

施硅对稻纵卷叶螟幼虫结苞危害的抑制作用及对水稻产量影响*

程益宇** 钟玉琪 赵 兰 侯茂林***

(中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害综合治理全国重点实验室, 北京 100193)

摘 要 【目的】探究田间施硅对稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* 幼虫结苞危害的控制作用及其对水稻产量的影响。【方法】设置品种和施硅水平双因素田间小区试验, 品种为易感虫的台中 1 号 (Taichung Native 1, TN1) 和抗虫的中浙优 8 号 (Zhongzheyu 8, ZY8), 施硅水平为 0、150、300 和 600 kg SiO₂/hm², 测定稻纵卷叶螟幼虫在水稻分蘖期和孕穗期的结苞为害特征、孕穗期剑叶性状以及水稻产量相关指标。

【结果】水稻成熟后土壤硅含量在品种间没有显著差异 ($P=0.910$), 但与不施硅对照相比, 300 和 600 kg SiO₂/hm² 水平下土壤硅含量分别显著增加 133.4% 和 182.4% (TN1, $P\leq 0.030$), 以及 154.9% 和 303.8% (ZY8, $P\leq 0.005$)。分蘖期水稻上稻纵卷叶螟叶苞的叶位和叶面分布特征在施硅水平之间有显著差异 ($P<0.001$), 施硅显著增大叶片正面结苞的频率 ($P<0.001$) 和叶苞丝束数量 ($P=0.020$), 分蘖期中浙优 8 号水稻上稻纵卷叶螟在叶片正面结苞的频率高于台中 1 号; 不同施硅水平和品种下叶苞中的稻纵卷叶螟取食率和蛹重没有显著差异 ($P\geq 0.120$)。孕穗期水稻上稻纵卷叶螟叶苞特征没有差异, 但 600 kg SiO₂/hm² 水平硅处理显著降低幼虫取食率 ($P<0.001$)、增加叶苞中丝束数量 ($P=0.002$); 剑叶理化性状受施硅影响, 施硅显著降低剑叶的比叶面积、增加叶绿素相对含量和硅含量 ($P\leq 0.002$)。此外, 产量性状也与施硅有关, 施硅显著增加中浙优 8 号的每穗总粒数、结实率和理论产量 ($P\leq 0.016$)。不同施硅水平下, 150 kg SiO₂/hm² 的理论收益最大。【结论】施硅能够改善水稻叶片的理化性质, 增强叶片的韧性和光合作用, 增强水稻对稻纵卷叶螟幼虫结苞为害的抵抗性和耐受性, 并增加水稻理论产量, 推荐田间施硅 150 kg SiO₂/hm² 以获取较高收益。

关键词 稻纵卷叶螟; 硅; 结苞危害特征; 剑叶理化性状; 水稻产量指标

Effect of silicon on leaf-folding damage caused by *Cnaphalocrocis medinalis* larvae, and on rice yield

CHENG Yi-Yu** ZHONG Yu-Qi ZHAO Lan HOU Mao-Lin***

(State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection,
Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract [Aim] To explore the effects of applying silicon to rice plants on the leaf folding damage caused by *Cnaphalocrocis medinalis* larvae, and on rice yield. [Methods] A 2×2 factorial plot experiment was conducted using the rice varieties Taichung Native 1 (TN1) and Zhongzheyu 8 (ZY8) and silicon application levels of 0, 150, 300, and 600 kg SiO₂/hm². The leaf folding and other damage caused by *C. medinalis* larvae during the tillering and booting stages, flag leaf traits at the booting stage, and rice-yield related parameters, were measured. [Results] No significant differences in soil silicon content was observed between the rice varieties ($P=0.910$). However, application of 300 and 600 kg SiO₂/hm² significantly increased soil silicon content by 133.4% and 182.4% ($P\leq 0.030$), respectively in TN1 plots, and by 154.9% and 303.8% ($P\leq 0.005$), respectively, in ZY8 plots, relative to the control. At the tillering stage, significant differences were observed in the leaf position and leaf surface of the leaf-folds between different silicon treatment groups ($P<0.001$), with

*资助项目 Supported project: 国家重点研发计划项目 (2023YFD1400800)

**第一作者 First author, E-mail: 82101225307@caas.cn

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: mlhou@ippcaas.cn

收稿日期 Received: 2025-02-13; 接受日期 Accepted: 2025-03-13

silicon application notably increasing the frequency of leaf folding on the adaxial leaf surface ($P < 0.001$) and the number of binds per fold ($P = 0.020$). More leaf folding was found on the adaxial leaf surface of ZY8 than TN1 plants. However, neither silicon treatment nor rice variety significantly affected the feeding rate or pupal weight of *C. medinalis* ($P \geq 0.120$). At the booting stage, no significant differences were found in leaf-folding characteristics, but the highest silicon treatment level ($600 \text{ kg SiO}_2/\text{hm}^2$) significantly reduced larval feeding rates ($P < 0.001$) and increased the number of binds per fold ($P = 0.002$). Silicon application influenced the physicochemical traits of flag leaves during the booting stage, significantly reducing specific leaf area whereas increasing chlorophyll and silicon content ($P \leq 0.002$). Yield traits were positively correlated with silicon application; silicon application significantly enhanced the number of grains per panicle, the grain-filling percentage, and the theoretical yield of ZY8 ($P \leq 0.016$). Theoretical revenue was highest at application rates of $150 \text{ kg SiO}_2/\text{hm}^2$. **[Conclusion]** Silicon improves the physicochemical properties of rice leaves, enhancing leaf toughness and photosynthesis. It strengthens rice resistance and tolerance to leaf folding and other damage caused by *C. medinalis* larvae and increases the theoretical rice yield. A theoretical revenue analysis suggests that $150 \text{ kg SiO}_2/\text{hm}^2$ is the optimum dosage.

Key words *Cnaphalocrocis medinalis*; silicon; folding damage characteristics; physicochemical traits of flag leaf; rice yield indicator

水稻 *Oryza sativa* 在全球粮食安全中扮演着至关重要的角色,然而水稻安全生产受到二化螟 *Chilo suppressalis*、稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis*、白背飞虱 *Sogatella furcifera* 与褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 等害虫的威胁 (Senthil-Nathan, 2021)。稻纵卷叶螟是水稻上一种重要的迁飞性害虫,在我国各大稻区均有分布 (张孝羲等, 1981)。稻纵卷叶螟幼虫在水稻叶片上找到合适的位置后,通过摆头吐丝形成丝束,用丝束固定水稻叶片的相对边缘,形成由多个丝束组成的纵向叶苞 (Punithavalli *et al.*, 2013)。幼虫在叶苞内刮食绿色叶肉组织,从而降低叶片光合作用效率,严重时导致稻谷产量下降高达 30% (Padmavathi *et al.*, 2013)。除了直接危害以外,稻纵卷叶螟为害后的植株容易受到细菌和真菌感染 (Bashir *et al.*, 2004)。

自 2000 年以来稻纵卷叶螟发生日益严重,受气候条件和虫口基数的影响,稻纵卷叶螟在 2007 和 2008 年于南方稻区连续大发生,全国发生面积分别高达 $2\,530 \text{ 万 hm}^2$ 和 $2\,466 \text{ 万 hm}^2$ (刘宇等, 2008)。尽管化学农药对稻纵卷叶螟防控发挥了积极作用,但其长期使用带来的弊端也日益凸显 (Sun *et al.*, 2023)。因此,农业生产上需要绿色健康的害虫防护措施,其中寄主抗性是经济有效的防控措施之一 (Milligan *et al.*, 2003)。在缺乏品种自然遗传抗性的情况下,可以通过外部因素增强或诱导抗性,比如施用硅肥

