



苏恒,马献发,陈柏杨,等.稻壳可溶性硅肥对水稻抗倒伏能力及产量的影响[J].黑龙江农业科学,2024(7):12-17.

# 稻壳可溶性硅肥对水稻抗倒伏能力及产量的影响

苏 恒,马献发,陈柏杨,张和慕,解滢莹,毛一诺

(东北农业大学 资源与环境学院,黑龙江 哈尔滨 150030)

**摘要:**为探究硅肥高效利用,促进水稻增产及提高水稻抗倒伏能力,以稻壳为原料的可溶性硅肥为研究对象,选取五优稻4号为供试材料,通过对水稻不同时期及施用不同浓度稻壳可溶性硅肥探究其对水稻抗倒伏能力及产量的影响。试验设置5个施肥处理,大区试验不设重复,于分蘖期(7月13日)分别喷施可溶性硅肥 $1.5\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$ (A)、 $3.0\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$ (B),分蘖期和抽穗期(7月29日)两次喷施可溶性硅肥 $1.5\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$ (C)、 $3.0\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$ (D)及喷施清水组(CK)。结果表明,分蘖期和抽穗期两次喷施可溶性硅肥 $3.0\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$ (D)处理水稻产量及糙米率均最高,分别达到 $8\,389\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 及80.6%,其水稻倒数第二茎节长度为18.29 cm较对照(CK)倒数第二茎节长度24.58 cm缩短6.29 cm。分蘖期及抽穗期两次施用可溶性硅肥较分蘖期单次施用可溶性硅肥,对于水稻增产及抗倒伏能力均有更好的促进效果。说明稻壳可溶性硅肥对寒地水稻增产及提高抗倒伏性能力有显著效果。

**关键词:**可溶性硅肥;水稻;产量;抗倒伏

水稻是典型的喜硅作物,有“硅酸植物的代表”之称<sup>[1]</sup>。水稻在生长阶段和成熟阶段都需要硅<sup>[2]</sup>。随着农业科技的发展,硅元素已经被全球土壤学家们认为是第四种植物营养元素,许多发达国家已经把硅肥当作第四种肥料施用<sup>[3]</sup>。硅肥是一种以硅元素为主或含有硅元素的微碱性肥料,我国硅肥研发起步晚,产品产量少,市场巨大。硅肥是一种优秀的品质肥料、保健肥料和植物调节性肥料,是其他化学肥料无法比拟的一种新型多功能肥料,不仅为植物生长提供必不可少的养分,又可以作为土壤调理剂,改良土壤。硅肥能提供一种硅禾本科植物生长需要的硅元素,能有效促进植物光合作用<sup>[4]</sup>。硅能提高水稻根系的活力,提高水稻同化 $\text{CO}_2$ 的能力,减轻 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 等重金属的毒害,改善作物磷素营养,提高水稻抗倒伏与抗病害等能力。随着水稻先进栽培技术的推广应用和水稻施硅肥量的逐年提高,硅肥的作用日益突出,硅元素能够明显提高水稻产量、抵御环境胁迫,增强抗倒伏能力。但现有硅肥普遍存在可溶性低、利用率差等问题<sup>[5]</sup>。研究表明,水稻吸收的硅超过氮、磷、钾三要素的总需求量,每生产100 kg水稻籽粒需22 kg的硅,是氮、磷、钾三要素总量的4.4倍<sup>[1,6]</sup>。张阳等<sup>[7]</sup>田间试验

表明,叶面喷施硅肥的水稻植株颜色更绿、茎秆更粗壮且抗倒伏,分蘖数、穗数、每穗的实粒数、千粒重及产量均有提高。肖路飞等<sup>[8]</sup>研究表明,稻壳中含有约20%的二氧化硅等无机成分;稻壳在进行资源化利用时,稻壳灰是其主要的固态副产物。稻壳中积累了大量的硅,其灰分含量较高约为质量的20%,通过碱化灼烧可以将其中硅转化成可溶性能够被植物利用的形式。因此将稻壳中的硅作为肥料返回原始稻田,是一种可行性强、潜力大且生态环保的技术手段。

