陈建,漆学伟,洪霖,等.不同玉米品种对草地贪夜蛾田间抗性与室内适合度评估[J].江西农业大学学报,2024,46(6):1466-1477.
CHEN J,QI X W,HONG L,et al.Field resistance and laboratory fitness of different maize varieties to *Spodoptera frugiperda*[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2024,46(6):1466-1477.

不同玉米品种对草地贪夜蛾田间抗性与室内适合度评估

陈　建,漆学伟,洪　霖,梁玉勇*

(江西省农业科学院 植物保护研究所,江西 南昌 330200)

摘要:【目的】草地贪夜蛾*Spodoptera frugiperda*(J. E. Smith)是玉米的主要害虫,筛选并利用抗性品种是有效控制其为害最经济环保的策略。【方法】首先通过调查田间自然感虫状态下的玉米叶片为害指数和果穗为害指数对47个玉米品种进行了草地贪夜蛾抗性鉴定,随后选用田间抗性差异较大的4个玉米品种的叶片室内饲养其幼虫,评估寄主适合度,最后测定玉米叶片生化物质含量并分析其与叶片为害指数、寄主适合度的相关性。【结果】调查发现47个玉米品种对草地贪夜蛾的抗性在苗期和果穗期有差异,在苗期所有品种抗性均较差,有39个为敏感品种,7个为高感品种,仅京科968具有中抗水平;在果穗期,有8个品种表现高度抗性,5个品种达到抗性标准,13个中抗品种,7个敏感品种,14个高感品种;高抗的品种有万鲜甜159、美玉爽甜糯502、桂甜571、赣科甜9号、百沐达、桂甜570、正甜68、荆恒18-1。室内饲养表明草地贪夜蛾取食4个玉米品种叶片适合度由高到低为:锐玉926、赣科甜8号、京科968、双萃270,适合度指标分别为9.57、7.12、6.40、6.13;生化物质含量测定和相关性分析发现该害虫田间叶片为害指数与玉米叶片还原糖显著正相关(R=0.940,P=0.030),室内寄主适合度与单宁、总生物碱含量显著负相关(单宁:R=-0.910,P=0.045;总生物碱含量:R=-0.926,P=0.037),也与直链淀粉、总糖含量负相关,但无显著差异。【结论】筛选得到1个苗期中抗、8个果穗高抗草地贪夜蛾的玉米品种。由于自然感虫状态下不同玉米品种对草地贪夜蛾抗性都较差,目前应开发其他绿色防控技术减少其为害。证明了室内适合度则与田间抗性结果有差异,同时挖掘出还原糖、单宁、总生物碱可能参与玉米防御害虫,为进一步筛选抗虫代谢物提供依据。

关键词:草地贪夜蛾;玉米品种;田间抗性;适合度
中图分类号:S433.4;S513　　**文献标志码:**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**
文章编号:1000-2286(2024)06-1466-12

Field resistance and laboratory fitness of different maize varieties to *Spodoptera frugiperda*

CHEN Jian, QI Xuewei, HONG Lin, LIANG Yuyong*

(Institute of Plant Protection, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China)

收稿日期:2024-05-26　　**修回日期:**2024-07-28
基金项目:江西省重点研发计划项目(20212BBF63043)和江西现代农业科研协同创新专项(JXXTCX202103)
Project supported by Key R&D Projects in Jiangxi Province (20212BBF63043) and Jiangxi Modern Agricultural Scientific Research Collaborative Innovation Project (JXXTCX202103)
作者简介:陈建,助理研究员,硕士,orcid.org/0000-0001-5724-5488,chenjian2918@163.com;*通信作者:梁玉勇,副研究员,博士,主要从事害虫综合防控研究,orcid.org/0000-0001-7872-1666,lyuyiong@163.com。
©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

Abstract: [**Objective**] *Spodoptera frugiperda* is one of main pests damaging maize. It is the most economical and environmentally friendly strategy to control *S. frugiperda* by selecting and using resistant maize variety. [**Method**] In this study, the field resistance of 47 maize varieties to *S. frugiperda* was evaluated by leaf damage level and ear damage level under natural infection in the field; and the laboratory fitness of *S. frugiperda* fed on 4 maize varieties which field resistance varied greatly was detected; finally, biochemical substances content of these maize leave were determined and their correlation with leaf damage index and feeding fitness was analyzed. [**Result**] The results showed that the resistance of 47 maize varieties to *S. frugiperda* was different between seedling stage and earing stage. At the seedling stage, there were also 39 sensitive varieties and 7 highly sensitive varieties and only Jingke 968 reached the medium resistance level. At the ear stage, 8 varieties showed high resistance, 5 varieties reached the resistance standard, 13 varieties were moderately resistant, 7 varieties were sensitive, and 14 varieties were highly sensitive. The varieties with high resistance were Wanxiantian 159, Meiyushuangtiannuo 502, Guitian 571, Ganketian 9, Baimuda, Guitian 570, Zhengtian 68, Jingheng 18-1. The host suitability index of *S. frugiperda* fed on 4 maize varieties ranking from high to low were Ruiyu 926, Ganketian 8, Jingke 968 and Shuangcui 270, and host suitability index were 9.57, 7.12, 6.40, and 6.13, respectively. The leaf damage index in the field was positively correlated with reducing sugar content of maize leave (R=0.940, P=0.030), and the host suitability index was negatively correlated with tannin and total alkaloid content (tannin: R=−0.910, P=0.045; total alkaloid: R=−0.926, P=0.037), it was also negatively correlated with amylose and total sugar content, but there was no significant difference. [**Conclusion**] One maize variety with medium resistance in seeding stage and 8 maize varieties with high ear resistance were screened. Due to the poor resistance of different maize varieties to *S. frugiperda* under natural conditions, other green control technologies should be developed to reduce damage of this pest. This study also proved that the indoor fitness was different from the field resistance results. At the same time, it was found that reducing sugar, tannin and total alkaloid may be involved in maize defense pests, which provided a research basis for further screening of insect-resistant metabolites.