(Hou and Han, 2010; Han *et al.*, 2015, 2016)。

硅 (Si) 是第二丰富元素,在地壳、水和空气中广泛存在。大多数植物组织中都含有一定量的硅 (干重的 0.1%-10%),植物主要以单硅酸分子的形式从根部吸收硅,并转运到地上部 (Ma and Yamaji, 2006)。水稻素有“硅酸植物”之称,每生产 $1\,000 \text{ kg}$ 稻谷大约要从土壤中吸收 SiO_2 130 kg ,其数量为吸收氮、磷、钾养分总和的 2 倍左右 (蔡德龙等, 2002)。硅肥已被证实对水稻生长具有促进作用 (González *et al.*, 2015; Meharg and Meharg, 2015),可促进植株营养吸收和光合作用,提高稻谷结实率和千粒重,同时增强抗倒伏能力 (Ma and Yamaji, 2006)。在室内试验中,施硅降低稻纵卷叶螟幼虫的取食选择性和成虫的产卵选择性,并诱导水稻增加次生代谢物的合成和积累 (Han *et al.*, 2015, 2016)。

兴安地处“湘桂走廊”,是稻纵卷叶螟迁飞的必经之地。每年 5-6 月份,稻纵卷叶螟从中南半岛迁入广西,并在早中稻上为害较重 (刘欢等, 2019)。本试验针对稻纵卷叶螟为害较重的台中 1 号和为害较轻的中浙优 8 号两个水稻品种,在田间设置不同硅肥水平,测定分蘖期和孕穗期水稻上稻纵卷叶螟幼虫的结苞取食特征、孕穗期剑叶性状以及水稻产量指标。旨在明确施硅水稻对稻纵卷叶螟幼虫结苞取食行为的影响,以及结合水稻经济效益推荐最佳施硅用量。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验在位于广西壮族自治区桂林市兴安县湘漓镇麦源村的农业农村部桂林作物有害生物科学观测实验站(25°36'00" N, 110°41'24" E)开展。稻田土壤为沙质样土(pH=5.7), 有机碳=2.19%、总氮=1.58 g/kg、可获得性磷=3.22 mg/kg、可获得性二氧化硅=53.48 mg/kg、可获得性钾=98.16 mg/kg。

1.2 试验方法

试验涉及水稻品种和施硅 2 个因素; 水稻品种为台中 1 号(TN1)、中浙优 8 号(ZY8); 施硅设置 4 个水平, 分别为 0(不施硅对照, CK)、150(低硅处理, LSi)、300(中硅处理, MSi)和 600 kg SiO₂/hm²(高硅处理, HSi)。硅肥为硅钙镁肥(山西富邦肥业有限公司, SiO₂≥25.0%, CaO≥27.0%, MgO≥5.0%), 作基肥使用。试验采用裂区设计, 主区是硅处理, 副区是水稻品种。共计 8 种处理, 每处理 3 次重复, 共 24 个小区。为减少下雨、农事操作等对小区之间硅处理的影响, 主区间挖水沟(沟+埂 100 cm 宽), 副区间筑田埂(30 cm 宽), 使用塑料薄膜包裹, 小区单排单灌。小区面积 36 m²(8 m×4.5 m)。种子经过晒种、选种、浸种处理后, 于 2024 年 5 月 10 日直播, 播种密度约为 80 粒/m²。灌浆结实期间歇灌溉、干湿交替, 收割前 7 d 断水搁田。按常规耕作措施进行小区肥水管理, 水稻生育期间不使用任何化学杀虫剂和杀菌剂。

1.3 稻纵卷叶螟幼虫结苞为害特征

在水稻的分蘖期(播后 45 d)、孕穗期(播后 85 d), 收集田间的叶苞, 对叶苞的各种属性进行观察、测量和计数。每个小区随机取样有叶苞的 10 丛水稻。记录叶苞的叶位分布(倒一叶、倒二叶、倒三叶等)、结苞类型(纵向结苞或叶尖弯曲折叠)和叶面分布(朝向正面结苞或朝向背面结苞)。用卡尺(1.0 mm)测量叶片和叶苞长度, 记录叶苞离叶片基部的距离, 计算取食率

(叶苞长度/叶片长度×100%), 统计每个叶苞上丝束的数量, 并打开叶苞, 将存活的蛹带回室内, 称量蛹重。

1.4 水稻剑叶理化性状

施硅可能通过影响稻叶的理化性状而改变稻纵卷叶螟幼虫的吐丝结苞行为, 本研究采集水稻剑叶测定叶片理化性状。因品种之间存在生育期差异, 分别于水稻播种后 75 和 95 d 在每小区随机剪取未受病虫危害的 TN1 和 ZY8 的完整剑叶。

使用手持便携式叶绿素测量仪(SPAD-502Plus, Konica Minolta, 日本)测定各处理水稻剑叶中部的叶绿素相对含量, 避开叶脉。每个小区测定 20 片剑叶。

比叶面积(Specific leaf area, SLA)和叶片含水率(Leaf water content, LWC)被认为是叶片韧性的衡量指标。为测量叶片表面积, 剪取上述完整剑叶基部 2 cm 以外的叶片, 扫描后使用 ImageJ(版本 2.0.0)(Rueden and Eliceiri, 2019)计算叶片表面积。用万分之一精度电子天平[AL204-IC; 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司]称量新鲜取样叶片获得鲜重, 然后用电热鼓风干燥箱(GZX-9140MBE, 上海博讯医疗生物仪器股份有限公司)在 40 °C 下干燥 24 h 后称量干重。SLA(mm²/mg)=叶片表面积/叶片干重, LWC=(鲜重-干重)/鲜重×100%。每小区测定 5-10 片剑叶。

为测量叶片硅、总氮和可溶性糖的含量, 将取样的新鲜叶片置于电热鼓风干燥箱中在 110 °C 下杀青 15 min, 后在 80 °C 下烘干至恒重。测定硅含量时, 将烘干后的叶片用食物粉碎机粉碎, 过 60 目筛的粉末, 按照戴伟民等(2005)的方法测定。叶片总氮含量和可溶性糖含量分别采用凯氏定氮法和蒽酮比色法测定(王学奎, 2006), 根据总氮含量和可溶性糖含量计算叶片碳氮比(C:N)。每小区测定 5-10 片剑叶。

1.5 水稻产量指标及经济效益

水稻产量指标参考 Kumar 等(2021)的方法测定。在中浙优 8 号完熟期, 每个小区随机选

取 3 个点 (每点 1 m^2), 计数有效穗数, 折算为有效穗数/ hm^2 。每个小区随机剪取 20 个稻穗装入自封袋中, 在室内测定每穗总粒数、实粒数、结实率和千粒重, 计算理论产量 (kg/hm^2) = 每公顷有效穗数 $\times$ 每穗总粒数 $\times$ 结实率 $\times$ 千粒重 $\times 10^{-6} \times 0.85$ (0.85 为理论产量系数)。

为比较施硅处理的经济效益, 理论产量采用农户常用品种中浙优 8 号, 稻谷价格 2.7 元/kg。试验中硅肥成本 3 500 元/吨, $\text{SiO}_2 \geq 25\%$, 计算得到 SiO_2 单价 14 元/kg。默认各处理间其余生产成本一致。理论收益 (元/ hm^2) = 理论产量 $\times$ 稻谷单价 - 施硅水平 $\times$ 硅肥单价。

1.6 土壤硅含量

为明确硅处理后土壤中的硅含量变化, 在水稻收割后采集不同施硅处理土壤。小区内土壤随机取样, 用铲子铲去表层杂质, 取 500 g 土壤样品。样品在电热鼓风干燥箱 (GZX-9140MBE, 上海博讯医疗生物仪器股份有限公司) $105\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干至恒重, 粉碎后过 80 目筛备用, 采用醋酸缓冲液浸提法测定土壤硅含量 (全国农业技术推

