

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

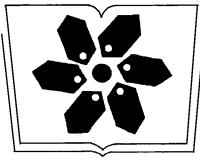
(Shengtai Xuebao)

第 30 卷 第 21 期
Vol.30 No.21
2010



中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 30 卷 第 21 期 2010 年 11 月 (半月刊)

目 次

棉铃虫幼虫对人类呈味物质的取食反应·····	李为争,付国需,王英慧,等 (5709)
西藏拉萨机场周边风沙源空间分布及演变趋势·····	李海东,沈渭寿,邹长新,等 (5716)
新疆沙湾冷泉沉积物的细菌系统发育多样性·····	曾 军,杨红梅,徐建华,等 (5728)
应用鱼类完整性评价体系评价辽河流域健康·····	裴雪姣,牛翠娟,高 欣,等 (5736)
不同海拔天山云杉叶功能性状及其与土壤因子的关系·····	张慧文,马剑英,孙 伟,等 (5747)
滨河湿地不同植被对农业非点源氮污染的控制效果·····	徐华山,赵同谦,贺玉晓,等 (5759)
内蒙古温带荒漠草原能量平衡特征及其驱动因子·····	阳伏林,周广胜 (5769)
南北样带温带区栎属树种功能性状对气象因子的响应·····	冯秋红,史作民,董莉莉,等 (5781)
伏牛山自然保护区物种多样性分布格局·····	卢训令,胡 楠,丁圣彦,等 (5790)
减弱 UV-B 辐射对烟草形态、光合及生理生化特性的影响 ·····	陈宗瑜,钟 楚,王 毅,等 (5799)
川西亚高山针阔混交林乔木层生物量、生产力随海拔梯度的变化 ·····	刘彦春,张远东,刘世荣,等 (5810)
三峡库区消落带水淹初期地上植被与土壤种子库的关系·····	王晓荣,程瑞梅,肖文发,等 (5821)
洞庭湖西岸区防护林土壤和植物营养元素含量特征·····	柏方敏,田大伦,方 晰,等 (5832)
择伐对阔叶红松林主要树种径向与纵向生长的影响·····	蒋子涵,金光泽 (5843)
野鸭湖典型湿地植物光谱特征·····	刘 克,赵文吉,郭逍宇,等 (5853)
三种线性模型在杉木与马尾松地位指数相关关系研究中的比较·····	朱光玉,吕 勇,林 辉,等 (5862)
不同干扰类型下羊草种群的空间格局·····	陈宝瑞,杨桂霞,张宏斌,等 (5868)
基于 SWAT 模型的祁连山区最佳水源涵养植被模式研究——以石羊河上游杂木河流域为例 ·····	王军德,李元红,李赞堂,等 (5875)
2D 与 3D 景观指数测定山区植被景观格局变化对比分析 ·····	张志明,罗亲普,王文礼,等 (5886)
基于投影寻踪的珠江三角洲景观生态安全评价 ·····	高 杨,黄华梅,吴志峰 (5894)
海峡两岸 16 个沿海城市生态系统功能比较 ·····	张小飞,王如松,李 锋,等 (5904)
同安湾围(填)海生态系统服务损害的货币化预测评估 ·····	王 萱,陈伟琪,张璐平,等 (5914)
太阳辐射对玉米农田土壤呼吸作用的影响 ·····	孙敬松,周广胜,韩广轩 (5925)
水分胁迫下 AM 真菌对沙打旺生长和抗旱性的影响·····	郭辉娟,贺学礼 (5933)
宁夏南部旱区坡地不同粮草带比间作种植模式比较·····	路海东,贾志宽,杨宝平,等 (5941)
节节草生长对铜尾矿砂重金属形态转化和土壤酶活性的影响·····	李 影,陈明林 (5949)
自然植物群落形成过程中铜尾矿废弃地氮素组分的变化 ·····	安宗胜,詹 婧,孙庆业 (5958)
硅介导的水稻对二化螟幼虫钻蛀行为的影响 ·····	韩永强,刘 川,侯茂林 (5967)
饥饿对转基因鲤与野生鲤生长竞争和性腺发育的影响·····	刘春雷,常玉梅,梁利群,等 (5975)
专论与综述	
河流水质的景观组分阈值研究进展 ·····	刘珍环,李 猷,彭 建 (5983)
研究简报	
长期模拟增温对岷江冷杉幼苗生长与生物量分配的影响 ·····	杨 兵,王进闯,张远彬 (5994)
环境因素对长额斗蟋翅型分化的影响 ·····	曾 杨,朱道弘,赵吕权 (6001)

硅介导的水稻对二化螟幼虫钻蛀行为的影响

韩永强¹, 刘川², 侯茂林^{1,*}

(1. 植物病虫害生物学国家重点实验室, 中国农业科学院植物保护研究所, 北京 100193; 2. 湖南省宁乡县农业技术推广中心, 长沙 410600)

摘要: 采用对二化螟敏感(汕优63)和中抗(盐丰47)的水稻品种, 设置硅酸钙处理, 观察二化螟蚁螟和三龄幼虫在不同处理稻茎上的钻蛀率、蛀入率和蛀入耗时, 同时测定不同处理植株的硅细胞数量及植株与土壤的二氧化硅含量, 旨在明确水稻施用硅肥对二化螟幼虫钻蛀行为的影响以及这种影响在不同龄期幼虫和不同抗性水稻品种间是否存在差异。蚁螟和三龄幼虫钻蛀率随硅肥施用量增加而降低(幅度为5%—28%)。蚁螟蛀入率在硅肥处理之间和水稻品种之间均没有差异; 三龄幼虫蛀入率随硅肥施用量增加而显著下降10%—40%, 盐丰47上的蛀入率显著低于汕优63(差异10%—30%)。蚁螟蛀入耗时随硅肥施用量增加而显著延长, 三龄幼虫蛀入耗时与品种抗性有显著关系。稻茎硅含量随硅肥施用量增加而增大, 并且与三龄幼虫蛀入率呈负相关、与三龄幼虫蛀入耗时呈正相关关系。因此, 施用硅肥可直接抑制二化螟幼虫钻蛀, 蛀入耗时的延长可间接地延长幼虫暴力于其它防治措施的时间; 施用硅肥对三龄幼虫成功蛀入的影响大于对蚁螟的影响; 相对于抗虫品种, 施用硅肥能在更大程度上增强感虫品种对二化螟幼虫钻蛀行为的抑制作用。