Keywords: *Spodoptera frugiperda*; maize varieties; pest resistance; fitness

【研究意义】草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*(J. E. Smith)是起源于美洲热带和亚热带的重大迁飞性与杂食性害虫[1],自 2018 年底入侵中国以来,已扩散至 27 个省(区、市)[2]。草地贪夜蛾以幼虫取食为害,可咬食作物叶片、生长点、果实,造成作物减产或绝收,对我国的粮食安全造成了重大威胁[3]。2023 年农业农村部颁布的《2023 年草地贪夜蛾防控技术方案》指出,需要科学选择种植抗耐虫品种防控草地贪夜蛾[4]。因此,筛选并利用抗性品种对玉米绿色安全生产至关重要。【前人研究进展】植物抗耐虫性是植物和害虫在长期协同进化、优胜劣汰过程中形成的一种自我保护策略,其可使植物免受或少受害虫取食为害[5]。扩散至我国的草地贪夜蛾以玉米型为主,也主要为害玉米,因此利用玉米自身抗耐虫性是解决草地贪夜蛾为害的有效途径之一[6]。然而,许多玉米品种对草地贪夜蛾抗性较弱,例如张楠等[6]通过统计叶片为害程度评估了 28 个玉米品种对草地贪夜蛾抗性,结果未发现高抗和抗虫品种,因此需要结合多种因素优化玉米抗性品种筛选方案。前人研究表明玉米抗耐虫性与自身次生代谢物和营养成分相关,如欧洲玉米螟 *Ostrinia nubilalis* 更倾向于在可溶性糖含量高的玉米植株上产卵[7];玉米抗蚜性与叶片可溶性糖和蛋白含量显著相关[8];二点委夜蛾 *Athetis lepigone* 对玉米的适应性也与叶片中可溶性糖、蛋白质和氨基酸含量呈正相关,但与单宁、总酚含量呈负相关[9]。

【本研究切入点】目前抗草地贪夜蛾玉米品种较少,抗性机制不清[6],筛选草地贪夜蛾抗性玉米品种并探究其与营养成分和次生代谢物关系,有助于加快玉米抗虫育种进程。【拟解决的关键问题】本研究拟通过 47 个玉米品种对草地贪夜蛾田间抗性评价筛选出抗性水平差异较大的几种玉米品种,对这些品种进行草地贪夜蛾室内寄主适合度测定与次生代谢物、营养成分测定,以期筛选出对草地贪夜蛾抗性较高的玉米品种并阐明其物质代谢基础,为抗性品种选育与大田应用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 大田玉米种植和管理

不同玉米品种对草地贪夜蛾抗性试验选在江西省南昌市南昌县八一乡板联村(28°33′ N,115°56′ E)进行,该试验地南北长 44 m、东西宽 25 m,种植面积为 1 100 m^2。在该试验地四周设置 3 m 隔离行,种植玉米品种赣科甜 8 号,隔离行中间平均分为 3 个小区,每小区内有 47 垄,随机种植 47 个不同品种玉米(部分由江西省农业科学院提供,部分为浙江、福建、广东、广西、湖南等南方省区主栽品种并购买于网上商店),每品种分 1 垄 2 行种植,每行 12 株,行间距 0.4 m。玉米于 2023 年 8 月 6 日播种,当日天气阴转多云,温度 29~36 ℃,相对湿度 70%。在整个试验期间,使用 1 次杀虫剂,8 月 19 日使用甲维盐·虫螨腈悬浮剂(山东亿嘉农化有限公司)防治刚出苗时的草地贪夜蛾以及其他鳞翅目害虫,其余农事操作按统一标准正常进行。

1.2 玉米抗草地贪夜蛾鉴定

经前期观察发现,草地贪夜蛾种群数量远高于其他害虫数量。因此在玉米大喇叭口期调查 47 个玉米品种苗期为害等级来评估对草地贪夜蛾抗性。调查根据叶片损伤程度将叶片受害情况分为 1~9 级[10](表 1)。在收获期调查 47 个品种果穗为害情况,根据前人标准[11]并适当调整建立果穗为害等级标准(表 2)。

表 1 草地贪夜蛾为害玉米叶片情况分级

Tab.1 The criterion of maize leaf damage level to *Spodoptera frugiperda*

为害等级 Damaging levels	为害症状 Damaging symptom
1	无肉眼可见的叶片损伤
2	1~2 片老叶上有少数针孔大小伤口
3	少数(<5 片)叶片上有针孔状或长孔状伤口
4	多数(6~8 片)叶片上出现针孔、圆孔或长矩形伤口(1.3 cm 左右)
5	多数(8~10 片)叶片出现的不规则伤口(>3 cm),叶片膜结构被消化
6	叶片出现几个长矩形伤口(>3cm)或不规则形状伤口
7	叶片出现多个大小不同的长矩形伤口(>30 cm)或不规则形状伤口,50% 的叶片受到损伤
8	绝大多数叶片出现长矩形(>30 cm)或规则伤口,70% 的叶片受到损伤
9	叶片几乎完全被破坏,植株死亡

表 2 草地贪夜蛾为害玉米果穗情况分级

Tab.2 The criterion of maize ear damage level to *Spodoptera frugiperda*

为害等级 Damaging levels	为害症状 Damaging symptom
1	穗顶部有细微损伤,但籽粒无明显损伤
3	玉米穗顶部少数(1~10 颗)籽粒受到损害,穗部受害面积小于 5%
5	玉米穗顶部部分(10~20 颗)籽粒受到较大损害,或穗部中间受到损伤(1~10 颗)
7	玉米穗部顶部受到较大损伤(20~40 颗)或中间受到较大损伤(10~20 颗),果穗形变较小
9	玉米穗部中间受到损伤并导致整个玉米穗形变较大

依照以下公式计算叶片和果穗为害指数:

$$为害指数 = \frac{\sum(各级为害株数 \times 相对级数)}{调查总株数 \times 9} \times 100 \quad (1)$$

1.3 室内种群饲养

草地贪夜蛾种群为 2020 年 5 月采集于江西省南昌市南昌县并饲养至今。幼虫使用人工饲料(主要

成分为小麦胚芽、玉米、麸皮、豆粕、酵母粉)进行室内饲养,成虫使用体积分数10%蜂蜜水补充水分和营养。养虫室饲养条件为温度(27±1)℃、相对湿度(65±5)%、光周期16 L∶8 D。