水稻受遗传特性、植株形态等内在因素,自然条件、耕作栽培条件和措施等外在因素影响,会导致不同程度的倒伏现象,从而降低产量、影响稻米品质<sup>[9]</sup>。据相关资料显示,由于部分水稻熟期晚、耐肥性差,育苗时播种量过大导致秧苗素质弱且不均,为了追求高产大量施用氮肥,田间管理措施不当,受秋季大风、强降雨天气等影响,极易倒伏<sup>[10]</sup>。因此,需通过施肥等田间管理,提高其抗倒伏能力改善稻米品质。黑龙江省五常市现种植面积最大的品种为五优稻4号,其香味特殊、品质优越,被市场广泛认可<sup>[10]</sup>。本研究选用五优稻4号作为供试品种,通过对寒地水稻不同时期及施用不同浓度稻壳可溶性硅肥探究其对水稻抗倒

收稿日期:2024-03-11

基金项目:黑龙江省大学生创新创业训练计划项目(S202310224150)。

第一作者:苏恒(2002—),女,本科生,专业方向为农业资源与环境。E-mail:1735665404@qq.com。

通信作者:马献发(1978—),男,博士,博导,教授,从事退化土壤改良与养分高效利用研究。E-mail:xianfa.ma@neau.edu.cn。

伏能力及产量的影响,旨在为促进硅肥高效利用及水稻增产、抗倒伏提供借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

水稻试验地设在黑龙江省五常市营城子乡靠河屯(45°10′37″N,126°52′35″E,海拔164 m)。试

验区域的主要气候为中温带大陆性季风气候,其特点是春季多风,夏季炎热,秋季干旱,冬季严寒。多年平均气温3.5℃,一年活动积温为2 948℃,日照时间是2 443 h,年平均降水量为606 mm,全年无霜期在160 d左右。该试验区作物的种植方式为一年一熟。试验地土壤的理化性质详见表1。

表1 试验地土壤基本理化性质

土壤类型	pH	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )
黑土	6.9	36.30	2.12	131.90	59.40	114.00	1.37

### 1.2 材料

本试验选用水稻品种五优稻4号。  
自制稻壳可溶性硅肥(哈尔滨工大华实环保科技有限公司)。其中,稻壳纳米硅主要成分为纳米二氧化硅(其中SiO<sub>2</sub>含量在95.64%~97.94%,浓度为120 g·L<sup>-1</sup>),粉状,其BET单点比表面积为86.516 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>,吸附平均孔径为6.118 nm,一次粒径30~50 nm,拥有天然三维纳米级孔洞,重金属含量达到食品添加剂标准,铅为0.3 mg·kg<sup>-1</sup>,重金属(以Pb计)<30 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.3 方法

1.3.1 试验设计 由表2可知,本研究设5个处理,大区试验不设重复,各处理面积1 000 m<sup>2</sup>。可溶性硅肥分别于分蘖期(7月13日)和抽穗期(7月29日)喷施。各处理常规施肥施用尿素(总氮质量分数≥46%)150 kg·hm<sup>-2</sup>,其中30%基施、40%拔节期追施、30%分蘖期追施;磷酸二铵(总氮质量分数≥18%,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>质量分数≥46%)60 kg·hm<sup>-2</sup>,全部基施;氯化钾(K<sub>2</sub>O质量分数≥60%)75 kg·hm<sup>-2</sup>,其中70%基施、30%分蘖期追施。

表2 不同硅肥处理具体施肥方式用量及时期

处理	施肥方式	硅肥种类	硅肥浓度/(L·hm <sup>-2</sup> )	施硅肥时期
A	常规施肥+硅肥	自制稻壳可溶性硅肥	1.5	分蘖期喷施
B	常规施肥+硅肥	自制稻壳可溶性硅肥	3.0	分蘖期喷施
C	常规施肥+硅肥	自制稻壳可溶性硅肥	1.5	分蘖期和抽穗期分两次喷施
D	常规施肥+硅肥	自制稻壳可溶性硅肥	3.0	分蘖期和抽穗期分两次喷施
CK	常规施肥+硅肥	清水		