关键词: 二化螟; 水稻; 硅; 钻蛀行为; 抗性

Silicon-mediated effects of rice plants on boring behavior of *Chilo suppressalis* larvae

HAN Yongqiang¹, LIU Chuan², HOU Maolin^{1,*}

1 State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 1000193, China

2 Extension Center for Agricultural Technologies, Ningxiang County, Hunan Province, 410600, China

Abstract: Boring behavior of first and third instar larvae of the rice stem borer (RSB), *Chilo suppressalis*, on calcium silicate (Si)-treated susceptible (Shanyou63) and moderately resistant (Yanfeng47) rice cultivars was compared in terms of percentage of larvae bored (PLB), percentage of larvae penetrated (PLP) and penetration duration (PD), and number of silica cells in leaf sheaths and SiO₂ content in soil and rice culms were determined, with the aims to clarify the influence of Si amendment on RSB boring behavior and whether there are differences in the Si-mediated influence regarding larval instars and rice cultivars. PLB decreased 5%—28% with increase in Si addition. PLP did not differ among Si treatments or between rice cultivars for the first instars; for the third instars, PLP significantly decreased 10%—40% with increase in Si supply and was 10% to 30% lower on Yanfeng47 than on Shanyou63. Si addition significantly prolonged PD in the first instars and, Yanfeng47 compared to Shanyou63 extended PD in the third instars. Increased SiO₂ content in rice culms due to Si addition contributed to the reduction in PLP and prolong in PD of the third instar larvae. The current results indicate that Si amendment may contribute to the suppression of *C. suppressalis* directly through impeding larval penetration, and indirectly by delaying penetration, resulting in prolonged exposure of larvae to other control measures; Si supply impairs penetration more strongly in the third instars than in the first instars; and, susceptible rice cultivar benefits more from Si addition than resistant one in deterring boring by RSB larvae.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划课题(2006CB1020004); 公益性行业(农业)科研专项(200803004); 国家科技支撑计划课题(2006BAD08A04)

收稿日期: 2009-10-09; 修订日期: 2009-12-01

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

Key Words: *Chilo suppressalis*; rice; silicon; boring behavior; plant resistance

二化螟 *Chilo suppressalis* Walker 是世界水稻生产的重要害虫之一,在我国各稻作区均有分布。二化螟以螟虫钻蛀叶鞘和稻茎,致使稻株产生枯鞘、枯心、白穗和虫伤株等症状,重发生时严重影响水稻产量。据估算,全国螟虫(包括二化螟和三化螟)年发生面积约 1500 万 hm^2 ,因防治代价和作物损失造成总经济损失达 115 亿元左右^[1]。长期单纯的化学农药防治导致水稻生产成本增加、环境污染和稻米残毒增多,以及害虫抗药性上升;同时,由于以螟虫钻蛀为害,化学防治的窗口期短、防治效果往往不理想,这也导致多次重复喷施化学杀虫剂。因此,有必要针对二化螟寻找应用性较广和持效性较长的综合治理技术。第 13 届国际植物保护大会明确提出“从保护作物到保护农业生产系统”的观点^[2],即在着眼于创造有利于增强作物长势和抵抗力的同时,恶化有害生物生存和繁殖的环境条件,从而达到可持续的有害生物治理效果。选用抗性品种和作物栽培管理是目前受到关注的主要策略。

施用硅肥对土壤和水稻生产具有多种良好的生理效应^[3-4],如颀抗土壤中有害金属的影响、增强水稻抗旱/耐涝能力和抗倒伏能力、促进稻穗发育和提高稻米品质等。这些效应在植物可获得性硅缺乏的地区更为明显。我国有近一半的稻田缺少硅,硅缺乏已经成为制约水稻生产可持续发展的世界性因素^[5]。另一方面,大量证据表明施用硅肥可提高植株的硅含量,从而增强植物对植食性昆虫的抗性^[6-11]。如施用硅肥阻碍甘蔗茎螟 *Eldana saccharina* 蛀茎为害,并降低幼虫体重^[8-10]。Massey 等^[11]发现施用硅肥提高禾本科杂草的叶片粗糙度、阻碍食叶昆虫取食、降低发育和食物同化效率。抗二化螟水稻品种的一个显著特征是叶鞘硅细胞密度高或者稻茎硅含量高^[12-17]。

水稻素有“硅酸植物”之称,每生产 1000 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;硅富集在水稻茎秆、叶鞘和叶片的表皮细胞,形成“角质-硅双层”结构^[18]。有研究表明,水稻主动吸收和富集硅^[19],因此可以通过增加硅肥施用量来提高水稻植株的硅含量,从而增强其抗性。Sasamoto^[20]发现施用硅肥降低水稻植株对二化螟幼虫的敏感性;缺硅土壤中水稻植株上二化螟发生严重^[12],但是施用硅肥增强水稻对二化螟抗性的行为和生理学机制知之甚少。另外,二化螟以螟虫钻蛀稻茎为害,幼虫发育到三龄以后往往转株为害,但是尚不清楚施用硅肥对不同龄期幼虫钻蛀行为的影响。

本文采用对二化螟具有不同抗性的水稻品种,设置施用硅肥处理和对照,研究硅介导的水稻品种对二化螟初孵幼虫和三龄幼虫钻蛀行为的影响,以揭示:(1)施用硅肥是否阻碍二化螟幼虫的钻蛀行为,对螟虫和三龄幼虫的影响是否存在差异;(2)上述影响在不同抗性水稻品种上是否存在差异,以期为抗性水稻品种选育和采用硅肥进行二化螟种群调控提供指导。