1.4　室内玉米种植

将4个玉米品种(大田测定为叶片中抗的京科968、叶片高感品种中随机挑选的锐玉926和叶片敏感品种中随机挑选的赣科甜8号、双萃270)种子均匀平铺于底部装有湿棉花的塑料碗中,待玉米长出根芽后栽种于培养盆,每3 d浇一次水,每7 d施一次复合肥,该过程一直在植物培养室(温度(27±1)℃、相对湿度(65±5)%、光周期16 L∶8 D)进行。待玉米长至6叶期时,剪下叶片测定次生代谢物与营养成分测定并饲喂草地贪夜蛾幼虫。用于测定次生代谢物与营养成分的每个品种玉米叶片包含3个重复,每重复为10棵玉米植株上第3片叶的混合物。

1.5　玉米叶片次生代谢物与营养成分测定

使用生化法测定4个玉米品种叶片单宁、总酚、生物碱、总糖、还原糖、可溶性蛋白、直链淀粉、支链淀粉含量。原理与方法如下:单宁类化合物在碱性溶液中,将磷钼酸还原成蓝色化合物,于650 nm处测定吸光值[12];在碱性条件下,酚类物质将钨钼酸还原,产生蓝色化合物,在760 nm处有特征吸收峰,在760 nm处的读取吸光值的计算出总酚含量[13]。利用生物碱与溴甲酚绿反应生成黄色物质,该物质在415 nm有特征吸收峰,检测415 nm的吸光值得到总生物碱含量[14];在碱性条件下,二硝基水杨酸与还原糖共热生成棕红色氨基化合物,检测500 nm的吸光值得到还原糖含量[15]。总糖酸水解为还原糖,检测500 nm的吸光值,计算得样品中的总糖含量[14]。在酸性溶液中,考马斯亮蓝G-250与蛋白质结合形成蓝色复合物测定600 nm吸光值计算得到可溶性蛋白质的含量[16]。使用格锐思直链淀粉含量试剂盒(碘比色法)试剂盒测定直链淀粉的含量。使用格锐思支链淀粉含量试剂盒(碘比色法)测定支链淀粉的含量。

1.6　草地贪夜蛾饲养与生命表统计

将9 cm滤纸平铺于9 cm培养皿中并加蒸馏水润湿,后分别加入4个玉米品种6叶期时的玉米叶段,具体片数依据草地贪夜蛾幼虫大小决定:初期为1片,当幼虫达到3~4龄时加2片,当幼虫为5~6龄时,加4片。每个玉米品种各50个培养皿。每天清除叶片残渣并加入新鲜已湿润叶段,如遇滤纸水分含量过大(看到明水),则需要更换滤纸,记录各幼虫龄期。待化蛹后将蛹放于12孔板中,在孔缝隙放2团湿润棉花,第2天称蛹重。蛹羽化后将1雌1雄放于40 cm×30 cm的保鲜袋中,袋中放入1团体积分数15%蜂蜜水湿润的棉球,并充满空气,用橡皮筋封口,每处理重复6次。每天记录草地贪夜蛾产卵数量并统计成虫死亡数直到所有成虫死完。寄主适合度指标=(雌蛹质量×化蛹率)/未成熟发育时间[17-18]。

1.7　数据分析

使用SPSS 22.0软件进行数据分析,使用Levene' tests对数据进行同质性检测。使用单因素方差分析判别草地贪夜蛾发育历期、适合度、叶片次生代谢物和营养成分等指标的差异性,使用双变量回归分析抗虫指标和玉米叶片物质含量相关性,除为害指数外,所有数据均以平均值±标准误显示。

2　结果与分析

2.1　47个玉米品种对草地贪夜蛾田间抗性

在草地贪夜蛾自然侵染条件下,用玉米叶片为害指数评估47个玉米品种的叶片抗草地贪夜蛾的等级。鉴定出的中抗草地贪夜蛾品种1个,为京科968;另外,敏感品种39个,高感品种7个(表3)。

在草地贪夜蛾自然侵染条件下,用果穗为害指数评估47个玉米品种的果穗抗草地贪夜蛾的等级。鉴定出的高抗草地贪夜蛾品种8个,包括万鲜甜159、美玉爽甜糯502、桂甜571、赣科甜9号、百沐达、桂甜570、正甜68、荆恒18-1;另外,抗虫品种有5个,中抗品种13个,敏感品种7个,高感品种14个(表4)。

表 3 47 个推广玉米品种叶片田间自然抗草地贪夜蛾鉴定

Tab.3 Identification of natural resistance for leaves to *Spodoptera frugiperda* of 47 maize varieties in the field

品种 Variety	叶片为害指数 Leaf damage index	抗性评价 Resistance evaluation	品种 Variety	叶片为害指数 Leaf damage index	抗性评价 Resistance evaluation
京科 968 Jingke968	58.02	MR	粤甜黑珍珠 2 号 Yuetianheizhenzhu2	72.84	S
粤甜 29 号 Yuetian29	62.96	S	赣科甜 9 号 Ganketian9	72.84	S
凤糯 18 Fengnuo18	62.96	S	斯达糯 51 Sidanuo51	72.84	S
华成白糯 5 号 Huachengbainuo5	64.20	S	双色甜 Shuangsetian	72.84	S
艾米歌甜 5 号 Aimigetian5	64.20	S	粤甜 415 Yuetian415	75.31	S
美玉爽甜糯 502 Meiyushuangtiannuo502	65.43	S	万鲜甜 159 Wanxiantian159	76.54	S
双甜 728 Shuangtian728	65.43	S	百沐达 Baimuda	76.54	S
蜜甜糯 2 号 Mitiannuo2	65.43	S	荆恒 18-1 Jingheng18-1	76.54	S
徽甜 3075 Huitian3075	66.67	S	万鲜甜 6188 Wanxiantian6188	76.54	S
桂甜 570 Guitian570	67.90	S	珍珠糯 8 号 Zhenzhunuo8	76.54	S
苏科甜 1506 Suketian1506	67.90	S	桂甜糯 535 号 Guitiannuo535	76.54	S
珍珠糯 600 Zhenzhunuo600	69.14	S	粤甜 16 Yuetian16	77.78	S
苏科糯 11 号 Sukenuo11	69.14	S	赣科甜 10 号 Ganketian10	77.78	S
黑甜糯 168 Heitiannuo168	69.14	S	美粒甜 609 Meilitian609	79.01	S
紫玉糯 839 Ziyunuo839	69.14	S	苏玉糯 5 号 Suyunuo5	79.01	S
桂黑甜糯 621 Guiheitiannuo621	69.14	S	粤白甜糯 8 号 Yuebaitiannuo8	79.01	S
正甜 68 Zhengtian68	70.37	S	锐玉 926 Ruiyu926	80.25	HS
超甜百香糯 Chaotianbaixiangnuo	70.37	S	佳农 861 Jianong861	80.25	HS
浙甜糯 10 号 Zhentiannuo10	70.37	S	万农甜糯 158 Wannongtiannuo158	80.25	HS
桂甜 571 Guitian571	71.60	S	澳甜糯 75 Aotiannuo75	80.25	HS
赣科甜 8 号 Ganketian8	71.60	S	粤白糯 6 号 Yuebaitian6	80.25	HS
粤彩糯 2 号 Yuecainuo2	71.60	S	晶甜 16 Jingtian16	80.25	HS
双萃 270 Shuangcui270	71.60	S	鲜甜糯 88 Xiantiannuo88	81.48	HS
郑单 958 Zhengdan958	72.84	S			