广服务中心, 2006)。

1.7 数据分析

数据使用 Excel 2020 汇总整理, 利用 DPS 19.05 软件进行数据分析。田间试验中, 孕穗期的台中 1 号稻株受前期病虫害为害严重导致发育不正常, 叶片整体呈现发黄状态; 中浙优 8 号的中硅处理稻株普遍受到胡麻叶斑病侵染。因此, 水稻品种和施硅对分蘖期稻株上的结苞取食行为和收割后土壤硅含量的影响采用双因素方差分析; 采用单因素方差分析方法分析施硅对孕穗期水稻上结苞取食行为、剑叶理化性状和水稻产量指标的影响; 采用 LSD 多重比较法分析不同处理之间的差异显著性。叶苞特征使用卡方 (χ^2) 检验分析差异性。取食率和结实率分析前均进行平方根反正弦转换。

2 结果与分析

2.1 施硅对稻纵卷叶螟幼虫结苞危害特征的影响

对叶苞特征的分析发现 (表 1), 叶苞发生

表 1 不同品种间分蘖期稻株上的叶苞特征

Table 1 Leaf folding characteristics on the tillering stage plants of different varieties

叶苞特征 Leaf folding characteristics	分布 Distributions	品种间的发生数量和占比 Number and percentage of leaf folds between varieties		汇总 Total	χ^2	P
		TN1	ZY8			
叶位 Leaf	倒一叶 Topmost leaf	25 (3.7%)	20 (3.4%)	45 (3.5%)	0.145	0.930
	倒二叶 Second leaf from top	191 (28.6%)	170 (28.5%)	361 (28.6%)		
	倒三叶 Third leaf from top	451 (67.6%)	406 (68.1%)	857 (67.8%)		
	汇总 Total	667 (100.0%)	596 (100.0%)	1 263 (100.0%)		
类型 Type	纵向 Longitude	629 (94.3%)	573 (96.1%)	1 202 (95.2%)	2.315	0.128
	叶尖 Leaf tip	38 (5.7%)	23 (3.9%)	61 (4.8%)		
	汇总 Total	667 (100.0%)	596 (100.0%)	1 263 (100.0%)		
叶面 Leaf surface	正面 Adaxial side	521 (78.1%)	554 (93.0%)	1 075 (85.1%)	54.555	<0.001
	反面 Abaxial side	146 (21.9%)	42 (7.0%)	188 (14.9%)		
	汇总 Total	667 (100.0%)	596 (100.0%)	1 263 (100.0%)		
离叶基距离 Distance from the leaf base	近 1/4 Proximal quarter	70 (11.6%)	78 (13.2%)	148 (12.4%)	2.24	0.520
	近中 1/4 Proximal mid-quarter	182 (30.2%)	166 (28.2%)	348 (29.2%)		
	远中 1/4 Distal mid-quarter	224 (37.2%)	207 (35.1%)	431 (36.2%)		
	远 1/4 Distal quarter	126 (20.9%)	138 (23.4%)	264 (22.2%)		
	汇总 Total	602 (100.0%)	589 (100.0%)	1 191 (100.0%)		

TN1 和 ZY8 分别表示品种台中 1 号和中浙优 8 号。表 3、表 5 和表 7 同。

TN1 and ZY8 represent varieties Taichung Native 1 and Zhongzheyu 8, respectively. The same for Table 3, Table 5 and Table 7.

的叶面在品种之间有显著差异 ($\chi^2=54.555$, $P<0.001$), ZY8 比 TN1 叶片正面结苞的比例大 14.9%; 叶苞发生的叶位 ($\chi^2=0.145$, $P=0.930$)、类型 ($\chi^2=2.315$, $P=0.128$) 和叶苞离叶片基部的距离 ($\chi^2=2.24$, $P=0.520$) 在品种之间没有显著差异。同时, 叶苞发生的叶位 ($\chi^2=27.732$, $P<0.001$) 和叶面 ($\chi^2=245.761$, $P<0.001$) 在施硅水平之间有显著差异 (表 2), 施硅比对照水稻叶片正面结苞占比增加 30.7%-37.8%; 叶苞类型 ($\chi^2=11.175$, $P=0.264$) 和叶苞离叶片基部的距离 ($\chi^2=7.249$, $P=0.064$) 在施硅水平之间没有显著差异。

针对孕穗期水稻, 仅在中浙优 8 号的对照、低硅和高硅处理上发现叶苞, 均为朝向叶片正面结苞, 叶苞其余特征在施硅水平之间都没有显著差异 (叶位: $\chi^2=2.43$, $P=0.297$; 类型: $\chi^2=1.06$,

$P=0.589$; 离叶基距离: $\chi^2=6.228$, $P=0.398$) (表 3)。

分蘖期稻纵卷叶螟幼虫结苞取食特征的分析表明, 叶苞中丝束数量在施硅水平之间有显著差异 ($F=4.335$, $df=3,16$, $P=0.020$), 在品种之间没有显著差异 ($F=3.694$, $df=1,16$, $P=0.073$) (表 4)。相比于对照, 中、高硅处理的丝束数量分别显著增加 36.2%和 33.8% (表 5)。施硅水平 ($F=0.435$, $df=3,16$, $P=0.731$) 和品种 ($F=1.386$, $df=1,16$, $P=0.256$) 对取食率没有显著影响, 两者的交互作用也没有显著影响 ($F=0.120$, $df=3,16$, $P=0.947$) (表 4)。施硅水平、品种及两者的交互作用 (施硅水平: $F=2.071$, $df=3,39$, $P=0.120$; 品种: $F=2.437$, $df=1,39$, $P=0.127$; 交互作用: $F=0.598$, $df=3,39$, $P=0.620$) 对稻纵卷叶螟蛹重都没有显著影响 (表 4)。

表 2 不同施硅水平下分蘖期稻株上的叶苞特征

Table 2 Leaf folding characteristics on the tillering stage plants treated with Si at different levels

叶苞特征 Leaf folding characteristics	分布 Distributions	施硅水平间的发生数量和占比 Number and percentage of leaf folds between Si levels				汇总 Total	χ^2	P
		对照 Control	低硅 Low Si	中硅 Medium Si	高硅 High Si			
叶位 Leaf	倒一叶 Topmost	15 (4.0%)	8 (2.8%)	12 (4.2%)	10 (3.1%)	45 (3.6%)	27.732	<0.001
	倒二叶 Second from top	118 (32.0%)	69 (24.0%)	108 (37.2%)	66 (20.9%)	361 (28.6%)		
	倒三叶 Third from top	236 (64.0%)	211 (73.2%)	170 (58.6%)	240 (76.0%)	857 (67.8%)		
	汇总 Total	369 (100.0%)	288 (100.0%)	290 (100.0%)	316 (100.0%)	1 263 (100.0%)		
类型 Type	纵向 Longitude	357 (96.8%)	266 (92.4%)	278 (95.9%)	301 (95.3%)	1 202 (95.2%)	11.175	0.264
	叶尖 Leaf tip	12 (3.2%)	22 (7.6%)	12 (4.1%)	15 (4.7%)	61 (4.8%)		
	汇总 Total	369 (100.0%)	288 (100.0%)	290 (100.0%)	316 (100.0%)	1 263 (100.0%)		
叶面 Leaf surface	正面 Adaxial side	225 (61.0%)	272 (94.4%)	266 (91.7%)	312 (98.8%)	1 075 (85.1%)	245.761	<0.001
	反面 Abaxial side	144 (39.0%)	16 (5.6%)	24 (8.3%)	4 (1.2%)	188 (14.9%)		
	汇总 Total	369 (100.0%)	288 (100.0%)	290 (100.0%)	316 (100.0%)	1 263 (100.0%)		
离叶基 距离 Distance from the leaf base	近 1/4 Proximal quarter	43 (12.6%)	32 (12.1%)	34 (12.3%)	39 (12.6%)	148 (12.4%)	7.249	0.064
	近中 1/4 Proximal mid-quarter	107 (31.3%)	78 (29.5%)	74 (26.8%)	89 (28.8%)	348 (29.2%)		
	远中 1/4 Distal mid-quarter	102 (29.8%)	100 (37.9%)	114 (41.3%)	115 (37.2%)	431 (36.2%)		
	远 1/4 Distal quarter	90 (26.3%)	54 (20.5%)	54 (19.6%)	66 (21.4%)	264 (22.2%)		
	汇总 Total	342 (100.0%)	264 (100.0%)	276 (100.0%)	309 (100.0%)	1 191 (100.0%)		

表中对照、低硅、中硅、高硅分别为 0、150、300 和 600 kg SiO₂/hm²。表 3、表 5 和表 7 同。

In the table, control, low Si, medium Si and high Si represent 0, 150, 300 and 600 kg SiO₂/hm², respectively. The same for Table 3, Table 5 and Table 7.