1 材料与方法

1.1 试验设置

选用对二化螟幼虫中抗水稻品种盐丰 47 和高感品种汕优 63^[17]。水稻种子在 50 °C 温水浸种 24 h 后置于人工气候箱催芽 72 h。以塑料盆作苗床播种,苗龄 30 日移栽。秧苗双本移栽到 3.5 L 的塑料桶(高 16 cm)中,每桶移栽 2 穴。桶内装沙质壤土,土壤高度为 10 cm 左右。为避免雨水的影响和自然发生害虫的为害,盆栽水稻苗置于温室内。

根据土壤有效硅含量和水稻对硅的需求量,硅肥(硅酸钙,水溶性 SiO_2 含量 $\geq 20\%$,大连希林索科工贸有限公司)施用量设 3 个水平(按有效成分 SiO_2 计算):(1)对照(不施硅肥);(2)150 kg/hm^2 ;(3)600 kg/hm^2 。这样共 6 个处理组合。各处理均按每公顷施用尿素(含 N $\geq 46.4\%$)520 kg、磷酸二铵(含 N 18%、 P_2O_5 46%)225 kg、硫酸钾($\text{K}_2\text{O} \geq 32\%$)150 kg。尿素分 4 次施用:移栽前(4/10)、分蘖期(3/10)、抽穗期(2/10)、乳熟期(1/10),磷酸二铵移栽前一次施用,硫酸钾分两次施用:移栽前(2/3)、抽穗期(1/3)。硅酸钙于移栽前一次施用。移栽前 72h 施用基肥,肥料施用后搅拌。

盆栽稻株不施用杀虫剂,按照水稻各生育期的需水规律浇水,浇水量最多以不漫过桶沿为限。

1.2 叶鞘硅细胞数、土壤和稻茎硅含量

采用扫描电镜测定水稻叶鞘中的硅细胞数量。从 60 日龄水稻植株顶叶下第四片叶叶鞘的中部取样。用于扫描电镜观察的样品采用 4% 戊二醛固定,保存于 5 °C 的冰箱内,经系列乙醇脱水后干燥,将样品粘于观察台上,真空喷金,置于日立 S-450 型扫描电镜下观察并拍照。各处理在 800 × 镜下计数 3 个视眼中的硅细胞个数。

从 60 日龄稻株上剪取第 1 茎节之上 12 cm 长的稻茎用于硅含量测定。稻茎用自来水冲洗,以去除可能存在的泥土,在 105 °C 下杀青 30 min,然后在 70 °C 的恒温干燥箱中干燥 48 h。干燥稻茎用食物粉碎机粉碎,过 60 目筛的粉末用于测定二氧化硅含量^[22]。

用于测定土壤硅含量的样品包括移栽水稻前的土壤和移栽后 30 d 的土壤,后者按照硅肥处理将不同品种盆栽土壤进行合并,共 4 种土壤样品。土壤样品在 105 °C 恒温箱中烘干至恒重,粉碎后过 80 目筛的样品用于测定硅含量。测定方法同稻茎样品。

1.3 二化螟幼虫钻蛀行为

采用稻茎目测观察幼虫的钻蛀行为。选择长势和稻茎大小相似的移栽后 60 日龄左右的稻株,先将稻株从基部拔出,洗净后从露出地面的第 1 个节开始往上连同叶鞘剪取 12 cm 稻茎。稻茎在试验前 2 h 内剪取。所用二化螟幼虫为采自茭白田越冬幼虫饲养后的第一代蚁螟和 3 龄幼虫。

每根稻茎用骆驼毛笔接幼虫 1 头,幼虫接在节间的中部。然后单茎置于有 3 mL 木村 B 水稻培养液的玻璃指形管(直径 2.0 cm、长 15.0 cm)中,管口用棉花塞密封。接虫后目测连续观察各稻茎上的幼虫行为,一人同时观察 3 头幼虫,钻入后观察结束或最长连续观察 90 min(蚁螟)或 120min(3 龄幼虫)。采用秒表记录接虫、开始钻蛀和钻入的时点。为克服不同批次幼虫间可能存在的差异,每次对各处理稻茎接相同数量的同一批幼虫,直至 3 个硅肥处理稻茎上观察的蚁螟数达到 25 头或 3 龄幼虫数达到 20 头。行为观察在室内自然温度、光照条件下进行(温度 24—27 °C;光照强度 300—550 lx)。

二化螟幼虫钻蛀行为分为^[21]未钻蛀、开始钻蛀、蛀入。未钻蛀是指从开始接虫到观察结束,幼虫一直在稻茎上爬行,或静止在稻茎的某个部位不动但不会用口器撕咬稻茎表皮组织,不会产生稻茎组织碎屑。开始钻蛀是爬行幼虫在稻茎某个部位静止不动,头部左右摆动,同时用上颚撕咬稻茎表皮组织,会产生少量细小的稻茎组织碎屑。蛀入是指幼虫在稻茎上选择某一位点并开始钻蛀后,连续或间断的在同一位点钻蛀直至虫体腹部末端全部没入蛀孔为止。蛀入耗时是指在观察时间内,二化螟幼虫最后一次开始钻蛀直至蛀入,其间所用的时间。