HR 代表高抗，R 代表抗，MR 代表中抗，S 代表感虫，HS 代表高感。

HR stands for high resistance, R stands for resistance, MR stands for neutral resistance, S stands for susceptibility, HS stands for high susceptibility.

表 4　47 个推广玉米品种玉米果穗田间自然抗草地贪夜蛾鉴定

Tab.4　Identification of natural resistance for ears to *Spodoptera frugiperda* of 47 maize varieties in the field

品种 Variety	果穗为害指数 Ear damage index	抗性评价 Resistance evaluation	品种 Variety	果穗为害指数 Ear damage index	抗性评价 Resistance evaluation
万鲜甜 159 Wanxiantian159	4.81	HR	苏玉糯 5 号 Suyunuo5	19.63	MR
美玉爽甜糯 502 Meiyushuangtiannuo502	5.56	HR	粤甜 29 号 Yuetian29	19.63	MR
桂甜 571 Guitian571	6.67	HR	粤白甜糯 8 号 Yuebaitiannuo8	20.74	S
赣科甜 9 号 Ganketian9	7.41	HR	桂甜糯 535 号 Guitiannuo535	21.11	S
百沐达 Baimuda	9.26	HR	郑单 958 Zhengdan958	22.22	S
桂甜 570 Guitian570	9.26	HR	双甜 728 Shuangtian728	22.22	S
正甜 68 Zhengtian68	9.63	HR	佳农 861 Jianong861	22.96	S
荆恒 18-1 Jingheng18-1	9.63	HR	粤甜黑珍珠 2 号 Yuetianheizhenzhu2	22.96	S
晶甜 16 Jingtian16	10.37	R	蜜甜糯 2 号 Mitiannuo2	24.07	S
万鲜甜 6188 Wanxiantian6188	11.11	R	万农甜糯 158 Wannongtiannuo158	25.93	HS
斯达糯 51 Sidanuo51	11.85	R	华成白糯 5 号 Huachengbainuo5	27.04	HS
粤甜 16 Yuetian16	13.70	R	苏科甜 1506 Sukenuo1506	28.15	HS
艾米歌甜 5 号 Aimigetian5	14.81	R	超甜百香糯 chaotianbaixiangnuo	28.89	HS
赣科甜 10 号 Ganketian10	15.19	MR	珍珠糯 600 Zhenzhunuo600	30.37	HS
美粒甜 609 Meilitian609	15.56	MR	苏科糯 11 号 Sukenuo11	30.37	HS
珍珠糯 8 号 Zhenzhunuo8	15.93	MR	澳甜糯 75 Aotiannuo75	30.74	HS
紫玉糯 839 Ziyunuo839	16.30	MR	黑甜糯 168 Heitiannup168	30.74	HS
双色甜 Shuangsetian	16.30	MR	双萃 270 Shuangcui270	32.22	HS
桂黑甜糯 621 Guiheitiannuo621	16.30	MR	粤白糯 6 号 Yuebainuo6	35.19	HS
赣科甜 8 号 Ganketian8	16.30	MR	锐玉 926 Ruiyu926	35.19	HS
徽甜 3075 Huitian3075	17.04	MR	浙甜糯 10 号 Zhetiannuo10	35.56	HS
京科 968 Jingke968	18.15	MR	鲜甜糯 88 Xiantiannuo88	37.04	HS
粤彩糯 2 号 Yuecainuo2	18.52	MR	凤糯 18 Fengnuo18	37.04	HS
粤甜 415 Yuetian415	18.89	MR			

HR 代表高抗,R 代表抗,MR 代表中抗,S 代表感虫,HS 代表高感。

HR stands for high resistance, R stands for resistance, MR stands for neutral resistance, S stands for susceptibility, HS stands for high susceptibility.

2.2 4个玉米品种对草地贪夜蛾适合度评估

草地贪夜蛾幼虫取食4个玉米品种(京科968、赣科甜8号、双萃270、锐玉926)的叶片后存活率和发育历期有较大差异(表5)。其中取食锐玉926叶片的草地贪夜蛾幼虫存活率最高,取食京科968、赣科甜8号、双萃270、锐玉926的草地贪夜蛾幼虫发育历期分别为13.88,15.09,15.12,12.84 d,取食锐玉926叶片的草地贪夜蛾幼虫发育历期也显著短于取食其他3种玉米品种叶片的草地贪夜蛾(P<0.05),不同品种玉米叶片喂养对草地贪夜蛾蛹发育历期无显著影响(P>0.05),其发育历期平均值均为9.05~9.39 d。取食4种玉米品种叶片的草地贪夜蛾所发育成的雌虫寿命无显著差异(P>0.05),但取食锐玉926叶片的草地贪夜蛾幼虫发育成的雄虫寿命显著长于取食其他玉米叶的草地贪夜蛾(P<0.05)。