表 3 不同施硅水平下中浙优 8 号孕穗期稻株上的叶苞特征

Table 3 Leaf folding characteristics at booting stage ZY8 plants treated with Si at different levels

叶苞特征 Leaf folding characteristics	分布 Distribution	施硅水平间的发生数量和占比 Number and percentage of leaf folds between Si levels			汇总 Total	χ^2	P
		对照 Control	低硅 Low Si	高硅 High Si			
叶位 Leaf	倒一叶 Topmost	40 (100.0%)	19 (95.0%)	31 (96.9%)	90 (97.8%)	2.43	0.297
	倒二叶 Second from top	0 (0.0%)	1 (5.0%)	1 (3.1%)	2 (2.2%)		
	倒三叶 Third from top	0 (0.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)		
	汇总 Total	40 (100.0%)	20 (100.0%)	32 (100.0%)	92 (100.0%)		
类型 Type	纵向 Longitude	35 (89.8%)	17 (85.0%)	30 (93.8%)	82 (90.1%)	1.06	0.589
	叶尖 Leaf tip	4 (10.2%)	3 (15.0%)	2 (6.2%)	9 (9.9%)		
	汇总 Total	39 (100.0%)	20 (100.0%)	32 (100.0%)	91 (100.0%)		
叶面 Leaf surface	正面 Adaxial side	39 (100.0%)	20 (100.0%)	32 (100.0%)	91 (100.0%)	-	-
	反面 Abaxial side	0 (0.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)		
	汇总 Total	39 (100.0%)	20 (100.0%)	32 (100.0%)	91 (100.0%)		
离叶基距离 Distance from the leaf base	近 1/4 Proximal quarter	1 (2.5%)	0 (0.0%)	3 (9.1%)	4 (4.3%)	6.228	0.398
	近中 1/4 Proximal mid-quarter	14 (35.0%)	7 (35.0%)	7 (21.2%)	28 (30.1%)		
	远中 1/4 Distal mid-quarter	17 (42.5%)	8 (40.0%)	18 (54.5%)	43 (46.2%)		
	远 1/4 Distal quarter	8 (20.0%)	5 (25.0%)	5 (15.2%)	18 (19.4%)		
	汇总 Total	40 (100.0%)	20 (100.0%)	33 (100.0%)	93 (100.0%)		

表 4 施硅水平和品种对分蘖期稻纵卷叶螟幼虫结苞、取食和发育影响的双因素方差分析

Table 4 Two-way ANOVA analysis of the effects of Si levels and rice varieties on the folding behaviour, feeding, and development of *Cnaphalocrocis medinalis* larvae on tillering stage rice plants

处理 Treatment	丝束数量 Number of binds per fold		取食率 Feeding rate		蛹重 Pupal weight	
	F	P	F	P	F	P
施硅水平 Si level	4.335	0.020	0.763	0.518	2.071	0.120
品种 Variety	3.694	0.073	3.534	0.063	2.437	0.127
施硅水平×品种 Si level×variety	0.752	0.537	0.876	0.457	0.598	0.620

表 5 施硅水平和品种对分蘖期稻纵卷叶螟幼虫结苞、取食和发育的影响

Table 5 Effects of Si levels and rice varieties on the folding behaviour, feeding, and development of *Cnaphalocrocis medinalis* larvae on tillering stage rice plants

品种 Variety	施硅水平 Si level	丝束数量 Number of binds per fold	取食率 (%) Feeding rate (%)	蛹重 (mg) Pupal weight (mg)
TN1	对照 Control	12.3±0.92 d	44.9±1.01 a	26.9±1.92 a
	低硅 Low Si	12.4±0.20 cd	43.1±4.95 a	21.8±2.29 ab
	中硅 Medium Si	17.1±2.30 abc	40.2±3.57 a	20.3±2.33 b
	高硅 High Si	17.6±1.56 ab	42.3±6.86 a	20.5±1.58 b
ZY8	对照 Control	14.1±0.95 bcd	47.6±4.31 a	22.0±2.96 ab
	低硅 Low Si	17.2±1.20 ab	51.1±4.84 a	17.4±2.11 b
	中硅 Medium Si	18.9±2.50 a	43.9±8.31 a	20.5±2.55 ab
	高硅 High Si	17.7±1.36 ab	45.0±2.96 a	19.3±1.60 b

表中数据为平均值±标准误, 同列数据后标有不同字母表示差异显著 ($P<0.05$, LSD 多重比较法检验)。下表同。

The data in the table are mean±SE, and followed by different letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$, LSD multiple comparison test). The same below.

水稻孕穗期只获得了中浙优 8 号的对照、低硅和高硅处理上的幼虫结苞取食特征数据。单因素方差分析显示, 取食率 ($F=35.037$, $df=2,6$, $P<0.001$) 和叶苞的丝束数量 ($F=23.088$, $df=2,6$, $P=0.002$) 在施硅水平之间有显著差异。高硅处理下, 稻纵卷叶螟幼虫的取食率比对照显著降低 8.5% (图 1: A), 叶苞的丝束数量比对照显著增加 57.0% (图 1: B)。

2.2 施硅对水稻收割后土壤硅含量影响

水稻收割后土壤硅含量在不同施硅水平之间有显著差异 ($F=20.362$, $df=3,16$, $P<0.001$), 在品种与施硅水平的交互作用之间没有显著差异 ($F\leq 0.578$, $P\geq 0.638$) (表 6)。在品种台中 1 号中, 300 和 600 kg SiO₂/hm² 水平下土壤硅含量相比于对照分别显著增加 133.4%和 182.4% (图 2: A); 在品种中浙优 8 号中, 300 和 600 kg SiO₂/hm²

水平下土壤硅含量相比于对照分别显著增加 154.9%和 303.8% (图 2: B)。

2.3 施硅对水稻剑叶理化性状的影响

台中 1 号中, 叶绿素相对含量 ($F=23.686$, $df=3,56$, $P<0.001$) 和比叶面积 ($F=164.747$, $df=3,32$, $P<0.001$) 在施硅水平之间有显著差异, 但叶片含水率、硅含量、可溶性糖含量、总氮含量和碳氮比在施硅水平之间没有差异 ($F\leq 1.582$, $P\geq 0.221$) (表 7)。低、中、高硅处理的叶绿素相对含量比对照分别显著增加 11.3%、15.5%和 26.2%, 而比叶面积比对照显著减小。

中浙优 8 号中, 叶绿素相对含量 ($F=13.891$, $df=3,56$, $P=0.002$), 比叶面积 ($F=13.165$, $df=3,32$, $P<0.001$)、硅含量 ($F=11.609$, $df=3,32$, $P<0.001$)、总氮含量 ($F=4.603$, $df=3,32$, $P=0.009$) 和碳氮比 ($F=4.896$, $df=3,32$, $P=0.007$) 在施硅水平之