根据记录数据,计算钻蛀率和蛀入率。钻蛀率(%) = 钻蛀幼虫数 × 100 / 观察幼虫总数,蛀入率(%) = 蛀入幼虫数 × 100 / 观察幼虫总数。

1.4 数据分析

采用 χ^2 检验分析硅肥处理(按照硅肥处理集合不同品种上的数据)和水稻品种(按照品种集合不同硅肥处理上的数据)对二化螟幼虫钻蛀率和蛀入率影响的显著性。采用双因素方差分析法分析硅肥处理和水稻品种对二化螟幼虫蛀入耗时、水稻叶鞘硅细胞数、稻茎硅含量影响的显著性,存在显著影响时采用 LSD 法比较处理之间的差异显著性。采用单因素方差分析检验硅肥处理对土壤硅含量的影响,用 LSD 法比较处理之间的差异显著性。最后将不同品种和硅肥处理组合上的二化螟幼虫钻蛀率、蛀入率和蛀入耗时与不同品种施用硅肥处理后的稻茎 SiO₂ 含量进行相关分析,以明确二化螟幼虫钻蛀行为与稻茎硅含量之间的关系。

2 结果与分析

2.1 叶鞘硅细胞数与土壤和稻茎硅含量

2.1.1 叶鞘硅细胞数

叶鞘硅细胞数在不同水稻品种之间存在显著差异($F = 364.55$, $df = 1, 18$, $P < 0.001$),硅肥处理($F = 0.13$, $df = 2, 18$, $P = 0.878$)及其与水稻品种间的交互作用($F = 0.25$, $df = 2, 18$, $P = 0.786$)没有显著改变

叶鞘的硅细胞数量(图1)。中抗品种盐丰47的叶鞘硅细胞数平均比感虫品种汕优63高50.9%。

2.1.2 土壤和稻茎硅含量

施用硅肥或不施硅肥盆栽33 d后,盆栽土壤 SiO_2 含量与盆栽前土壤 SiO_2 含量之间存在显著差异($F = 275.30$, $df = 3, 11$, $P < 0.001$)(图2)。相对于处理前的土壤,未施用硅肥和低硅肥处理的盆栽土壤中 SiO_2 含量分别下降了14.2%和11.0%,但是在高硅肥处理的盆栽土壤中 SiO_2 含量却上升了28.7%(图2)。

施用硅肥显著提高了稻茎的 SiO_2 含量($F = 86.82$, $df = 2, 18$, $P < 0.001$)(图2)。稻茎 SiO_2 含量还受水稻品种($F = 375.29$, $df = 1, 18$, $P < 0.001$)及品种与硅肥处理间交互作用($F = 14.78$, $df = 2, 18$, $P = 0.001$)的显著影响。中抗品种盐丰47的稻茎 SiO_2 含量随着施用硅肥的增大而顺次显著升高;在感虫品种汕优63中,稻茎 SiO_2 含量未随硅肥施用量的增大而进一步升高。

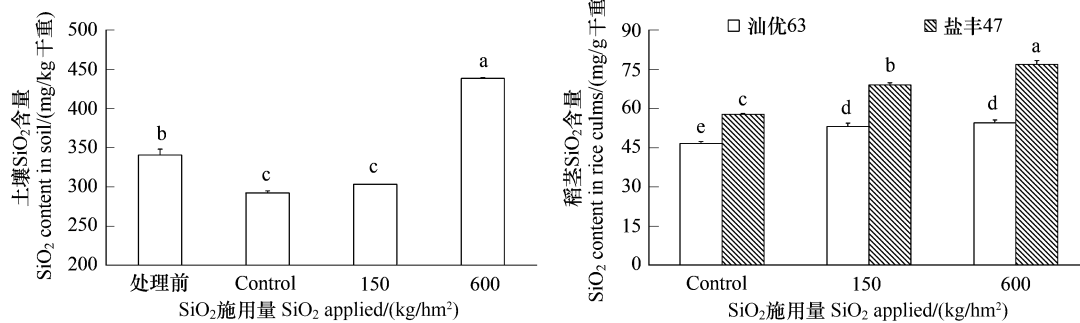


图2 硅肥处理对土壤和汕优63与盐丰47稻茎二氧化硅含量的影响

Fig. 2 SiO_2 content in culms of Shanyou63 and Yanfeng47 rice plants and soils untreated or treated with calcium silicate

2.2 二化螟幼虫钻蛀行为

2.2.1 钻蛀率

蚁螟和三龄幼虫钻蛀率均随硅肥施用量增加而逐渐下降,蚁螟在高硅肥处理汕优63和盐丰47水稻上的钻蛀率分别比各自的对照低20%和28%,三龄幼虫在高硅肥处理汕优63和盐丰47水稻上的钻蛀率分别比各自的对照低20%和5%(图3)。但是,硅肥处理整体上对蚁螟和三龄幼虫钻蛀率均没有显著影响(蚁螟: $\chi^2 = 5.67$, $df = 2$, $P = 0.059$;三龄幼虫: $\chi^2 = 1.28$, $df = 2$, $P = 0.526$);对不同硅肥处理水平之间进行两两比较时,发现高硅肥处理相对于对照显著降低蚁螟的钻蛀率($\chi^2 = 5.33$, $df = 1$, $P = 0.021$)。水稻品种对二化螟蚁螟和三龄幼虫钻蛀率没有显著影响(蚁螟: $\chi^2 = 0.01$, $df = 1$, $P = 0.922$;三龄幼虫: $\chi^2 = 0.07$, $df = 1$, $P = 0.795$)。

2.2.2 蛀入率

施用硅肥($\chi^2 = 3.10$, $df = 2$, $P = 0.212$)和水稻品种($\chi^2 = 0.47$, $df = 1$, $P = 0.492$)对二化螟蚁螟蛀入率均没有显著影响(图4)。但是相对于各品种的对照,蚁螟在低硅肥处理汕优63和盐丰47上的蛀入率分别下降12%和8%,在高硅肥处理汕优63和盐丰47上的蛀入率分别下降20%和4%。

对三龄幼虫,施用硅肥($\chi^2 = 17.50$, $df = 2$, $P < 0.001$)和水稻品种($\chi^2 = 9.98$, $df = 1$, $P = 0.002$)对蛀入率均存在显著影响(图4)。相对于各品种的对照,三龄幼虫在低硅肥处理汕优63和盐丰47上的蛀入率分