表5 4个玉米品种对草地贪夜蛾发育历期影响

Tab.5 Developmental periods of *Spodoptera frugiperda* fed on 4 maize varieties

发育阶段 Stage	京科968 Jingke968		赣科甜8号 Ganketian8		双萃270 Shuangcui270		锐玉926 Ruiyu926	
	n	发育历期/d Developmental period	n	发育历期/d Developmental period	n	发育历期/d Developmental period	n	发育历期/d Developmental period
1龄 First instar	50	3.94±0.07^{bc}	50	4.38±0.13^{a}	50	4.00±0.04^{b}	50	3.74±0.08^{c}
2龄 Second instar	49	2.06±0.04^{a}	48	1.89±0.09^{a}	40	1.61±0.10^{b}	50	1.54±0.08^{b}
3龄 Third instar	49	1.67±0.07^{ab}	47	1.66±0.09^{ab}	38	1.76±0.15^{a}	50	1.44±0.07^{b}
4龄 Fourth instar	49	1.58±0.21^{ab}	47	1.51±0.09^{b}	37	1.97±0.16^{a}	50	1.24±0.06^{b}
5龄 Fifth instar	48	1.20±0.07^{c}	47	1.28±0.09^{b}	35	1.56±0.16^{ab}	49	1.59±0.08^{a}
6龄 Sixth instar	44	3.77±0.10^{b}	46	4.38±0.18^{a}	34	4.32±0.14^{a}	49	3.27±0.08^{c}
幼虫 Larva	–	13.88±0.10^{b}	–	15.09±0.32^{a}	–	15.12±0.23^{a}	–	12.84±0.10^{c}
蛹 Pupa	43	9.05±0.13^{a}	45	9.10±0.21^{a}	34	9.13±0.25^{a}	49	9.39±0.21^{a}
雌虫 Female	27	6.80±0.37^{a}	23	7.40±0.51^{a}	19	6.40±0.40^{a}	22	7.60±0.40^{a}
雄虫 Male	15	7.00±0.45^{b}	18	6.60±0.51^{c}	12	7.20±0.20^{b}	27	8.00±0^{a}

表中数据为平均值±标准误,使用单因素方差分析进行差异性分析,同行数据的不同小写字母表示P<0.05。

The data in the table are mean±SE.Differences were analyzed by one-way ANOVA.Data with different lowercases in the same row are significantly different at P<0.05.

取食京科968、赣科甜8号、双萃270、锐玉926的草地贪夜蛾未成熟发育历期分别为22.72,23.58,23.39,22.22 d,取食锐玉926叶片的草地贪夜蛾幼虫发育历期也显著短于取食赣科甜8号叶片的草地贪夜蛾(P<0.05),但与取食京科968、双萃270叶片的草地贪夜蛾无显著差异(P>0.05)。取食京科968、赣科甜8号、双萃270、锐玉926的草地贪夜蛾蛹重分别为169.2,186.5,184.1,217.0 mg,取食锐玉926叶片的草地贪夜蛾蛹重显著高于取食其他3个玉米品种叶片(P<0.05),取食京科968叶片的草地贪夜蛾蛹重显著低于取食其他3个玉米品种叶片(P<0.05)。取食京科968、赣科甜8号、双萃270、锐玉926的草地贪夜蛾化蛹率分别为86%、90%、78%、98%。取食4种玉米叶片的草地贪夜蛾单雌产卵量为820~1 120粒,

取食锐玉926叶片的草地贪夜蛾单雌产卵量显著高于取食其他3个玉米品种叶片(P<0.05)。取食京科968、赣科甜8号、双萃270、锐玉926的草地贪夜蛾寄主适合度指标分别为6.40、7.12、6.13、9.57(表6)。

表6　4个玉米品种对草地贪夜蛾适合度指标影响

Tab.6　Fitness index of *Spodoptera frugiperda* fed on 4 maize varieties

参数 Parameter	京科968 Jingke968	赣科甜8号 Ganketian8	双萃270 Shuangcui270	锐玉926 Ruiyu926
未成熟发育时间/d Immature development time	22.72±0.25^{ab}	23.58±0.53^{a}	23.39±0.60^{ab}	22.22±0.24^{b}
雌虫蛹重/mg Female pupal mass	169.2±2.88^{c}	186.5±3.42^{b}	184.1±6.30^{b}	217.0±3.97^{a}
化蛹率/% Pupation rate	86	90	78	98
单雌产卵量 Mean fecundity	818±83.45^{b}	820±96.07^{b}	826±42.26^{b}	1 120±69.35^{a}
寄主适合度指标 Host suitability index	6.40	7.12	6.13	9.57

表中数据为平均值±标准误,使用单因素方差分析进行差异性分析,同行数据的不同小写字母表示P<0.05。

The data in the table are mean±SE.Differences were analyzed by one-way ANOVA.Data with different lowercases in the same row are significantly different at P<0.05.

2.3　4个玉米品种次生代谢物与营养成分分析

4个玉米品种次生代谢物和营养成分含量见表7,叶片为害等级最低的玉米品种京科968其单宁、总酚、总生物碱、还原糖、可溶性蛋白、直链淀粉、支链淀粉、总糖含量含量分别为0.35,0.65,25.21,3.5,1.37,7.80,23.57,8.77 mg/g,其单宁含量显著高于锐玉926,总酚含量显著高于赣科甜8号和双萃270,总生物碱含量显著高于锐玉926(P<0.05)。草地贪夜蛾取食后适合度最低的双萃270其单宁、总酚、总生物碱、还原糖、可溶性蛋白、直链淀粉、支链淀粉、总糖含量含量分别为0.38,0.56,26.62,4.61,1.65,10.3,17.09,8.88 mg/g,其单宁含量显著高于赣科甜8号和锐玉926,总酚含量显著高于赣科甜8号,总生物碱含量显著高于其他3个玉米品种,支链淀粉含量显著低于其他3个玉米品种(P<0.05)。