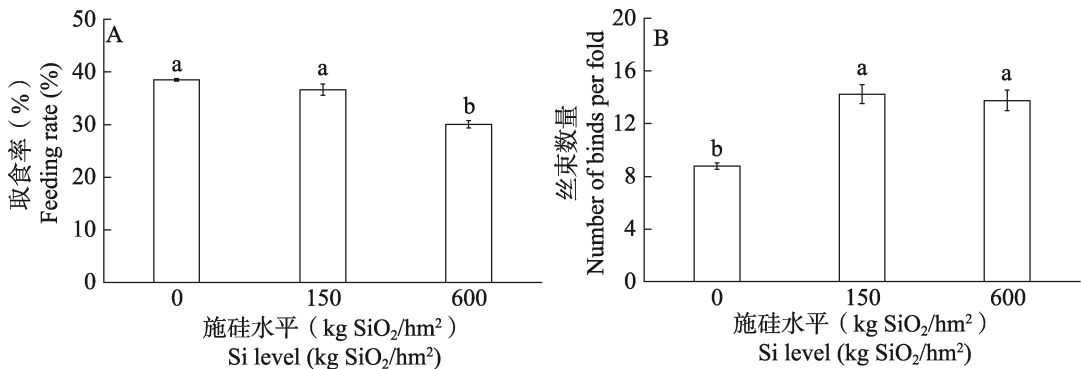


图 1 施硅水平对中浙优 8 号孕穗期上稻纵卷叶螟幼虫取食率 (A) 和叶苞丝束数量 (B) 的影响
Fig. 1 Influence of Si levels on feeding rate (A) and number of binds per fold (B) of *Cnaphalocrocis medinalis* larvae on ZY8 booting stage plants

图中数据为平均值±标准误, 柱上不同字母表示差异显著 ($P<0.05$, LSD 多重比较法检验)。下图同。
The data in the figure are mean±SE, and different letters above bars indicate significant difference ($P<0.05$, LSD multiple comparison test). The same below.

表 6 施硅水平和品种对土壤硅含量影响的双因素方差分析

Table 6 Two-way ANOVA analysis of the effects of Si levels and rice varieties on soil Si content						
处理 Treatment	Type	Ⅲ 型平方和 sums of squares	df	均方 Mean square	F	P
施硅水平 Si level		29 739.457	3	9 913.152	20.362	<0.001
品种 Variety		6.427	1	6.427	0.013	0.910
施硅水平×品种 Si level×variety		844.529	3	281.510	0.578	0.638
误差 Error		7 789.672	16	486.855	-	-
总变异 Total variation		38 380.085	23	-	-	-

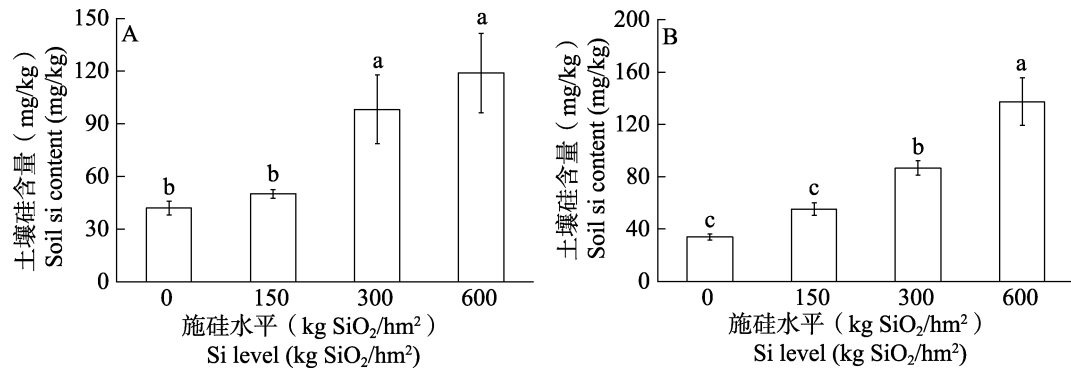


图2 施硅水平对品种台中1号 (A) 和中浙优8号 (B) 小区土壤硅含量的影响

Fig. 2 Influence of Si levels on Si content of soil in plots of TN1 (A) and ZY8 (B)

间有显著差异,但叶片含水率和可溶性糖含量在施硅水平之间没有显著差异 ($F \leq 2.323$, $P \geq 0.094$) (表7)。中、高硅处理的叶绿素相对含量比对照分别显著增加8.3%和11.8%。比叶面积随着施硅水平增大而显著降低。叶片硅含量随着施硅水平增大而增加,但是仅有高硅处理的硅含量显著高于其它处理。低硅处理的叶片总氮含量最低,与对照相比显著降低6.2%。

2.4 施硅对水稻产量指标的影响

针对生产品种中浙优8号测定水稻产量指

标,每穗总粒数 ($F=13.891$, $df=3,8$, $P=0.002$) 和结实率 ($F=26.775$, $df=3,8$, $P<0.001$) 在施硅水平之间有显著差异,但每平方米穗数 ($F=2.323$, $df=3,8$, $P=0.094$) 和千粒重 ($F=0.353$, $df=3,8$, $P=0.787$) 在施硅水平之间没有显著差异。高硅处理的每穗总粒数比对照、低硅水平显著增加23.9%和13.6% (图3: B)。相比于对照,低、中、高硅处理的水稻结实率分别显著增加14.1%、18.9%和18.5% (图3: C)。

中浙优8号的水稻理论产量在施硅水平之间有显著差异 ($F=6.365$, $df=3,8$, $P=0.016$)。

表7 施硅水平和品种对水稻剑叶理化性状的影响

Table 7 Influence of Si levels and rice varieties on physical and chemical traits of rice flag leaf

品种 Variety	测定指标 Measurement index	不同施硅水平下的数值 Data at different Si levels			
		对照 Control	低硅 Low Si	中硅 Medium Si	高硅 High Si
TN1	叶绿素相对含量 (SPAD) Chlorophyll content (SPAD)	29.0±0.39 c	32.3±0.44 b	33.5±0.53 b	36.6±1.76 a
	比叶面积 (cm ² /g) Specific leaf area (cm ² /g)	38.4±1.15 a	35.4±0.51 b	21.4±0.78 c	18.9±0.37 d
	含水率 (%) Leaf water content (%)	63.4±0.31 a	62.5±0.47 a	62.8±0.27 a	62.7±0.34 a
	硅含量 (mg/g) Si content (mg/g)	7.8±0.50 a	8.7±0.48 a	8.0±0.30 a	8.1±0.43 a
	可溶性糖含量 (mg/g) Soluble sugar content (mg/g)	57.0±0.41 ab	56.3±0.69 ab	58.0±1.00 a	55.7±0.84 b
	总氮含量 (mg/g) Total nitrogen content (mg/g)	23.1±0.51 a	23.0±0.50 a	23.1±0.32 a	23.8±0.46 a
	碳氮比 C/N Carbon to nitrogen ratio	2.5±0.06 a	2.5±0.07 a	2.5±0.07 a	2.4±0.06 a
ZY8	叶绿素相对含量 (SPAD) Chlorophyll content (SPAD)	38.4±0.55 b	38.9±0.81 b	41.6±0.42 a	42.9±0.48 a
	比叶面积 (cm ² /g) Specific leaf area (cm ² /g)	21.8±0.36 a	19.8±0.27 bc	20.3±0.35 b	19.1±0.26 c
	含水率 (%) Leaf water content (%)	63.1±0.25 a	62.8±0.31 ab	62.7±0.23 ab	62.2±0.11 b
	硅含量 (mg/g) Si content (mg/g)	8.1±0.45 b	8.6±0.27 b	9.0±0.36 b	10.8±0.27 a
	可溶性糖含量 (mg/g) Soluble sugar content (mg/g)	42.2±1.06 a	42.4±1.12 a	42.5±1.58 a	41.0±0.68 a
	总氮含量 (mg/g) Total nitrogen content (mg/g)	25.3±0.42 ab	23.7±0.58 c	24.2±0.62 bc	26.0±0.25 a
	碳氮比 C/N Carbon to nitrogen ratio	1.7±0.06 ab	1.8±0.02 a	1.8±0.04 a	1.6±0.04 b