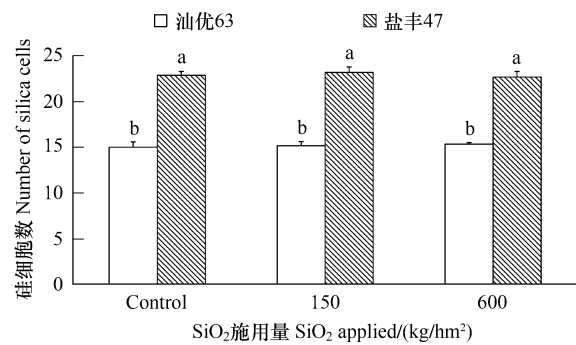


图1 硅肥处理汕优63和盐丰47品种60日龄植株叶鞘的硅细胞数

Fig. 1 Number of silica cells in sixty-day-old Shanyou63 and Yanfeng47 rice plants untreated or treated with calcium silicate

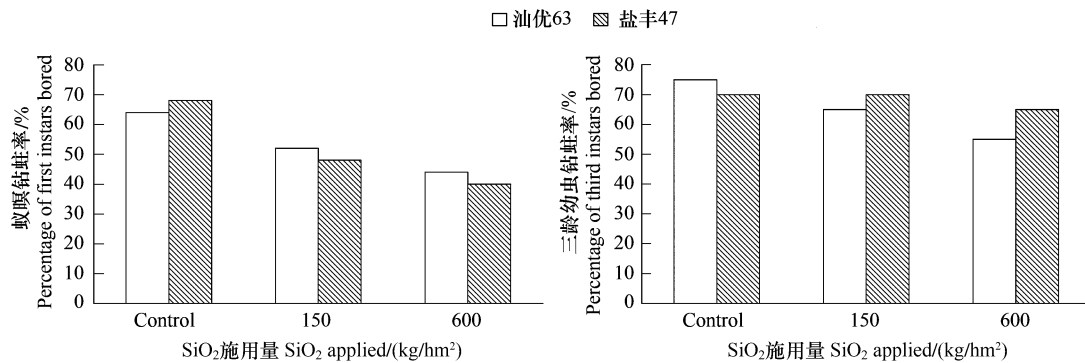


图3 二化螟蚁螟和三龄幼虫在硅肥处理的汕优63和盐丰47稻茎上的钻蛀率

Fig. 3 Percentage of first and third instar larvae of *Chilo suppressalis* boring on Shanyou63 and Yanfeng47 rice plants untreated or treated with calcium silicate

别下降10%和10%,在高硅肥处理汕优63和盐丰47上的蛀入率分别下降40%和20%。

可见,随着硅肥施用量的增大,二化螟幼虫,特别是三龄幼虫,在不同品种稻茎上的蛀入率的差别逐渐缩小;也就是说,相对于中抗品种盐丰47而言,施用硅肥能在更大程度上阻碍二化螟幼虫在感虫品种汕优63上的成功钻蛀;同时,从蚁螟和三龄幼虫比较来看,施用硅肥对三龄幼虫成功蛀入的影响更大。

2.2.3 蛀入耗时

施用硅肥显著延长蚁螟蛀入耗时($F=2.43$, $df=2, 40$, $P=0.043$),水稻品种($F=0.92$, $df=1, 40$, $P=0.344$)及其与硅肥的交互作用($F=0.31$, $df=2, 40$, $P=0.734$)对蚁螟蛀入耗时没有显著影响(图5)。在未施硅肥的汕优63上,蚁螟蛀入耗时显著短于其在高硅肥处理的汕优63和盐丰47上的蛀入耗时。相对于各品种的对照而言,蚁螟在高硅肥处理汕优63和盐丰47上的蛀入耗时分别延长了112.9%和35.1%。

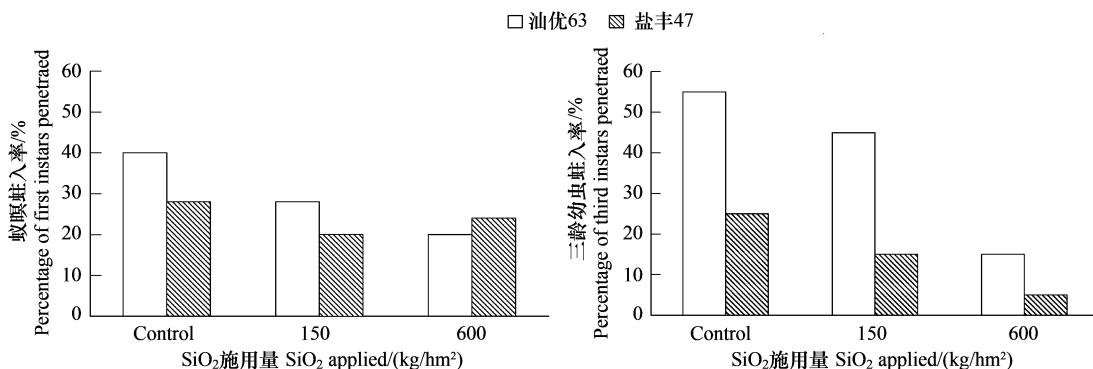


图4 二化螟蚁螟和三龄幼虫在硅肥处理的汕优63和盐丰47稻茎上的蛀入率

Fig. 4 Percentage of first and third instar larvae of *Chilo suppressalis* penetrating on Shanyou63 and Yanfeng47 rice plants untreated or treated with calcium silicate