表7　4个玉米品种次生代谢物和营养成分含量

Tab.7　Contents of secondary metabolites and nutrients in 4 maize varieties

样品 Samples	单宁/(mg·g^{-1}) Tannin	总酚/(mg·g^{-1}) Total phenols	总生物碱/(mg·g^{-1}) Total alkaloids	还原糖/(mg·g^{-1}) Reducing sugar	可溶性蛋白/(mg·g^{-1}) Soluble protein	直链淀粉/(mg·g^{-1}) Amylose	支链淀粉/(mg·g^{-1}) Amylopectin	总糖/(mg·g^{-1}) Total sugar
京科968 Jingke968	0.35±0.015^{ab}	0.65±0.031^{a}	25.21±0.46^{b}	3.50±0.19^{b}	1.37±0.053^{b}	7.80±0.46^{b}	23.57±0.52^{b}	8.77±0.34^{a}
赣科甜8号 Ganketian8	0.32±0.012^{bc}	0.46±0.015^{c}	24.28±0.22^{b}	5.07±0.28^{a}	1.31±0.046^{b}	8.92±0.34^{ab}	21.77±0.48^{b}	8.64±0.02^{a}
双萃270 Shuangcui270	0.38±0.017^{a}	0.56±0.018^{b}	26.62±0.26^{a}	4.61±0.20^{a}	1.65±0.012^{a}	10.30±0.62^{a}	17.09±0.60^{c}	8.88±0.19^{a}
锐玉926 Ruiyu926	0.29±0.019^{c}	0.64±0.012^{a}	22.72±0.23^{c}	5.17±0.18^{a}	1.61±0.044^{a}	8.08±0.19^{b}	26.07±0.85^{a}	8.08±0.33^{a}

表中数据为平均值±标准误,使用单因素方差分析进行差异性分析,同列数据的不同小写字母表示P<0.05。

The data in the table are mean±SE.Differences were analyzed by one-way ANOVA.Data with different lowercases in the same colunm are significantly different at P<0.05.

2.4 玉米抗虫指标与次生代谢物和营养成分含量相关性分析

对田间叶片为害指数、室内寄主适合度与玉米品种次生代谢物和营养成分含量进行相关性分析，结果（表8）显示田间叶片为害指数与玉米品种单宁、总酚、总生物碱、总糖含量呈负相关，但不显著（$P>0.05$），与还原糖含量显著正相关（$R=0.940$，$P=0.030$）；室内寄主适合度与单宁、总生物碱含量显著负相关（单宁：$R=-0.910$，$P=0.045$；总生物碱含量：$R=-0.926$，$P=0.037$），同时也与直链淀粉、总糖含量负相关，但未达到显著水平。

表8 4个玉米品种抗虫指标与次生代谢物和营养成分含量相关性分析

Tab.8 Correlation analysis of the index of insect resistance and the contents of secondary metabolites and nutrients in 4 maize varieties

抗虫指标 Insect resistance index	玉米成分指标 Maize composition index	相关系数R Correlation coefficient	P值 P-value
叶片为害指数 Leaf damage index	单宁	−0.556	0.222
	总酚	−0.183	0.409
	总生物碱	−0.533	0.234
	还原糖	0.940*	0.030
	可溶性蛋白	0.564	0.218
	直链淀粉	0.234	0.383
	支链淀粉	0.139	0.431
	总糖	−0.192	0.404
寄主适合度 Host suitability index	单宁	−0.910*	0.045
	总酚	0.286	0.357
	总生物碱	−0.926*	0.037
	还原糖	0.609	0.196
	可溶性蛋白	0.282	0.359
	直链淀粉	−0.476	0.262
	支链淀粉	0.764	0.118
	总糖	−0.173	0.414

使用双变量回归进行相关性分析，相关系数R表示叶片为害指数、寄主适合度与玉米成分指标的相关性，R为负数代表负向相关，正数代表正向相关，R绝对值越大代表相关性越高；“*”和$P<0.05$代表显著相关。

Data were analyzed by bivariate regression. Correlation coefficient R represents the correlation between leaf damage index, host fitness and maize composition index. Negative R represents the negative correlation, positive R represents the positive correlation, and the greater the absolute value of R, the higher the correlation. “*” and $P<0.05$ mean significant correlation.

3 讨论与结论

草地贪夜蛾为重大迁飞性害虫，具有暴发性为害的特点，筛选抗性玉米品种有利于保证我国玉米产业稳定发展。本研究通过47个玉米品种对草地贪夜蛾田间抗性评价发现京科968叶片对草地贪夜蛾具有中度抗性，万鲜甜159、美玉爽甜糯502、桂甜571、赣科甜9号等品种果穗对草地贪夜蛾具有高度抗性；室内适合度测定表明，草地贪夜蛾取食4个玉米品种叶片适合度由高到低为：锐玉926、赣科甜8号、京科968、双萃270。4个玉米品种抗虫指标与次生代谢物和营养成分含量相关性分析表明，田间叶片为害指数与玉米叶片还原糖显著正相关，室内寄主适合度与单宁、总生物碱含量显著负相关。

从现有主推品种中筛选抗虫种质资源是减少虫害损失最经济有效的方法[19-20]。本研究对47个玉米品种进行了田间自然感虫试验并筛选出了苗期对草地贪夜蛾具有中等抗性的京科968，但47个品种中无高抗和抗性玉米品种。由于普通品种在大田应用较差，开发转基因抗虫玉米或许是最快提高玉米抗虫性的手段[21]。其他研究[22]人工接虫抗性鉴定则鉴定得到了较多高抗和抗性玉米品种，可能原因是人工

接虫数量较少,导致与自然感虫结果差异较大。因此,人工接虫抗性鉴定的抗性品种还需进一步验证其自然感虫抗性才能进一步推广应用。此外,本研究鉴定得到的中抗品种京科968在其他研究中也表现出了对亚洲玉米螟的抗性,其抗性可能与高丁布含量相关[23]。草地贪夜蛾除了为害玉米叶片,也会对玉米果穗造成较大伤害[24]。本研究中,不同玉米品种穗期对草地贪夜蛾抗性具有较大差异,万鲜甜159、美玉爽甜糯502、桂甜571、赣科甜9号等8个品种果穗抗性较强,为害较小。因此在种植这些品种时,玉米果穗期可少使用化学农药防治草地贪夜蛾,以达到减少农药残留的效果。