1.3.2 测定项目及方法 产量及构成因素测定:在水稻成熟期测定产量、穗数、穗粒数和千粒重。

茎节长度测量:每个处理中随机选取样本,截取水稻倒数第二茎节,测量茎节长度取平均值。

糙米率测定:成熟期,稻谷试样完全脱壳后,称量并计算糙米率(糙米质量占原始试样质量的百分率)。

1.3.3 数据分析 利用Excel 2007进行试验数据统计分析和作图,利用SPSS 20进行方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 可溶性硅肥对水稻产量的影响

由图1可知,4个硅肥处理较CK对照组产量均有明显提高,CK、A、B、C、D处理水稻产量分

别为4 131,6 209,6 540,7 717和8 389 kg·hm<sup>-2</sup>,说明可溶性硅肥对水稻增产有明显促进效果,并且不同时期喷施可溶性硅肥、不同可溶性硅肥喷施量均可显著影响水稻产量。

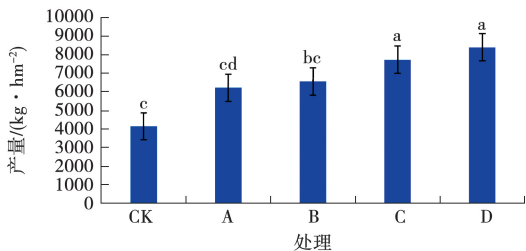


图1 不同可溶性硅肥处理对水稻产量的影响

注:不同小写字母表示处理间在P<0.05水平差异显著。下同。

通过对比发现,B处理较A处理、D处理较C处理产量均有一定提高,说明同时期施硅肥浓度越高增产效果越明显,但差异不显著。其中D处理两次喷施自制可溶性硅肥 $3.0\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的产量最高,达到 $8\,389\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,较CK显著提高 $103.07\%$ 。分蘖期和抽穗期两次喷施可溶性硅肥的C处理、D处理,产量仅比分蘖期喷施的A处理和B处理可溶性硅肥显著提高。

2.2 可溶性硅肥对水稻产量构成因子的影响

2.2.1 穗数 由表3可知,在水稻分蘖期和抽穗期两次喷施可溶性硅肥的C处理和D处理可以提高水稻穗数,但未达到显著水平,A处理和B处理并未达到提高水稻穗数的效果。D处理水稻穗数最多,且显著高于A处理、B处理,较CK提高 $19\%$ ,但差异不显著。C处理对比除D处理外的其余处理水稻穗数有所增加,但只显著高于A处理,与其余处理差异不显著。分蘖期喷施自制可溶性硅肥 $3.0\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的B处理,水稻穗数最少。

表3 不同可溶性硅肥处理对水稻产量构成因子的影响

处理	穗数	穗粒数	千粒重/g
CK	289 abc	62 a	23.24 a
A	241 ab	109 c	23.56 a
B	177 a	92 b	25.82 a
C	310 bc	102 bc	24.27 a
D	344 c	99 bc	24.72 a

注:不同小写字母表示处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。

2.2.2 穗粒数 硅肥处理较CK对照组水稻穗粒数均有显著提高,即分蘖期和抽穗期喷施可溶性硅肥可显著提高水稻穗粒数。其中A处理水稻穗粒数最多,较CK对照提高 $75.8\%$ ,且达到显著水平。对比C处理与A处理、D处理与B处理,分蘖期单次施用可溶性硅肥与分蘖期和抽穗期两次施用同浓度可溶性硅肥的施用效果相差不大。同时对比A处理与B处理、C处理与D处理,可以看出 $1.5\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的可溶性硅肥喷施量对水稻穗粒数的增加效果更加明显(表3)。

