

研究报告

Research Report

不同遗传背景转基因玉米 CM8101 对亚洲玉米螟的抗虫性

燕树锋¹ 刘海芳^{2*} 许嵩昱¹ 张子豪¹

¹ 河南省农业科学院粮食作物研究所, 郑州, 450002; ² 河南农业职业学院, 郑州, 451450

* 通信作者, chachaliuhaifang@126.com

摘 要 为研究不同遗传背景的转基因抗虫玉米 CM8101 对亚洲玉米螟的抗性表现, 本研究以转基因玉米 CM8101-105 和 CM8101-111 为材料, 以其相应遗传背景‘中单 105’和‘中单 111’及普通玉米‘郑单 958’为对照, 进行了不同时期人工接虫鉴定。心叶期接虫结果表明转基因玉米 CM8101-105 和 CM8101-111 虫害级别均为 1 级, 对亚洲玉米螟表现为高抗; 收获期雌穗调查结果表明, 不同遗传背景的 CM8101 对亚洲玉米螟均表现为高抗, 雌穗单株蛀孔数、单株隧道长度和危害级别等指标均显著低于对照组。此外, 收获期剖秆结果表明, 不同遗传背景的 CM8101 茎秆未受到亚洲玉米螟危害, 茎秆单株蛀孔数、单株隧道长度、单株存活幼虫数量等指标均显著低于对照组。综上所述, 抗虫基因 *cry1Ab-Ma* 在不同遗传背景玉米中均能稳定表达, 转基因玉米的叶片、雌穗、茎秆等器官对亚洲玉米螟均有优良的抗性, 转基因抗虫玉米 CM8101 具有重要的生产应用价值, 该研究为培育具有中国自主知识产权的转基因抗虫玉米新品种提供依据。

关键词 玉米; 苏云金芽孢杆菌; *cry1Ab-Ma* 基因; 抗虫性鉴定; 亚洲玉米螟

The Insect Resistance of Genetically Modified Maize CM8101 with Different Genetic Backgrounds to *Ostrinia furnacalis*

Yan Shufeng¹ Liu Haifang^{2*} Xu Haoyu¹ Zhang Zihao¹

¹ Cereal Crops Research Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou, 450002; ² Henan Vocational College of Agriculture, Zhengzhou, 451450

* Corresponding author, chachaliuhaifang@126.com

DOI: 10.13271/j.mpb.023.005054

Abstract In order to study the insect resistance performance of genetically modified insect-resistant maize CM8101 with different genetic background to *Ostrinia furnacalis*, this study used transgenic maize CM8101-105 and CM8101-111 as test materials, with their corresponding genetic background 'Zhongdan105' and 'Zhongdan111' as well as conventional maize 'Zhengdan958' as controls. The results showed that the pest grades of CM8101-105 and CM8101-111 were both grade 1, which presented high level resistance to *Ostrinia furnacalis* at the heart-leaf stage. Meanwhile, the investigation results of maize ear at harvest stage showed that CM8101 with different genetic background showed high level resistance to *Ostrinia furnacalis*, and the indice of tunnel number per plant, tunnel length per plant and pest grade were significantly lower than the controls. At the same time, the results showed that the stems of CM8101 with different genetic backgrounds were not affected by *Ostrinia furnacalis*. The indice of tunnel number per plant, tunnel length per plant and living larva number per plant were significantly lower than the controls. In conclusion, the expression of *cry1Ab-Ma* gene was stable in maize with different genetic

基金项目: 本研究由转基因生物新品种培育重大专项(2016ZX08011003)、国家自然科学基金项目(32061143033)和河南省农业科学院青年国际交流基金共同资助

引用格式: 燕树锋, 刘海芳, 许嵩昱, 张子豪, 2025, 不同遗传背景转基因玉米 CM8101 对亚洲玉米螟的抗虫性, 分子植物育种, 23(15): 5054-5060.

backgrounds, and the leaves, ears, stems and other organs of genetically modified maize have excellent resistance to *Ostrinia furnacalis*. The genetically modified insect-resistant maize CM8101 had the important value in production and application. This study might provide a basis for cultivating new varieties of transgenic insect-resistant corn with independent intellectual property rights in our country.