室内评估不同寄主种类或不同玉米品种对草地贪夜蛾的适合度也是判断草地贪夜蛾转寄主危害或筛选抗性品种的常用手段[25-26]。本研究利用前期田间鉴定的中抗品种京科968、敏感品种双萃270、赣科甜8号以及高感品种锐玉926叶片饲养草地贪夜蛾得出草地贪夜蛾取食双萃270适合度最低,锐玉926适合度最高,其他研究[25]也表明草地贪夜蛾对不同玉米品种适合度不一,探索其内在机理有助于提高玉米抗性。同时,本研究结果与田间抗性试验有差异,可能原因是田间自然抗虫性由寄主挥发物、成虫产卵偏好、寄主营养成分等多因素共同决定[24],室内寄主适合度只能反映寄主抗性的部分作用机理。

大量研究[8-9,27-28]报道植物抗虫性以及对害虫的寄主适合度与其自身次生代谢物和营养成分相关。本研究通过对4个玉米品种抗虫指标与次生代谢物和营养成分含量相关性分析发现,玉米田间叶片为害指数与叶片还原糖含量成正比,这与玉米对二点委夜蛾的适合度影响类似,这可能是由于玉米叶片中还原糖增加时,草地贪夜蛾取食量增大,导致叶片为害增加[29]。本研究也发现室内寄主适合度与单宁、总生物碱含量显著负相关,这也与玉米对玉米蚜*Rhopalosiphum maidis*抗性类似,单宁、总生物碱等次生代谢物能有效抑制草地贪夜蛾等害虫取食[30]。然而,本研究只营养物质或次生代谢物和抗虫指标做了相关分析,并未进一步验证,此外,单宁或总生物碱为一类次生代谢物的总称,探索其抗性机制还需进一步验证特异代谢物的抗虫特性[31]。

本研究虽然未筛选得到苗期对草地贪夜蛾有较高抗性的玉米品种,但筛选得到了万鲜甜159、美玉爽甜糯502、桂甜571、赣科甜9号等8种果穗期抗草地贪夜蛾品种,种植后可有效减轻该害虫对果穗的为害,减少防控成本并保证果穗品质。通过大田玉米苗期为害指标、室内适合度指标与玉米生化物质相关分析,表明还原糖、单宁、总生物碱等物质可能参与玉米和草地贪夜蛾互作,为进一步筛选抗虫代谢物提供了研究依据。

致谢:江西省农业科学院基础研究与人才培养专项(JXSNKYJCRC202338)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

[1] RHETT D,CHRISTIA T,FREDERIC B.Agro-ecological options for fall armyworm (*Spodoptera frugiperda* JE Smith) management:providing low-cost,smallholder friendly solutions to an invasive pest[J].Journal of environmental management,2019,243:318-330.

[2] WU Q L,HE L M,SHEN X J,et al.Estimation of the potential infestation area of newly-invaded fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in the yangtze river valley of China[J].Insects,2019,10(9):298.

[3] 姜玉英,刘杰,谢茂昌,等.2019年我国草地贪夜蛾扩散为害规律观测[J].植物保护,2019,45(6):10-19.
JIANG Y Y,LIU J,XIE M C,et al.Observation on law of diffusion damage of *Spodoptera frugiperda* in China in 2019[J].Plant Protection,2019,45(6):10-19.

[4] 中华人民共和国农业农村部.2023年草地贪夜蛾防控技术方案[EB/OL].(2023-03-01)[2024-04-22].https://www.moa.gov.cn/ztzl/2023cg/jszd_29356/202302/P020230228394509887116.pdf.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China.Technology program of *Spodoptera frugiperda* control[EB/OL].(2023-03-01)[2024-04-22].https://www.moa.gov.cn/ztzl/2023cg/jszd_29356/202302/P020230228394509887116.pdf.

[5] 朱秋云,丛斌.玉米的抗虫性状与次生代谢物的关系[J].安徽农业科学,2006,34(10):2191-2192.
ZHU Q Y,CONG B.Study on the relation between the resistance to the Asian corn borer and secondary metabolites of maize[J].Journal of Anhui agricultural sciences,2006,34(10):2191-2192.

[6] 张楠,陈婷,李小凤,等.54份鲜食玉米品种草地贪夜蛾抗虫性鉴定与评价[J].广东农业科学,2021,48(12):25-32.
ZHANG N,CHEN T,LI X F,et al.Identification and evaluation of resistance of 54 fresh corn hybrids to fall armyworm,

Spodoptera frugiperda[J].Guangdong agricultural sciences,2021,48(12):25-32.

[7] DERRIDJ S,FIALA V,JOLIVET E.Increase of European corn borer (*Ostrinia nubilalis*) oviposition induced by a treatment of maize plants with maleic hydrazide:role of leaf carbohydrate content[J].Entomologia experimentalis et applicata,1986,41(3):305-310.

[8] 武德功,袁梦环,王伟,等.玉米自交系抗蚜性与农艺性状和叶片理化指标的关系[J].西北农业学报,2018,27(6):786-795.
WU D G,YUAN M H,WANG W,et al.Relationship evaluation of aphid resistance with agronomic traits and leaf physical and chemical indexes in inbred lines of maize[J].Acta agriculturae boreali-occidentalis Sinica,2018,27(6):786-795.

[9] 郭婷婷,门兴元,于毅,等.二点委夜蛾适应性与玉米苗营养物质和次生代谢物质含量的关系[J].昆虫学报,2018,61(8):984-990.
GUO T T,MEN X Y,YU Y,et al.Relationship between the adaptability of *Athetis lepigone* (Lepidoptera:Noctuidae) and the contents of nutrients and secondary metabolites in maize seedlings[J].Acta entomologica Sinica,2018,61(8):984-990.

[10] SISAY B,SIMIYU J,MENDESIL E,et al.Fall armyworm,*Spodoptera frugiperda* infestations in East Africa:assessment of damage and parasitism[J].Insects,2019,10(7):195.

[11] PRASANNA B M,BRUCEA,WINTER S,et al.Host plant resistance to fall armyworm[M]// PRASANNA B M,HUESING J E,EDDY R,et al.In fall armyworm in Africa:a guide for integrated pest management.Mexico:Cimmyt,2018:45-62.

[12] WANG Y,YU H W,CHEN C,et al.Beneficial effects of cadmium on plant defense of an invasive plant[J].Environmental and experimental botany,2022,204:105101.