2.2.3 千粒重 不同硅肥处理使水稻千粒重较CK均有增加,但影响均不显著。喷施可溶性硅肥 $3.0\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的B处理和D处理较喷施可溶性

硅肥 $1.5\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的A处理和C处理有一定提高,但差异不显著。其中B处理水稻千粒重最高,达 $25.82\text{ g}$ ,较CK对照提高 $11.10\%$ 但未达到显著水平(表3)。

2.3 可溶性硅肥对水稻倒数第二茎节长度的影响

由图2可知,各处理水稻倒数第二茎节长度较CK均有下降,CK、A、B、C、D处理水稻倒数第二茎节长度分别为 $24.58,22.36,21.54,19.28$ 和 $18.29\text{ cm}$ ,除A处理长度虽然降低但与CK差异不显著以外,其他各处理显著低于CK。C、D处理较A、B处理,分别显著降低了倒数第二茎节长度,说明两次施用对降低水稻倒数第二茎节长度效果更显著。其中D处理两次喷施自制可溶性硅肥 $3.0\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时水稻倒数第二茎节长度最短,为 $18.29\text{ cm}$ ,较CK对照显著降低 $25.59\%$ 。由此表明,硅元素的添加可以通过缩短水稻基部的长度来降低水稻的重心,达到抗倒伏的目的。

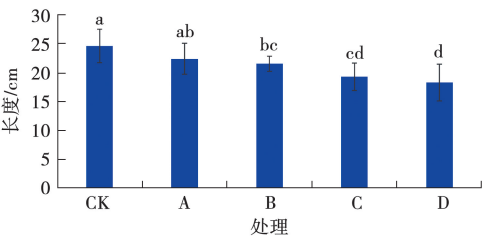


图2 不同可溶性硅肥处理对水稻倒数第二茎节长度的影响

2.4 可溶性硅肥对水稻糙米率的影响

由图3可知,不同硅肥处理水稻糙米率较CK均有提高,即分蘖期单次或分蘖期和抽穗期两次喷施可溶性硅肥 $1.5$ 和 $3.0\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$ 均可提高水稻糙米率。C处理高于A处理,且D处理显著高于B处理,说明分蘖期及抽穗期两次施用可溶性硅肥较分蘖期单次施用可溶性硅肥对提高水稻糙米率效果更显著。其中D处理两次喷施自制可溶性硅肥 $3.0\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时水稻糙米率最高达到 $80.6\%$ ,显著高于其他处理,并且较CK对照提高 $9.1\%$ 。C处理两次喷施自制可溶性硅肥 $1.5\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时水稻糙米率为 $77.4\%$ ,较CK显著提高 $4.7\%$ 。