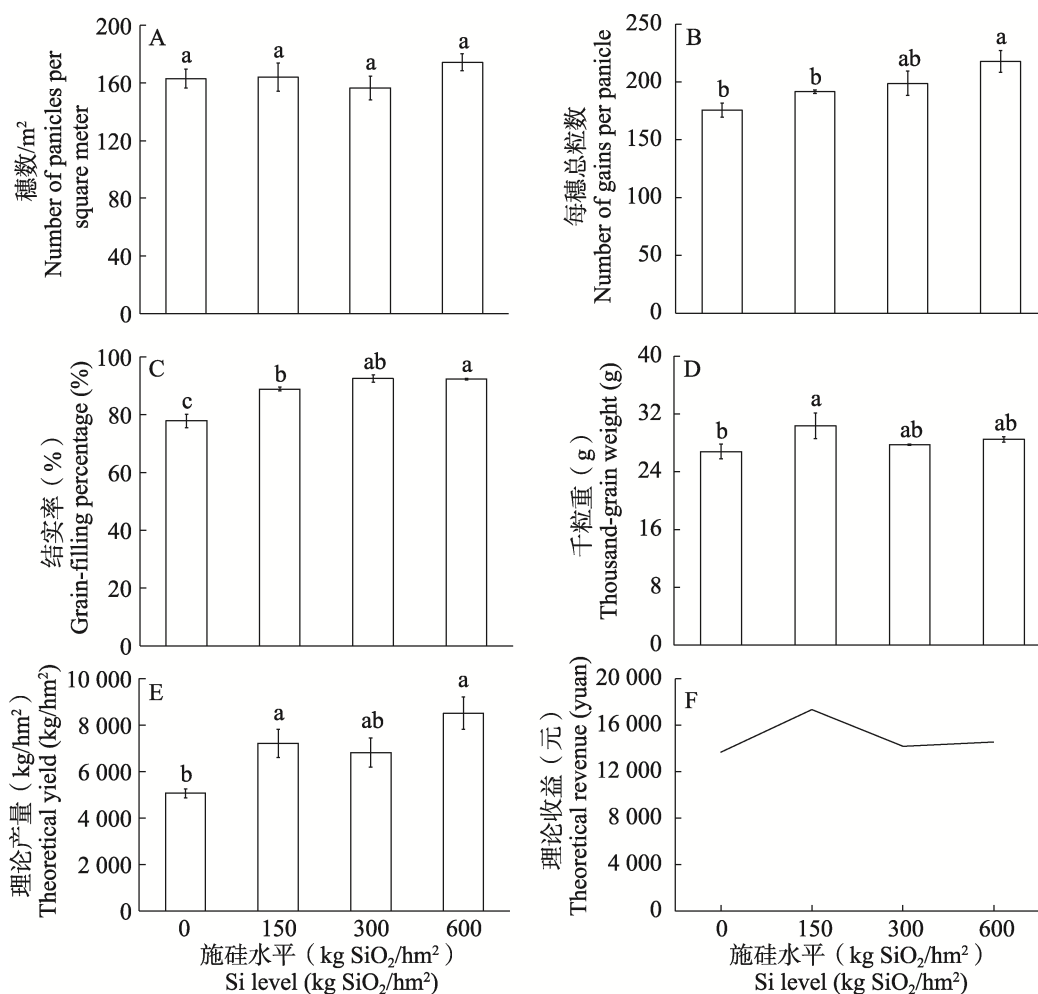


图 3 不同施硅水平下中浙优 8 号水稻产量指标的差异

Fig. 3 Differences in rice yield indicators of ZY8 under treatments of Si levels

A. 每平方米穗数; B. 每穗总粒数; C. 结实率; D. 千粒重; E. 理论产量; F. 理论收益。

A. Number of panicles per square meter; B. Number of gains per panicle; C. Grain-filling rate; D. Thousand-grain weight; E. Theoretical yield; F. Theoretical revenue.

施硅处理显著增加水稻的理论产量 (图 3: E)。由图 3 (F) 可知, 不同施硅水平的理论收益: 150 kg SiO₂/hm² > 600 kg SiO₂/hm² > 300 kg SiO₂/hm² > 0 kg SiO₂/hm²。

3 讨论

植物和食草性动物之间存在长期的进化对抗关系, 植物发展出多种防御机制, 包括抵抗 (阻止和/或伤害食草性动物的物理或化学特征) 和耐受 (植物在食草性动物取食后重新生长和/或繁殖的能力) 策略 (Johnson *et al.*, 2019)。越来越多的证据表明, 植物体内高含量的硅可以赋予其对各种生物胁迫的抗性 or 耐受性 (Ma, 2004)。

在实验室条件下, 已经证实硅能够增强水稻对稻纵卷叶螟幼虫的抗性 (Han *et al.*, 2015, 2016)。但在自然环境中, 针对稻纵卷叶螟幼虫结苞危害, 硅介导的水稻抗虫策略并不明确。

在鳞翅目幼虫中, 建造庇护所是一种应对寄主植物防御和天敌捕食压力的重要行为 (Abarca and Boege, 2011)。稻纵卷叶螟幼虫在水稻叶片上的吐丝结苞属于建造庇护所行为, 这种叶苞能够改善微环境温湿度、遮蔽风和阳光以及抵御天敌 (Scott and Yack, 2012)。本研究结果表明, 分蘖期水稻上稻纵卷叶螟叶苞 (叶位和叶面) 特征在不同施硅水平之间有显著差异, 特别是施硅显著增加幼虫在叶片正面结苞的频率 (表 2)。

幼虫在抗虫品种 ZY8 上正面结苞的频率显著高于感虫品种 TN1 (表 1)。硅会沉积在叶片中形成细胞壁角质-硅双层结构, 这种结构能够增强植物叶片机械强度, 同时改变叶片表面性状, 增强植物对害虫的抗性 (Massey and Hartley, 2009; Hall *et al.*, 2020)。孕穗期叶苞特征在不同施硅水平之间没有显著差异 (表 3), 可能与水稻叶片发育完全后幼虫在不同处理上卷叶都比较困难有关。Han 等 (2018) 的田间试验中, 在移栽后 80 d, 不同硅处理水稻上的卷叶率也没有显著差异。施硅显著增加叶苞的丝束数量 (表 5, 图 1)。叶苞的丝束数量增多, 表明幼虫需要消耗更多能量来通过吐丝和摆动头部建造叶苞, 这会延长建造叶苞的时间 (Punithavalli *et al.*, 2013), 从而增加幼虫暴露在恶劣天气或天敌攻击下的风险。Hou 和 Han (2010) 的研究中, 施硅延长二化螟幼虫在水稻茎秆上的钻蛀时间, 降低二化螟幼虫的钻蛀成功率。Yang 等 (2017) 发现施硅显著延长褐飞虱从开始刺食到取食韧皮部汁液的时间, 缩短刺入韧皮部和取食韧皮部汁液的时间。这些结果表明硅可能通过增强植物组织的机械强度 (Ma and Yamaji, 2006), 增强水稻对害虫的抗性, 抑制害虫的取食行为。在水稻孕穗期调查时, 台中 1 号在分蘖期受病虫害的严重为害后未能恢复到正常水平, 导致叶片整体呈现发黄状态; 中浙优 8 号的中硅处理稻株普遍受到胡麻叶斑病侵染, 叶斑率超过 50%。寄主植物的长势、颜色、叶片形状、叶片密度和叶表粗糙度等都是主导害虫寄主选择的因子, 稻纵卷叶螟成虫更倾向于在叶色浓绿的叶片上产卵 (钱希, 1993)。因此孕穗期数据仅包含中浙优 8 号的对照、低硅和高硅处理, 结果显示高硅处理显著降低稻纵卷叶螟幼虫的取食率 (图 1: A)。这与 Han 等 (2015) 的室内研究结果相反, 即稻纵卷叶螟 3 龄幼虫取食高硅处理水稻后, 取食量和相对取食率均显著增加, 差异的主要原因可能与试验中水稻品种与生育期以及试验方法不同有关。Han 等 (2015) 使用 40 日龄的台中 1 号水稻的离体叶片进行室内测定, 本研究中采集中浙优 8 号 85 日龄稻株上的田间叶苞进行测定。