Keywords Maize (*Zea mays* L.); *Bacillus thuringiensis* (Bt); *cry1Ab-Ma* gene; Insect-resistance identification; *Ostrinia furnacalis*

玉米(*Zea mays* L.)是中国第一大粮食作物,年播种面积超过 3.5×10^7 hm²,其中黄淮海地区是中国最大的夏玉米主产区,年播种面积约占全国的三分之一,在全国粮食生产上具有十分重要的意义(郭庆法等, 2007; 陈印军等, 2019)。玉米螟是玉米田间主要害虫,一般可导致玉米减产 10%~20%,发生严重时可能造成产量损失超过 30%,严重威胁到玉米的高产和稳产(Silva et al., 2018; 孙红炜等, 2021)。利用常规方法进行抗虫育种存在效率低、耗时长、性状稳定性差等缺点,而通过遗传转化将外源抗虫基因导入玉米,培育出转基因抗虫玉米是当前解决上述问题最行之有效的办法(Shu et al., 2017; Shabbir et al., 2018)。

1996 年,首例转基因抗虫玉米在美国商品化,2019 年全世界转基因玉米种植面积近 6.09×10^7 hm²,约占转基因作物总种植面积的 32% (国际农业生物技术应用服务组织, 2021)。截至 2021 年,中国已获安全证书并包含抗虫性状的玉米转化体共有 5 个,分别为中国林木种子集团有限公司和中国农业大学联合开发的抗虫玉米 ND207 (转基因生物原名 2A-7)、杭州瑞丰生物科技有限公司和浙江大学联合开发的抗虫耐除草剂玉米‘瑞丰 125’ (转基因生物原名双抗 12-5)和‘瑞丰 8’ (转基因生物原名 GAB-3)以及北京大北农生物技术有限公司的抗虫耐除草剂玉米 DBN9936 和 DBN9501 (中国农业农村部转基因权威关注网站 <http://www.moa.gov.cn/ztzl/zjqwqgz/>)。但转基因玉米安全证书的获批仅是其产业化应用的前提条件,在实际生产中种植和推广仍要通过品种审定等后续程序。除了进口用作饲料和加工原料外,目前尚未批准任何转基因玉米品种在中国商业化种植。

因此,在抗虫转基因玉米在中国大规模推广种植之前,培育更多的具有优良抗虫性状的转基因玉米,增加相关的技术和资源储备显得极其重要。转基因抗虫玉米 CM8101 现处于生产性试验阶段,是有可能获得安全证书的具有中国自主知识产权的重要转化事件之一。2010 年,中国农业科学院作物科学研究所和河南省农业科学院将原始苏云金芽孢杆菌

Cry1Ab 蛋白 N 端氨基酸序列,根据单子叶植物(玉米)密码子偏好性进行改造,通过人工合成了新的 *cry1Ab-Ma* 基因序列(ZL 201010574708.X),在此基础上,杨小艳等(2015)将该基因导入玉米基因组,并获得 28 株转基因阳性植株。张爽等(2020)报道了转 *cry1Ab-Ma* 基因玉米 CM8101 在东北生态条件下(春玉米区)种植后,与对照自交系‘郑 58’相比, T₃、T₄、T₅ 世代转基因株系对亚洲玉米螟均表现为高抗。本研究在上述研究基础上,以该转化事件经回交转育后得到的不同遗传背景转基因抗虫玉米 CM8101-105 和 CM8101-111 为材料,在苗期和吐丝期进行亚洲玉米螟田间接虫鉴定,研究黄淮海生态条件下不同遗传背景的转基因抗虫玉米 CM8101 对亚洲玉米螟的抗性水平,以期对培育具有中国自主知识产权的转基因抗虫玉米新品种等提供依据。

1 结果与分析

1.1 不同遗传背景转基因玉米 CM8101 的试纸条检测

由于转基因玉米 CM8101-105 和 CM8101-111 为育种中间材料组配出的杂交种,抗虫基因 *cry1Ab-Ma* 在上述两转基因材料中仍不纯合。因此,首先需用 Bt-Cry1Ab/1Ac 免疫试纸条检测,留检测阳性株用于亚洲玉米螟接虫鉴定。转基因抗虫玉米 CM8101-105 和 CM8101-111 部分植株的免疫试纸条检测结果显示(图 1),所有样品中质检线均出现,表明免疫试纸条检测环境正常,转基因玉米 CM8101-105 中 3、7、8 和 9 号以及 CM8101-111 中 3、5 和 10 号检测线出现,表明这些植株为转基因阳性株。本试验共检测 CM8101-105 玉米 283 株,其中转基因阳性植株为 116 株,阳性株所占比例为 41%;共检测 CM8101-111 玉米 350 株,其中转基因阳性植株为 91 株,阳性株所占比例为 26%。

此外,虽然 Bt-Cry1Ab/1Ac 免疫试纸条价格现已大幅度下降,如果大田大规模检测使用时,费用仍然较高,本试验将购买的免疫试纸条从中部剪开,一分为二,进行转基因抗虫玉米样品的检测,也可得到相同的试验效果(图 1)。