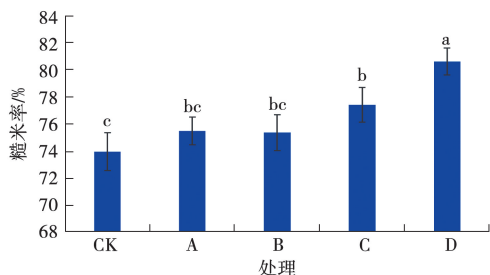


图3 不同可溶性硅肥处理对水稻糙米率的影响

## 3 讨论

### 3.1 硅肥对水稻产量的影响

硅肥的施用量对水稻产量有着显著影响。任学坤等<sup>[11]</sup>研究表明,硅肥可以增加水稻的产量及其构成,如穗数、穗粒数、千粒重、结实率。马波<sup>[12]</sup>研究指出施用硅肥能显著增加糙米率、每穗粒数、千粒重,但不能增加有效穗数。魏晓东等<sup>[13]</sup>研究结果显示,施用硅肥有使稻米糙米率和精米率下降的趋势。姜灏<sup>[14]</sup>的研究显示喷施液体硅肥处理的水稻精米率、整精米率、正常粒率较常规对照有明显提高,说明液体硅肥有改善水稻碾磨品质及外观品质的作用。蒋亚等<sup>[15]</sup>研究表明增施硅肥能够增加土壤有机质含量、全氮含量和阳离子交换量,水稻茎叶和籽粒中全氮、全磷、全钾含量随硅肥施用量的增加而增加;增施硅肥可提高水稻穗数和穗粒数从而促进水稻增产。杨国英等<sup>[16]</sup>研究表明,施用硅肥可促进水稻生长,提高水稻养分的积累量和吸收利用率,提高单位面积有效穗数、每穗粒数、结实率和产量。本研究表明,稻壳可溶性硅肥能够使水稻穗粒数显著增加,千粒重增大,糙米率提高,而对有效穗数的影响不显著,说明可溶性硅肥主要通过提高有效穗粒数来实现水稻产量的增加。因此施用硅肥对水稻产量构成因素的改善及水稻增产至关重要。同时在实际生产中,硅肥的应用要结合土壤有效硅含量以及作物吸收硅元素效率,来制定合适的硅肥施用量及施肥技术以达到增加产量的效果。

### 3.2 硅肥对水稻茎秆抗倒伏特性的影响

水稻的茎秆长度与其抗倒伏能力密切相关。王艳红等<sup>[17]</sup>研究认为水稻喷施叶面硅肥能够促进茎秆增粗,增强茎秆强度,提高抗倒伏能力,田间抗病能力也有所增强,对水稻高产起到了至

关重要的作用。郑路等<sup>[18]</sup>研究表明,大田倒伏水稻样品的成熟期茎叶中硅含量仅 6.76%,低于施硅处理样品而与未施硅的对照样品相当,缺硅会使水稻容易倒伏。孙羽等<sup>[19]</sup>研究认为,要根据一定比例施肥来保证均衡施肥,增加硅肥能提高植株的抗倒性,防止水稻倒伏。于广武等<sup>[20]</sup>研究认为硅素能够增强植株基部的秸秆强度,提高水稻内部的通气性和水稻导管的刚性,防止根系早衰与腐烂,使根系发达进而增强水稻的抗倒伏能力。水稻倒伏发生在茎秆强度不足以支撑外界环境(大风、暴雨等)对植株压力的情况下,因此增强茎秆的机械强度是提高水稻抗倒伏能力的重要途径<sup>[21]</sup>。本研究表明,施用可溶性硅肥后,各处理水稻倒数第二茎节长度较对照都有降低,并且随着硅肥施用量和施用次数的增加,降低趋势更加明显。由此可见稻壳可溶性硅肥对寒地水稻植株形态的影响较大,对于解决寒地水稻易倒伏问题及抵抗恶劣环境有重要作用。

### 3.3 不同时期施用硅肥的产量效应

水稻对于硅元素的吸收,随着其生育进程推进呈现出不同的吸收特点<sup>[22]</sup>。水稻对硅的吸收能力在不同生育时期差异较大,水稻在分蘖-抽穗期对硅的吸收能力最强,约为硅总吸收量的 65.3%~66.5%,在移栽-分蘖期对硅的吸收能力最弱,约为 9.1%~9.6%,成熟期吸收能力在两者之间,约为 23.8%~25.6%<sup>[5]</sup>。宋合林等<sup>[23]</sup>研究表明,在不同的生育期施硅肥,对水稻的生长和产量都有很好的促进作用,尤其是在拔节前施硅肥的效果最为显著。龚金龙等<sup>[24]</sup>研究表明,施用硅肥具有显著的增产效果,较对照增产 4.59%~19.54%,随着硅肥施用时期的推迟,产量呈先增后减趋势。金正勋等<sup>[25]</sup>研究表明,在寒地水稻栽培上分蘖期至幼穗分化始期适量施用可溶性硅肥是提高水稻单产及抗倒性的重要栽培措施。吴如华<sup>[26]</sup>研究表明,在一定范围内,随着硅肥施用量的增加,水稻的产量也得到相应的提高,同时随着硅肥施用期的延迟,水稻增产效果有较好的上升趋势,且单次使用的效果没有多次使用的效果明显。吴倩<sup>[27]</sup>研究表明,水稻孕穗期施用硅肥可以达到增产效果,同时能够促进稻穗的生长,提高水稻穗粒数。杨卫健等<sup>[28]</sup>根据其研究结果建议在水稻中后期