水稻叶片的形态特征、物理和生化特性对稻纵卷叶螟的为害具有显著影响 (王元翔等, 2008; Kamakshi *et al.*, 2015)。本研究中, 施硅处理显著降低剑叶的比叶面积 (表 7)。比叶面积是衡量叶片韧性的一个重要指标, 比叶面积较低的叶片通常具有较厚的组织结构和更强的韧性 (Read and Sanson, 2003)。稻纵卷叶螟低龄幼虫在叶片硬挺厚实的品种上卷叶困难, 存活率降低 (Punithavalli *et al.*, 2013)。施硅显著增加中浙优 8 号叶片硅含量 (表 7), 硅以无定形硅体沉积在植物组织中, 使植物组织更加坚硬, 降低植物叶片的适口性 (Alhousari and Maria, 2018)。在 Massey 和 Hartley (2009) 的研究中, 施硅增加植物叶片粗糙度, 阻止非洲粘虫 *Spodoptera exempta* 的摄食行为, 并降低它们的生长速率。施硅减少叶片总氮含量, 增加叶片碳氮比 (表 7), 这与韩永强等 (2017) 研究结果一致。植物组织中 C/N 比高而含氮量低就会造成植食性昆虫取食植物的营养价值下降, 严重妨碍其种群发展 (韩永强等, 2017)。台中 1 号水稻叶片的硅含量、总氮含量和碳氮比在不同施硅水平之间没有显著差异, 可能是由于分蘖期病虫害为害严重, 水稻补偿能力不足。以上结果表明施硅能够通过改变水稻叶片的理化性质, 增强叶片的韧性, 降低叶片营养价值, 增强水稻对稻纵卷叶螟幼虫结苞为害的抵抗和耐受策略。

剑叶作为水稻的功能性叶片, 在光合作用和产量形成中起着至关重要的作用 (Wang *et al.*, 2023)。本研究中, 施硅处理显著增加剑叶的叶绿素相对含量 (表 7)。这与高臣等 (2011) 的研究结果一致, 水稻施硅后叶片叶绿素含量、气孔导度和净光合速率提高, 增强叶片光合作用。其它研究也表明, 施硅也能提高玉米和小麦叶片的叶绿素含量, 增强光合作用 (Xie *et al.*, 2014; Huang *et al.*, 2019)。同时, 中浙优 8 号施硅处理显著增加水稻每穗总粒数和结实率 (图 3: B, C)。郑泽华等 (2018) 的研究结果显示, 施用 200 kg SiO_2/hm^2 钢矿煤渣与不施硅相比, 水稻有效穗数、每穗总粒数、千粒重和结实率分别增加 6.9%、15.5%、2.0% 和 4.5%; 对产量的主要影响

因素是有效穗数和每穗总粒数。不过, 施硅对水稻的增产作用受生态气候、品种、土壤质地、栽培技术、害虫发生量等因素的影响(龚金龙等, 2012)。

综上所述表明, 田间施硅处理能够通过改善水稻叶片的理化性状, 增强水稻对稻纵卷叶螟幼虫结苞为害的抵抗性和耐受性, 对水稻产量指标有不同程度的增幅作用。相比于对照, 施硅处理显著增加土壤硅含量, 有利于改善土壤环境和促进下一茬作物生长。本研究结合中浙优 8 号的理论产量和硅肥成本来评估不同施硅水平下的理论收益, 发现 150 kg SiO₂/hm² 的理论收益最高。

参考文献 (References)

- Abarca M, Boege K, 2011. Fitness costs and benefits of shelter building and leaf trenching behaviour in a pyralid caterpillar. *Ecological Entomology*, 36(5): 564–573.
- Alhousari F, Greger M, 2018. Silicon and mechanisms of plant resistance to insect pests. *Plants*, 7(2): 33.
- National Agricultural Technology Extension Service Center, 2006. Technical Specification for Soil Analysis, Second Edition. Beijing: China Agriculture Press. 169–171. [全国农业技术推广服务中心, 2006. 土壤分析技术规范(第二版). 北京: 中国农业出版社. 169–171.]
- Bashir K, Husnain T, Fatima T, Latif Z, Aks Mehdi S, Riazuddin S, 2004. Field evaluation and risk assessment of transgenic indica basmati rice. *Molecular Breeding*, 13(4): 301–312.
- Cai DL, Li JM, Zhou JB, 2002. Effect of the silicon fertilizer application to hybrid rice. *Areal Research and Development*, 21(3): 75–77. [蔡德龙, 李继明, 周敬波, 2002. 硅肥在杂交水稻上的肥效研究. 地域研究与开发, 21(3): 75–77.]
- Dai WM, Zhang KQ, Duan BW, Sun CX, Zheng KL, Cai R, Zhuang JY, 2005. Rapid determination of silicon content in rice (*Oryza sativa*). *Chinese Journal of Rice Science*, 19(5): 460–462. [戴伟民, 张克勤, 段彬伍, 孙成效, 郑康乐, 蔡润, 庄杰云, 2005. 测定水稻硅含量的一种简易方法. 中国水稻科学, 19(5): 460–462.]
- Gao C, Liu JB, Chang HB, Yu XB, Xu HS, 2011. Effects of silicon on rice leaf photosynthesis and ultrastructure. *Journal of Jilin Agricultural University*, 33(1): 1–4. [高臣, 刘俊渤, 常海波, 于晓斌, 徐宏书, 2011. 硅对水稻叶片光合特性和超微结构的影响. 吉林农业大学学报, 33(1): 1–4.]
- Gong JL, Zhang HC, Long HY, Hu YJ, Dai QG, Huo ZY, Xu K, Wei HY, Gao H, 2012. Progress in research of nutrition functions and physiological mechanisms of silicon in rice. *Plant Physiology Journal*, 48(1): 1–10. [龚金龙, 张洪程, 龙厚元, 胡雅杰, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 高辉, 2012. 水稻中硅的营养功能及生理机制的研究进展. 植物生理学报, 48(1): 1–10.]
- González LC, Prado RD, Campos CN, 2015. Silicon in the crop resistance to agricultural pest. *Cultivos Tropicales*, 36: 16–24.
- Hall CR, Dagg V, Waterman JM, Johnson SN, 2020. Silicon alters leaf surface morphology and suppresses insect herbivory in a model grass species. *Plants*, 9(5): 643.
- Han YQ, Gong SL, Wen LZ, Hou ML, 2017. Effect of silicon addition to rice plants on *Cnaphalocrocis medinalis* feeding and oviposition preference. *Acta Ecologica Sinica*, 37(5): 1623–1629. [韩永强, 弓少龙, 文礼章, 侯茂林, 2017. 水稻施用硅肥对稻纵卷叶螟幼虫取食和成虫产卵选择性的影响. 生态学报, 37(5): 1623–1629.]
- Han YQ, Lei WB, Wen LZ, Hou ML, 2015. Silicon-mediated resistance in a susceptible rice variety to the rice leaf folder, *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée (Lepidoptera: Pyralidae). *PLoS ONE*, 10(3): e0120557.
- Han YQ, Li P, Gong SL, Yang L, Wen LZ, Hou ML, 2016. Defense responses in rice induced by silicon amendment against infestation by the leaf folder *Cnaphalocrocis medinalis*. *PLoS ONE*, 11(4): e0153918.
- Han YQ, Wen JH, Peng ZP, Zhang DY, Hou ML, 2018. Effects of silicon amendment on the occurrence of rice insect pests and diseases in a field test. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(10): 2172–2181.
- Hou ML, Han YQ, 2010. Silicon-mediated rice plant resistance to the Asiatic rice borer (Lepidoptera: Crambidae): Effects of silicon amendment and rice varietal resistance. *Journal of Economic Entomology*, 103(4): 1412–1419.
- Huang HL, Rizwan M, Li M, Song FR, Zhou SJ, He X, Ding R, Dai ZH, Yuan Y, Cao MH, Xiong SL, Tu SX, 2019. Comparative efficacy of organic and inorganic silicon fertilizers on antioxidant response, Cd/Pb accumulation and health risk assessment in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Environmental Pollution*, 255(Pt 1): 113146.
- Johnson SN, Reynolds OL, Gurr GM, Esveld JL, Moore BD, Tory GJ, Gherlenda AN, 2019. When resistance is futile, tolerate instead: Silicon promotes plant compensatory growth when attacked by above- and belowground herbivores. *Biology Letters*, 15(7): 20190361.
- Kamakshi N, Rajasekhar P, Rao GR, Kumar PR, Harathi PN, 2015. Morphological and biochemical factors associated with resistance to rice leaf folder, *Cnaphalocrocis medinalis*. *Indian Journal of Plant Protection*, 43: 534–537.
- Kumar GN, Singh PK, Naresh RK, Chandra MS, Kumar A, 2021.