硅肥处理和水稻品种对二化螟三龄幼虫蛀入耗时的影响与其对蚁螟的影响不同,水稻品种对三龄幼虫蛀入耗时存在显著影响($F=7.74$, $df=1, 31$, $P=0.010$),三龄幼虫在盐丰47稻茎上的蛀入耗时比在汕优63上延长77%—163%(图5)。施用硅肥($F=0.29$, $df=2, 31$, $P=0.750$)及其与水稻品种的交互作用($F=0.01$, $df=2, 31$, $P=0.923$)对三龄幼虫蛀入耗时没有显著影响(图5),尽管三龄幼虫在低硅肥处理汕优63和盐丰47上的蛀入耗时比在各自的对照上延长32.9%和12.1%。

2.3 稻茎硅含量与二化螟幼虫钻蛀行为间的关系

将二化螟幼虫在不同处理组合上的钻蛀率、蛀入率和蛀入耗时与不同品种施用硅肥处理后的稻茎SiO₂含量进行相关分析,发现三龄幼虫蛀入率和三龄幼虫蛀入耗时与稻茎SiO₂含量之间存在显著的线性相关关系

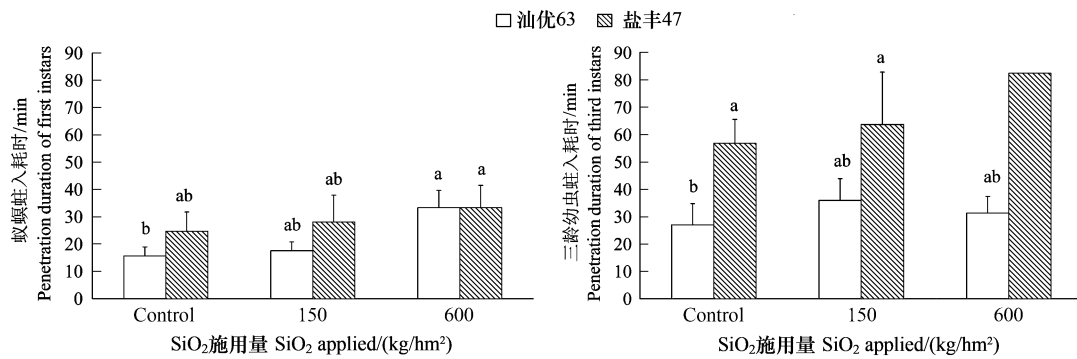


图5 二化螟蚁螟和三龄幼虫在硅肥处理的汕优63和盐丰47稻茎上的蛀入耗时

Fig. 5 Penetration duration of first and third instar larvae of *Chilo suppressalis* on Shanyou63 and Yanfeng47 rice plants untreated or treated with calcium silicate

(图6)。三龄幼虫蛀入率随稻茎 SiO₂ 含量的增大而显著下降 ($F = 9.18, df = 1, 5, P = 0.039$); 三龄幼虫蛀入耗时随稻茎 SiO₂ 含量增大而显著延长 ($F = 41.85, df = 1, 5, P = 0.003$)。

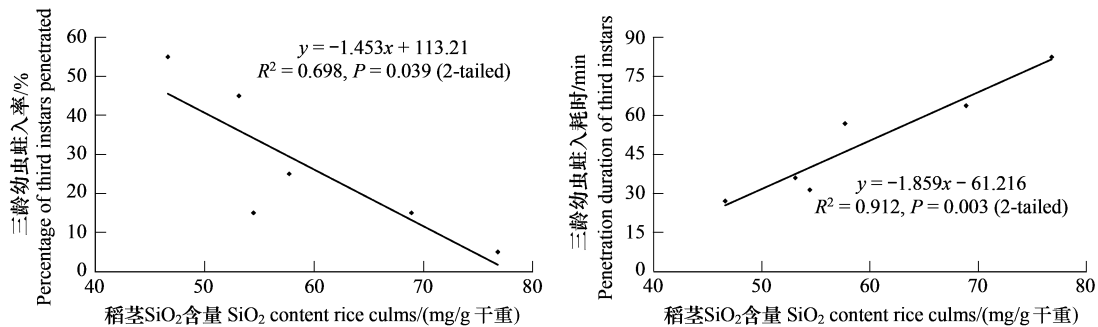


图6 稻茎二氧化硅含量与二化螟幼虫钻蛀行为的相关关系

Fig. 6 Correlation between SiO₂ content in rice culms and larval boring behavior of *Chilo suppressalis*

3 讨论

尽管越来越多的证据表明硅有助于增强植物的抗虫性,然而人们较少涉及硅介导的植物抗虫性增强的机制^[10]。本文发现,高硅肥处理与对照相比,二化螟蚁螟的钻蛀率显著降低(图3),三龄幼虫的蛀入率显著下降(图4)。这些结果表明施用硅肥阻碍二化螟幼虫的钻蛀行为,从而增强水稻对二化螟的抗性。水稻是典型的硅富集植物,本文结果(图2)证实了稻株中的硅含量往往达到土壤硅含量的100倍以上^[4]。硅富集在水稻茎秆、叶鞘和叶片的表皮细胞,形成“角质-硅双层”结构^[18],这种结构对二化螟幼虫钻蛀形成物理和化学屏障;施用硅肥提高稻株的硅含量(图2),从而增强了这种物理和化学屏障作用,致使二化螟幼虫钻蛀行为受阻(图6)。针对其它害虫曾报道类似结果,如施用硅肥阻碍甘蔗茎螟 *E. saccharina* 对甘蔗茎的钻蛀行为^[8-10]、降低非洲粘虫 *Spodoptera exempta* 和沙漠蝗 *Schistocerca gregaria* 对禾本科杂草的取食^[11]和麦二叉蚜 *Schizaphis graminum* 对小麦植株的选择性^[23]。其次,二化螟幼虫钻蛀本身也可能诱导稻茎产生硅,从而阻碍幼虫钻蛀。例如,禾本科杂草叶片被取食后含有更多的硅^[24];而且植食性昆虫可特异性地诱导植物产生硅介导的物理防御,这种诱导反应足以阻止植食性昆虫进一步取食^[25]。再次,也不排除植株体内的可溶性硅诱导稻茎体内产生生物化学防御反应而增强硅介导的抗虫性。Gomes等^[26]最近发现硅自身或与麦二叉蚜 *S. graminum* 一起可诱导小麦植株防御酶(过氧化酶、多酚氧化酶和苯丙氨酸解氨酶)活性的显著增大。