喷施 1~2 次硅肥,对提高水稻产量有积极意义。本研究发现,分蘖期及抽穗期两次施用可溶性硅肥较分蘖期单次施用可溶性硅肥对水稻产量、穗数、糙米率均有显著提高作用,对水稻倒数第二节茎节长度也有显著改善,而对于水稻穗粒数及千粒重的影响未达到显著水平,可见分蘖期和抽穗期施用硅肥对水稻产量有积极的促进作用。

### 3.4 自制稻壳可溶性硅肥应用于提升水稻产量和抗倒伏能力的可行性探讨

本研究自制的可溶性硅肥来源于植物,可溶于水能够被农作物直接吸收,肥料利用率较高,因此试验中可不考虑人工回收硅肥的问题<sup>[29]</sup>。目前,国内硅肥生产工艺主要有两种:一是,人工合成的水溶性硅肥,以泡花碱等为原料经过结晶造粒或喷雾干燥等方法制成,如硅酸钠、硅酸钾、过二硅酸钠、偏硅酸钠和主要成分为硅酸钠及偏硅酸钠的高效硅肥等,这种硅肥有效硅含量高,总硅含量在 50% 左右;二是,利用炼铁厂、发电厂、磷酸厂等厂家生产加工过程中产生的固体废料加入一定量的添加剂,利用机械磨细加工而成的硅肥。第一类人工合成的硅肥生产过程中会耗费大量石英矿石,资源消耗量较大,成本较高。第二类利用固体废料添加助剂磨细加工而成的硅肥的生产工艺基本是采用“自然风干炉渣-球磨-过筛-干燥”的流程,该方法生产的硅肥有效硅含量低,重金属含量难以控制,效益低<sup>[4]</sup>。国内稻壳产量逐年增加,对其加以回收利用不仅能提高资源利用价值,也能有效降低稻壳丢弃造成的环境污染,是有助于实现经济可持续发展、绿色发展理念的重要实践<sup>[29-30]</sup>。

研究表明,水稻抗倒伏能力与基部第一、第二伸长节间长度呈显著负相关<sup>[31-32]</sup>。对于水稻的茎秆来说,抗倒性与基部第一、第二节有紧密的关系。茎秆的伸长节长度越小,水稻越不容易倒伏,尤其是基部伸长节第一、第二节的长度变化,会影响到整个植株的抗倒伏能力,所以伸长节要控制在一定的生长范围内。同时,也有研究表明茎秆粗度越大,抗倒伏能力并不会会有明显的提高<sup>[32]</sup>。因此在抗倒伏育种中,要注重缩短基部倒数第一、第二节间长度。本研究对自制稻壳可溶性硅肥对水稻抗倒伏能力进行了初步研究,后续研究中应该考虑节间强度、株高、重心高度、茎粗以及茎壁

厚度等相关倒伏指标,同时还需要针对不同品种以及不同区域的水稻特点、抗性以及其他指标进行研究分析。

## 4 结论

研究表明,施用可溶性硅肥对水稻具有显著的增产效果,分蘖期和抽穗期两次喷施可溶性硅肥  $3.0 \text{ L} \cdot \text{hm}^{-2}$  (处理 D) 较 CK 产量提高 103.07%,随硅肥施用量的增加,水稻产量、穗数、千粒重及糙米率都有相应比例的增加。施用可溶性硅肥可以缩短水稻基部的长度,各处理水稻倒数第二茎节长度较对照有所降低,说明对于增强水稻抗倒伏能力有良好效果。分蘖期及抽穗期两次施用可溶性硅肥较分蘖期单次施用可溶性硅肥,对于水稻产量及抗倒伏能力具有更好的促进效果。