- Effect of planting techniques with organic and inorganic nutrient management on growth, yield attributes and productivity of rice (*Oryza sativa* L.) under rice-wheat cropping system. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(1): 328–336.
- Liu H, Zhong YQ, Hou ML, 2019. Population dynamics of rice leaf folder, planthoppers and their natural enemies in paddy fields inter-cropped with one-and two-season rice. *Journal of Environmental Entomology*, 41(1): 1–8. [刘欢, 钟玉琪, 侯茂林, 2019. 湘桂走廊单双季稻混栽稻田稻纵卷叶螟、稻飞虱及其天敌的种群动态. 环境昆虫学报, 41(1): 1–8.]
- Liu Y, Wang JQ, Feng XD, Jiang XH, 2008. Analysis of the occurrence of *Cnaphalocrocis medinalis* in 2007 and prediction of its occurrence trend in 2008. *Chinese Plant Protection*, 28(7): 33–35. [刘宇, 王建强, 冯晓东, 蒋学辉, 2008. 2007 年全国稻纵卷叶螟发生实况分析与 2008 年发生趋势预测. 中国植保导刊, 28(7): 33–35.]
- Ma JF, 2004. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Science and Plant Nutrition*, 50(1): 11–18.
- Ma JF, Yamaji N, 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Science*, 11(8): 392–397.
- Massey FP, Hartley SE, 2009. Physical defences wear you down: Progressive and irreversible impacts of silica on insect herbivores. *Journal of Animal Ecology*, 78(1): 281–291.
- Meharg C, Meharg AA, 2015. Silicon, the silver bullet for mitigating biotic and abiotic stress, and improving grain quality, in rice. *Environmental and Experimental Botany*, 120: 8–17.
- Milligan SB, Balzarini M, White WH, 2003. Broad-sense heritabilities, genetic correlations, and selection indices for sugarcane borer resistance and their relation to yield loss. *Crop Science*, 43(5): 1729–1735.
- Padmavathi C, Katti G, Padmakumari AP, Voleti SR, Subba Rao LV, 2013. The effect of leaf folder *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenee) [Lepidoptera: Pyralidae] injury on the plant physiology and yield loss in rice. *Journal of Applied Entomology*, 137(4): 249–256.
- Punithavalli M, Muthukrishnan N, Rajkumar MB, 2013. Influence of rice genotypes on folding and spinning behaviour of leaf folder (*Cnaphalocrocis medinalis*) and its interaction with leaf damage. *Rice Science*, 20(6): 442–450.
- Qian X, 1993. Ecological responses of rice caseworm to hybrid rice and traditional rice. *Chinese Journal of Ecology*, 12(6): 21–24. [钱希, 1993. 稻纵卷叶螟对杂交水稻及常规水稻的生态反应. 生态学杂志, 12(6): 21–24.]
- Read J, Sanson GD, 2003. Characterizing sclerophylly: The mechanical properties of a diverse range of leaf types. *New Phytologist*, 160(1): 81–99.
- Rueden CT, Eliceiri KW, 2019. ImageJ for the next generation of scientific image data. *Microscopy and Microanalysis*, 25(S2): 142–143.
- Scott JL, Yack JE, 2012. Vibratory territorial signals in caterpillars of the poplar lutestring, *Tethea or* (Lepidoptera: Drepanidae). *European Journal of Endocrinology*, 109(3): 411–417.
- Senthil-Nathan S, 2021. Effects of elevated CO₂ on resistant and susceptible rice cultivar and its primary host, brown planthopper (BPH), *Nilaparvata lugens* (Stål). *Scientific Reports*, 11(1): 8905.
- Sun Y, Liu ST, Ling Y, Wang L, Ni H, Guo D, Dong BB, Huang Q, Long LP, Zhang S, Wu SF, Gao CF, 2023. Insecticide resistance monitoring of *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Pyralidae) and its mechanism to chlorantraniliprole. *Pest Management Science*, 79(9): 3290–3299.
- Wang NS, Wang XM, Qian YZ, Bai D, Bao YL, Zhao XY, Xu P, Li KY, Li JF, Li K, Zhang DW, Shi YY, 2023. Genome-wide association analysis of rice leaf traits. *Agronomy*, 13(11): 2687.
- Wang QX, Xu L, Wu JC, 2008. Physical and biochemical mechanisms of resistance of different rice varieties to the rice leaf folder, *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Pyralidae). *Acta Entomologica Sinica*, 51(12): 1265–1270. [王元翔, 许路, 吴进才, 2008. 水稻品种对稻纵卷叶螟抗性的物理及生化机制. 昆虫学报, 51(12): 1265–1270.]
- Wang XK, 2006. Principles and Techniques of Plant Physiology and Biochemistry Experiments. Beijing: Higher Education Press. 163–173. [王学奎, 2006. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社. 163–173.]
- Xie ZM, Song FB, Xu HW, Shao HB, Song R, 2014. Effects of silicon on photosynthetic characteristics of maize (*Zea mays* L.) on alluvial soil. *The Scientific World Journal*, 2014: 718716.
- Yang L, Han YQ, Li P, Wen LZ, Hou ML, 2017. Silicon amendment to rice plants impairs sucking behaviors and population growth in the phloem feeder *Nilaparvata lugens* (Hemiptera: Delphacidae). *Scientific Reports*, 7(1): 1101.
- Zhang XX, Geng JG, Zhou WJ, 1981. Study on the migration pattern of *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenee) in China. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 4(3): 43–54. [张孝羲, 耿济国, 周威君, 1981. 我国稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée 迁飞规律的研究. 南京农业大学学报, 4(3): 43–54.]
- Zheng ZH, Lou YS, Zuo HT, Shi YF, Wang Y, 2018. Effect of silicate application on hybrid rice growth and yield under nighttime warming. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 39(6): 390–397. [郑泽华, 娄运生, 左慧婷, 石一凡, 王颖, 2018. 施硅对夜间增温条件下水稻生长和产量的影响. 中国农业气象, 39(6): 390–397.]