本试验中,施用硅肥延长二化螟幼虫(特别是蚁螟)的蛀入耗时(图5)。甘蔗茎螟幼虫在钻蛀添加硅肥的甘蔗时也有类似结果^[10]。二化螟幼虫以蚁螟蛀入叶鞘和稻茎为害,三龄时往往转移为害;因此在自然条件

下,施用硅肥将使得幼虫暴露在稻株组织外的时间延长,从而增大幼虫被各种不利环境因素(雨水等)、天敌和人为防治措施(杀虫剂)致死的机会,提高二化螟种群综合治理措施的总体效果,因此增施硅肥作为一种二化螟种群调控措施与其它综合治理措施具有良好的融合性。因此,对于钻蛀性害虫,蛀入率下降和蛀入延迟构成植物抗虫性的重要组分,施用硅肥能增强这种抗虫性。

从不同龄期幼虫之间的比较看,施用硅肥对三龄幼虫成功蛀入的影响大于对蚁螟的影响(图4),但是施用硅肥更多地延长了蚁螟的蛀入耗时(图5)。本文首次发现钻蛀性害虫不同龄期的钻蛀行为对施用硅肥的反应存在差异。目前尚不清楚产生这种差异的具体原因,推测这可能与不同龄期幼虫的取食量、口器(特别是上颚)特点等方面的差异有关,或者与这些因素引起的诱导抗性差异有关^[25]。

本文结果进一步证实了此前报道^[17]的汕优63和盐丰47对二化螟抗性上的差异,而且抗性差异与品种硅细胞数量及硅含量之间具有密切关系;这是不同品种的遗传差异。添加硅肥后,不同品种稻茎硅含量均显著增加,但是盐丰47的稻茎硅含量随施用硅肥的进一步增多而增加,表明盐丰47比汕优63具有更高的硅富集能力,这可能是盐丰47比汕优63对二化螟幼虫钻蛀行为表现出更强抗性的原因之一。尽管如此,相对于各自品种的对照而言,施用硅肥在增强不同品种抗虫性(蛀入率和蛀入耗时)的幅度上存在差异,感虫的汕优63大于相对抗虫的盐丰47。甘蔗不同抗性品种对添加硅肥存在相似反应^[9-10],即感虫品种比抗虫品种从施用硅肥中获得更大幅度的抗虫性提升。我国有近一半的稻田土壤缺乏可获得性硅^[5],因此,水稻生产上对高产感虫品种施用硅肥将获得更高的边际收益。

根据本文结果,施用硅肥可直接阻碍二化螟幼虫的成功蛀入,延长钻蛀时间可增加幼虫暴露于不良环境、天敌及人为防治措施的时间而间接地增强其它综合治理措施的防治效果;感虫品种从施用硅肥中获得更大幅度的抗虫性提升,生产上对高产感虫品种施用硅肥有望获得更大的边际收益。

References:

- [1] Sheng C F, Wang H T, Sheng S Y, Gao L D, Xuan W J. Pest status and loss assessment of crop damage caused by the rice borers, *Chilo suppressalis* and *Tryporyza incertulas* in China. *Chinese Bulletin of Entomology*, 2003, 40(4): 289-294.
- [2] You M S, Wang H C, Yang G. Sustainable management of agricultural insect pests. *Journal of Fujian Agricultural and Forestry University*, 1999, 28(4): 434-440.
- [3] Savant N K, Snyder G H, Datnoff L E. Silicon management and sustainable rice production. *Advances in Agronomy*, 1997, 58: 151-199.
- [4] Ma J F, Miyake Y, Takahashi E. Silicon as a beneficial element for crop plants // Datnoff L E, Snyder G H, Korndorfer G H. *Silicon in Agriculture*. Amsterdam: Elsevier Science, 2001: 17-39.
- [5] Dai W M, Zhang K Q, Duan B W, Zheng K L, Zhuang J Y, Cai R. Genetic dissection of silicon content in different organs of rice. *Crop Science*, 2005, 45: 1345-1352.
- [6] Salim M, Saxena R C. Iron, silica, and aluminum stresses and varietal resistance in rice: effects on whitebacked planthopper. *Crop Science*, 1992, 32: 212-219.
- [7] Laing M, Adandonon A. Silicon and insect management-review // Korndorfer G H. *Proceedings of the III Silicon in Agriculture Conference*. Uberlândia, Brazil: Federal University of Uberlândia, 2005: 41-50.
- [8] Keeping M G, Meyer J H. Calcium silicate enhances resistance of sugarcane to the African stalk borer *Eldana saccharina* Walker (Lepidoptera: Pyralidae). *Agricultural and Forest Entomology*, 2002, 4: 265-274.
- [9] Keeping M G, Meyer J H. Silicon-mediated resistance of sugarcane to *Eldana saccharina* Walker (Lepidoptera: Pyralidae): effects of silicon source and cultivar. *Journal of Applied Entomology*, 2006, 130: 410-420.
- [10] Kvedaras O L, Keeping M G. Silicon impedes stalk penetration by the borer *Eldana saccharina* Walker (Lepidoptera: Pyralidae) in sugarcane. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2007, 125: 103-110.
- [11] Massey F P, Ennos A R, Hartley S E. Silica in grasses as a defence against insect herbivores: contrasting effects on folivores and a phloem feeder. *Journal of Animal Ecology*, 2006, 75: 595-603.
- [12] Nakano K, Abe G, Taketa N, Hirano C. Silicon as an insect resistant component of host plant, found in the relation between the rice stem borer and rice plant. *Japanese Journal of Applied Entomology and Zoology*, 1961, 5: 17-27.
- [13] Djamin A, Pathak M D. Role of silica in resistance to Asiatic rice borer, *Chilo suppressalis* (Walker), in rice varieties. *Journal of Economic*