### 参考文献:

- [1] 龚金龙,张洪程,龙厚元,等. 水稻中硅的营养功能及生理机制的研究进展[J]. 植物生理学报, 2012, 48(1): 1-10.
- [2] 王思哲,温圣贤,邓文,等. 硅肥在水稻上的应用研究进展[J]. 作物研究, 2007, 21(S1): 620-624.
- [3] 邹文思. 硅肥研究进展和我国硅肥需求及生产现状[J]. 农业与技术, 2023, 43(15): 97-100.
- [4] 王敬伟,纪发达. 硅肥制备工艺及发展现状[J]. 中国高新技术, 2021(18): 109-110.
- [5] 朱小平,王义炳,李家全. 水稻硅素营养特性的研究[J]. 土壤通报, 1995, 26(5): 232-233.
- [6] 宋福如,宋利强,曹子库,等. 有机硅土壤调理剂对苏打型盐碱土的改良效果及对水稻产量的影响[J]. 农学报, 2021, 11(12): 58-63, 79.
- [7] 张阳,赵瑞,刘士广,等. 叶面喷施硅肥对水稻农艺性状和抗性的影响[J]. 激光生物学报, 2021, 30(3): 270-275.
- [8] 肖陆飞,金本能,梁建军,等. 稻壳灰应用研究进展[J]. 化学世界, 2020, 61(7): 457-464.
- [9] 高洪儒,周文胜,张君,等. 五常香稻品种倒伏原因及对策[J]. 福建稻麦科技, 2014, 32(2): 84-85.
- [10] 高洪儒. 混合种植对五优稻 4 号抗倒及品质的影响[J]. 北方水稻, 2015, 45(4): 40-42.
- [11] 任学坤,殷微微,徐文平,等. 白浆土施硅肥与水稻产量构成因素及品质的关系研究[J]. 吉林农业科学, 2011, 36(5): 26-28.
- [12] 马波. 硅对寒地香型梗稻齐穗期光合特性及产量的影响[J]. 中国种业, 2017(3): 40-42.
- [13] 魏晓东,宋雪梅,赵凌,等. 硅锌肥及其施用方式对南粳 46 产量和稻米品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2023, 37(3): 295-306.

[14] 姜灏. 液体硅肥在水稻上对比试验研究[J]. 现代化农业, 2021(11):15-17.

[15] 蒋亚,蔡景行,吴道明,等. 硅肥对土壤理化性质及水稻产量与养分含量的影响[J]. 贵州农业科学,2023,51(7):50-55.

[16] 杨国英,郭智,盛婧,等. 不同生育时期施用硅肥对优质食味梗稻产量和品质的影响[J]. 中国稻米,2021,27(1):68-74,79.

[17] 王艳红,邓国季,戴鹏,等. 喷施叶面硅肥对 Y 两优 143 产量的影响[J]. 杂交水稻,2017,32(4):51-53.

[18] 郑路,朱世友,姚成月,等. 普济圩农场水稻倒伏原因及硅氮效应研究[J]. 安徽农学通报,2000,6(1):28-30.

[19] 孙羽,曾宪楠,王麒,等. 水稻倒伏影响因素及解决策略研究进展[J]. 黑龙江农业科学,2023(9):132-137.

[20] 于广武,李晓冰,何长兴,等. 硅肥对水稻生育性状及产量的影响[J]. 肥料与健康,2020,47(3):19-23.

[21] 曾仁杰. 硅肥对水稻产量、品质及抗倒伏特性的影响[J]. 中国农学通报,2021,37(22):1-4.

[22] 张万洋,李小坤. 水稻硅营养及硅肥高效施用技术研究进展[J]. 中国土壤与肥料,2020(4):231-239.

