field in Heilongjiang Province [J]. China rice, 2022, 28(2):20-23 (in Chinese with English abstract).
- [26] 高俊, 汪慧泉, 顾东祥, 等. 秸秆还田对土壤生态及农作物生长发育影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2023, 39(30): 87-93. GAO J, WANG H Q, GU D X, et al. Effects of straw returning on soil ecology and crop growth and development [J]. Chinese agricultural science bulletin, 2023, 39(30): 87-93 (in Chinese with English abstract).
- [27] KOYAMA S, HAYASHI H. Rice yield and soil carbon dynamics over three years of applying rice husk charcoal to an Andosol paddy field [J]. Plant production science, 2017, 20(2):1-7.
- [28] 宁东峰, 刘战东, 肖俊夫, 等. 水稻土施用钢渣硅钙肥对土壤硅素形态和水稻生长的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(8): 42-46. NING D F, LIU Z D, XIAO J F, et al. Effects of application of steel slag-based silicon fertilizer on chemical forms of soil silicon and rice growth [J]. Journal of irrigation and drainage, 2016, 35(8): 42-46 (in Chinese with English abstract).
- [29] 潘韬文, 陈俣, 蔡昆争. 硅肥和氮肥配施对优质稻植株养分含量、产量和品质的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(1): 120-126. PAN T W, CHEN Y, CAI K Z. Effect of nitrogen and silicon fertilizer on plant nutrient content, yield and quality of high quality rice [J]. Journal of ecology and rural environment, 2021, 37(1): 120-126 (in Chinese with English abstract).
- [30] YAO D H, WU J F, GAO H W, et al. Changes in soil silicon forms and availability as affected by rice straw and its biochar [J/OL]. European journal of soil science, 2022, 73(6): e13316 [2024-04-02]. <https://doi.org/10.1111/ejss.13316>.



## Effects of straw and rice bran on conversion of silicon in paddy soil and absorption of silicon by rice

YANG Liwen, CHEN Jianzhu, NING Chuanchuan, CAI Kunzheng

*College of Natural Resources and Environment/Ministry of Agriculture and Rural Affairs*

*Key laboratory of Tropical Agro-Environment/Guangdong Province Key Laboratory of Eco-Circular Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China*

**Abstract** Rice residues are rich in silicon, which is one of the main agricultural wastes, and its return to the field is considered to be a cost-effective silica supplementation measure. A pot experiment of rice for two seasons was conducted to promote the recycling of organic materials and improve the availability of silicon in paddy soil. 7 treatments including the control (CK), 0.5% straw (JG1), 1% straw (JG2), 1.5% straw (JG3), 0.5% rice bran (DK1), 1% rice bran (DK2), and 1.5% rice bran (DK3) were set up to study the effects of different dosages of two organic materials including rice straw and rice bran on the silicon morphology in soil, the absorption of silicon by rice, the aboveground accumulation of dry matter, and the fertility in soil. The results showed that 2 types of silicon abundant organic materials significantly increased the content of water-soluble silicon, available silicon, organic bound silicon, and amorphous silicon in soil, which was generally proportional to the dosage used, with a higher increase observed in the treatment with rice bran. Compared with CK, DK2 and DK2 significantly increased the content of water-soluble silicon in soil by 18.85%-46.58%, the content of available silicon by 11.51%-118.82%, the content of organic bound silicon by 21.88%-51.95%, the content of iron manganese oxide bound silicon by 3.38%-19.17%, and the content of amorphous silicon by 6.41%-22.14%, respectively. The two types of organic materials significantly increased the content of silicon and the accumulation of silicon in rice stems and leaves, and the application of rice bran had a more significant effect. Compared with CK, application of rice straw and rice bran increased the accumulation of silicon in stems and leaves by 0.60-2.51 times and 1.33-4.08 times, respectively. The two types of organic materials increased the accumulation of dry matter in the aboveground part of rice and the content of organic matter and available nitrogen, phosphorus, and potassium nutrients in soil to some degrees. It is indicated that both rice straw and rice bran can increase the fertility in soil, improve the silicon availability in soil, and promote the absorption of silicon by rice, among which the improvement of rice bran is greater, but rice straw is more suitable for application in practice.

**Keywords** rice; straw; rice bran; silicon morphology in soil; availability of silicon; absorption of silicon

(责任编辑:张志钰)