- Entomology, 1967, 60: 347-351.
- [14] Liu G J, Huang H P, Xie X F, Du L Q, Fang W R. Resistance of early season rice to *Chilo suppressalis* and its biochemical bases. Journal of Southwest Agricultural University, 1998, 20(50): 512-515.
- [15] Luo J, Zhang X X, Zhai B P, Guo Y R. Relationship between borer damage and insect resistance of four rice cultivars in Shanghai. Chinese Journal of Rice Science, 2006, 20(1): 97-101.
- [16] Xu H X, Lu Z X, Chen J M, Zheng X S, Yu X P. Resistance of different rice varieties to the striped stem borer, *Chilo suppressalis*, and its relationship with the morphological and anatomic characteristics of rice. Acta Phytopythologica Sinica, 2006, 33(3): 241-245.
- [17] Hao L X, Han Y Q, Hou M L, Liao X L. Resistance of japonica rice varieties in Liaohe Valley to *Chilo suppressalis* and its underlying mechanisms. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 5987-5993.
- [18] Ma J F, Takahashi E. Soil, Fertilizer and Plant Silicon Research in Japan. Amsterdam: Elsevier Science, 2002: 11-45.
- [19] Ma J F, Tamai K, Yamaji N, Mitani N, Konishi S, Katsuhara M, Ishiguro M, Murata Y, Yano M. A silicon transporter in rice. Nature, 2006, 440: 688-691.
- [20] Sasamoto K. Resistance of the rice plant applied with silicate and nitrogenous fertilizers to the rice stem borer, *Chilo suppressalis* Walker. Proceedings of Faculty of Liberal Arts and Education of Yamanashi University, Japan, 1961, 3: 73.
- [21] Wu J C, Xu J X, Liu R H, Wu S J. Observation on the boring behavior of first instar larvae of *Scirpophaga incertulas*. Chinese Bulletin of Entomology, 1999, 26(2): 101, 112.
- [22] Dai W M, Zhang K Q, Duan B W, Sun C X, Zheng K L, Cai R, Zhuang J Y. A simple method for analyzing silicon content in rice. Chinese Journal of Rice Science, 2005, 19(5): 460-462.
- [23] Basagli M A B, Moraes J C, Carvalho G A, Ecole C C, Goncalves-Gervasio P R R. Effect of sodium silicate application on the resistance of wheat plants to the green-aphids *Schizaphis graminum* (Rond.) (Hemiptera: Aphididae). Neotropical Entomology, 2003, 32(4): 659-663.
- [24] McNaughton S J, Tarrants J L. Grass leaf silification: Natural selection for an inducible defense against herbivores. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1983, 80: 790-791.
- [25] Massey F P, Ennos, A R, Hartley S E. Herbivore specific induction of silica-based plant defences. Oecologia, 2007, 152: 677-683.
- [26] Gomes F B, Moraes J C, Santos C D, Goussain M M. Resistance induction in wheat plants by silicon and aphids. Scientia Agricola, 2005, 62: 547-551.

参考文献:

- [1] 盛承发,王红托,盛世余,高留德,宣维健. 我国稻螟灾害的现状与损失估计. 昆虫知识,2003,40(4): 289-294.
- [2] 尤民生,王海川,杨广. 农业害虫的持续控制. 福建农业大学学报,1999,28(4): 434-440.
- [14] 刘光杰,黄和平,谢秀芳,桂丽琴,方蔚然. 早稻品种对二化螟的抗性及其生化基础研究. 西南农业大学学报,1998,20(50): 512-515.
- [15] 罗举,张孝羲,翟保平,郭玉人. 上海地区四个水稻品种抗虫特性与螟害的关系. 中国水稻科学,2006,20(1): 97-101.
- [16] 徐红星,吕仲贤,陈建明,郑许松,俞晓平. 不同水稻品种对二化螟的抗性及其与形态学和解剖学特征的关系. 植物保护学报,2006,33(3): 241-245.
- [17] 郝丽霞,韩永强,侯茂林,廖晓兰. 辽河流域栽培稻对二化螟(*Chilo suppressalis*)的抗性及其机制. 生态学报,2008,28(12): 5987-5993.
- [21] 吴进才,徐建祥,刘仁海,吴树静. 三化螟蚁螟钻蛀行为观察. 昆虫知识,1999,26(2): 101,112.
- [22] 戴伟民,张克勤,段彬伍,孙成效,郑康乐,蔡润,庄杰云. 测定水稻硅含量的一种简易方法. 中国水稻科学,2005,19(5): 460-462.

2008 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2009 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	8956	1	生态学报	1.669
2	应用生态学报	7979	2	植物生态学报	1.656
3	植物生态学报	3742	3	应用生态学报	1.632
4	西北植物学报	3584	4	生物多样性	1.474
5	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3460	5	生态学杂志	1.276
6	植物生理学通讯	3187	6	植物学通报	1.058
7	生态学杂志	3148	7	西北植物学报	1.046
8	遗传学报	2142	8	植物生理与分子生物学 学报	1.034
9	植物生理与分子生物学学报	1855	9	遗传学报	0.887
10	昆虫学报	1580	10	遗传	0.835

★《生态学报》2008 年在核心版的 1868 种科技期刊排序中总被引频次 8956 次,全国排名第 2;影响因子 1.669,全国排名第 14;第 1~8 届连续 8 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任: 孔红梅

执行编辑: 刘天星 段 靖

生态学报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 30 卷 第 21 期 (2010 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 30 No. 21 2010

编 辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 冯宗炜
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂
发 行 科 学 出 版 社
地址:东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail:journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel:(010)62941099
www.ecologica.cn
Shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief FENG Zong-Wei
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel:(010)64034563
E-mail:journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元