[23] 宋合林,刘兵,崔占文,等. 不同生育时期施用硅肥对水稻产量的影响[J]. 现代化农业,2009(9):18.

[24] 龚金龙,胡雅杰,龙厚元,等. 不同时期施硅对超级稻产量和硅素吸收、利用效率的影响[J]. 中国农业科学,2012,45(8):1475-1488.

[25] 金正勋,LUGO O,朱方旭,等. 硅肥施用量及时期对寒地水稻产量和品质性状及抗倒性的影响[J]. 黑龙江农业科学,2015(10):49-54.

[26] 吴如华. 水稻硅肥的应用效果[J]. 江西农业,2020(2):13,15.

[27] 吴倩. 不同阶段水稻施用硅肥对其生理特性及经济效益的影响[J]. 基层农技推广,2022,10(2):65-67.

[28] 杨卫建,梁秀梅,罗品忠,等. 水稻中后期不同硅肥施用比较试验分析[J]. 北方水稻,2022,52(5):26-27,37.

[29] 刘平稳,林涛,李温静,等. 浅谈稻壳的资源化利用与处理方法[J]. 现代食品,2021(18):74-77.

[30] 邱菁华,薛铸,孙书洪,等. 间歇灌溉下不同生育时期喷施水溶性硅肥对水稻产量及品质的影响[J]. 东北农业大学学报,2022,53(9):50-57.

[31] KASHIWAGI T, ISHIMARU K. Identification and functional analysis of a locus for improvement of lodging resistance in rice[J]. Plant Physiology, 2004, 134(2): 676-683.

[32] 覃耀平. 水稻茎秆性状与抗倒性的关系及配合力分析[J]. 乡村科技,2017(5):49-50.

# Effects of Rice Husk Soluble Silicon Fertilizer on Lodging Resistance and Yield of Rice

SU Heng, MA Xianfa, CHEN Baiyang, ZHANG Hemu, XIE Yingxuan, MAO Yinuo  
(Resource and Environment College, Northeast Agricultural University, Harbin 150030,China)

**Abstract:** Silicon fertilizer is the fourth large amount of elemental fertilizer for rice yield increase, and silicon significantly improves rice yield increase, resists environmental stress, and enhances the ability to resist collapse. However, the existing silicon fertilizer generally has low solubility and poor utilization. In order to explore how to efficiently utilize silicon fertilizer to achieve rice yield increase and improve the resistance to collapse. In this experiment, the soluble silicon fertilizer made from rice husk was used as the research object, and the rice Wuyoudao 4 was selected as the test crop variety to investigate the effect of rice husk soluble silicon fertilizer of different fertilization periods and diferent concentration on the lodging resistance and yield of rice. Five fertilization treatments were set up in the experiment, with no replications in the large-area experiment. 1.5 L·ha<sup>-1</sup> (A) and 3.0 L·ha<sup>-1</sup> (B) of soluble silicon fertilizer were sprayed at the tillering stage (July 13), and 1.5 L·ha<sup>-1</sup> (C) and 3.0 L·ha<sup>-1</sup> (D) of soluble silicon fertilizer were sprayed at the tillering stage and the tasseling stage (July 29), as well as the group of spraying clear water (CK). The highest yield and brown rice rate of 8 389 kg·ha<sup>-1</sup> and 80.6% were obtained with 3.0 L·ha<sup>-1</sup> (D) sprayed at both tillering and tasseling stages, and the length of penultimate node of rice was 18.29 cm, which was 6.29 cm shorter than that of the control (CK) with penultimate node length of 24.58 cm. The results showed that the application of soluble silica fertilizer in both tillering and tasseling stage was more efficient than that of the control group. The application of soluble silicon fertilizer at the tillering and tasseling stages was more effective than that at the control (CK). The results of this study showed that soluble silica fertilizer with rice husk had a significant effect on increasing yield and improving the lodging resistance of rice in cold region.

**Keywords:** soluble silicon fertilizer; rice; yield; lodging resistance