[13] FAN S,LI Q,FENG S,et al.Melatonin maintains fruit quality and reduces anthracnose in postharvest papaya via enhancement of antioxidants and inhibition of pathogen development[J].Antioxidants,2022,11(5):804.

[14] WU Q,GAO H,YOU Z,et al.Multiple metabolomics comparatively investigated the pulp breakdown of four dragon fruit cultivars during postharvest storage[J].Food research international,2023,164:112410.

[15] REN F,LIU M,LIU Y,et al.deciphering microbial diversity and functional codes of traditional fermented whole grain Tianpei from typical regions of China[J].Fermentation,2023,9(1):53.

[16] YANG L,ZHOU J,LAI L,et al.Evaluating physiological changes of grass and semishrub species with seasonality for understanding the process of shrub encroachment in semiarid grasslands[J].Functional plant biology,2020,47(7):628-638.

[17] UYI O O,ZACHARIADES C,HESHULA L U,et al.Developmental and reproductive performance of a specialist herbivore depend on seasonality of,and light conditions experienced by,the host plant[J].PLoS one,2018,13(1):e0190700.

[18] MAW M G.Biology of the tortoise beetle,*Cassida hemisphaerica* (Coleoptera:Chrysomelidae),a possible biological control agent for bladder campion,*Silene cucubalus* (Caryophyllaceae),in Canada[J].Canadian entomologist,1976,108:945-954.

[19] 陈强,张金龙,雷帅,等.不同玉米新品种田间抗蚜性比较[J].玉米科学,2020,28(5):162-168.
CHEN Q,ZHANG J L,LEI S,et al.Comparison of aphid resistance of different common maize varieties in field[J].Journal of maize sciences,2020,28(5):162-168.

[20] 漆学伟,邸宁,梁玉勇,等.江西省52个春玉米品种对玉米蚜和亚洲玉米螟的抗性鉴定[J].江西农业大学学报,2024,46(1):86-96.
QI X W,DI N,LIANG Y Y,et al.Resistance identification of 52 spring maize varieties to *Rhopalosiphum maidis* and *Ostrinia furnacalis* in Jiangxi Province[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2024,46(1):86-96.

[21] 曾强,周伟,郭欢乐,等.不同遗传背景的转*Cry1C*基因玉米品系的室内抗虫性鉴定[J].湖南农业科学,2024(2):1-5.
ZENG Q,ZHOU W,GUO H L,et al.Insect resistance identification of transgenic maize with *Cry1C* gene from different genetic backgrounds in laboratory[J].Hunan agricultural sciences,2024(2):1-5.

[22] 王全文.玉米对草地贪夜蛾的抗性品种资源筛选及抗虫性研究[D].重庆:西南大学,2023.
WANG Q W.Screening of maize germplasm resources resistant to *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera:Noctuidae) and study on maize insect resistance[D].Chongqing:Southwest University,2023.

[23] 刘燊.玉米杂交种京科968抗螟机制研究及其抗性来源遗传分析[D].保定:河北农业大学,2018.
LIU S.The mechanism and genetic analysis of resistant on corn hybrid Jingke 968 to *Ostrinia furnacalis*[D].Baoding:Hebei Agricultural University,2018

[24] 王锟,张丽兰,黎斌,等.山地玉米植株及田间草地贪夜蛾幼虫的空间分布特征[J].南方农业学报,2022,53(10):2894-2903.

WANG K, ZHANG L L, LI B, et al.Spatial distribution of larvae *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) in mountainous corn plants and field[J].Journal of southern agriculture, 2022, 53(10): 2894-2903.

[25] 庄蒙蒙.草地贪夜蛾对4个玉米品种的寄主适合度研究[D].太原:山西农业大学,2022.
ZHUANG M M.Host fitness of *Spodoptera frugiperda* on four maize varieties[D].Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2022.

[26] 雷春媚,肖勇,吴雨洪,等.四种十字花科蔬菜对草地贪夜蛾生长发育和繁殖的影响[J].应用昆虫学报,2023,60(4):1108-1115.
LEI C M, XIAO Y, WU Y H, et al.Development and reproduction of *Spodoptera frugiperda* on four cruciferous vegetables[J].Chinese journal of applied entomology, 2023, 60(4): 1108-1115.

[27] 顾小辉,魏建和,王国全,等.虫害诱导植物合成防御性次生代谢产物的研究进展[J].生命科学研究,2017,21(5):458-465.
GU X H, WEI J H, WANG G Q, et al.Progresses on the defensive secondary metabolites induced by herbivorous insects in plants[J].Life science research, 2017, 21(5): 458-465.

[28] 程柯方,刘俏,程远东,等.寄主植物对不同种群密度樟叶蜂取食后的生理防御响应[J].江西农业大学学报,2022,44(6):1457-1465.
CHENG K F, LIU Q, CHENG Y D, et al.Physiological defense responses of host plants to feeding by different population densities of *Mesoneura rufonota*[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2022, 44(6): 1457-1465.

[29] 张艳蕾,张克信,马岳,等.草地贪夜蛾对玉米品种的取食选择性与玉米叶片中化学物质的关系[J].中国植保导刊,2021,41(6):10-16.
ZHANG Y L, ZHANG K X, MA Y, et al.Feeding selectivity of *Spodoptera frugiperda* on different maize cultivars and its relationship with chemical substances in maize leaves[J].China plant protection, 2021, 41(6): 10-16.

[30] 王怡,赵曼,田体伟,等.不同玉米品种玉米蚜田间消长与其主要生化物质的相关性研究[J].河南农业大学学报,2016,50(3):364-369.
WANG Y, ZHAO M, TIAN T W, et al.Study on the relationship between the occurrence quantity of *Rhopalosiphum maidis* (Fitch) and main biochemical substance contents in maize[J].Journal of Henan agricultural university, 2016, 50(3): 364-369.

[31] 潘凡,朱凯辉,涂雄兵,等.植物次生代谢物丁布对苜蓿斑蚜的控制作用[J].中国生物防治学报,2023,39(5):1143-1147.
PAN F, ZHU K H, TU X B, et al.Effects of plant secondary cetabolite DIMBOA on *Therioaphis trifolii* Monel (Homptera: Aphididae)[J].Chinese journal of biological control, 2023, 39(5): 1143-1147.