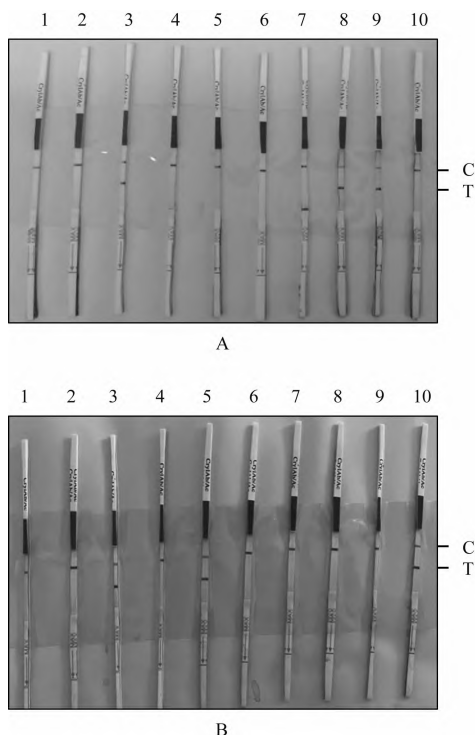


图 1 转基因抗虫玉米部分试纸条检测分析
注: A 和 B 分别代表转基因玉米 CM8101-105 和 CM8101-111; C: 质控线; T: 检测线; 1~10: 编号
Figure 1 The part detection analysis of genetically modified insect-resistant maize by immunostrip
Note: A and B represented the genetically modified maize CM-8101-105 and CM8101-111, respectively; C: Control line; T: Test line; 1~10: Number

1.2 不同遗传背景转基因玉米 CM8101 心叶期叶片的抗虫性鉴定

在玉米植株生长至心叶期(6~8 叶期)进行亚洲玉米螟人工接虫鉴定(表 1), 可知转基因玉米 CM8101-105 心叶期食叶级别为 1.02, 虫害级别为 1, 对亚洲玉米螟抗性水平表现为高抗; 转基因玉米 CM8101-111 心叶期食叶级别为 1.08, 虫害级别为 1, 对亚洲玉米螟抗性水平同样也表现为高抗; ‘中单 105’ 心叶期食叶级别为 7.47, 虫害级别为 7, 对亚洲玉米螟抗性水平表现为感; ‘中单 111’ 心叶期食叶级别为 5.14, 虫害级别为 5, 对亚洲玉米螟抗性水平表现为中抗。‘郑单 958’ 心叶期食叶等级为 5.02, 虫害级别为 5, 对亚洲玉米螟抗性水平表现为中抗。综上所述, 试验结果表明不同遗传背景转基因玉米 CM8101 心叶期叶片对亚洲玉米螟均表现出高抗, 食叶级别和虫害级别指标显著低于其各自相应的遗传背景亲本‘中单 105’和‘中单 111’, 也显著低于普通玉米对照‘郑单 958’。

1.3 不同遗传背景转基因玉米 CM8101 穗部的抗虫性鉴定

玉米吐丝期进行亚洲玉米螟接虫, 于收获前对雌穗进行危害情况调查(表 2), 可知转基因玉米 CM8101-105 单株蛀孔数、单株隧道长度和雌穗危害级别平均值分别为 0.02 个/株、0.02 cm/株和 1.09, 对亚洲玉米螟抗性水平表现为高抗; 转基因玉米 CM8101-111 单株蛀孔数、单株隧道长度和雌穗危害级别平均值分别为 0.02 个/株、0.02 cm/株和 1.11, 对亚洲玉米螟抗性水平表现为高抗; ‘中单 105’ 单株蛀孔数、单株隧道长度和雌穗危害级别平均值分别为 1.28 个/株、2.60 cm/株和 6.07, 对亚洲玉米螟抗性水平表现为感; ‘中单 111’ 单株蛀孔数、单株隧道长度和雌穗危害级别平均值分别为 1.12 个/株、2.20 cm/株和 5.30, 对亚洲玉米螟抗性水平表现为感; ‘郑单 958’ 单株蛀孔数、单株隧道长度和雌穗危害级别平均值分别为 1.25 个/株、2.50 cm/株和 5.82, 对亚洲玉米螟抗性水平表现为感。

试验结果表明不同遗传背景的转基因玉米 CM8101 雌穗对亚洲玉米螟抗性水平平均表现为高抗, 显著优于其各自相应的遗传背景亲本‘中单 105’和‘中单 111’, 同时也显著优于普通玉米对照‘郑单 958’, 其相应的非转基因对照玉米品种(‘中单 105’和‘中单 111’)和当地普通栽培玉米品种(‘郑单 958’)的抗性水平均表现为感。

1.4 不同遗传背景转基因玉米 CM8101 的剖秆鉴定

玉米吐丝期进行亚洲玉米螟接虫, 于收获前对植株进行剖秆调查, 以单株蛀孔数、单株隧道长度和单株存活幼虫数量等指标, 评价玉米植株的危害情况(表 3), 可知不同遗传背景的转基因玉米 CM8101-105 和 CM8101-111 单株蛀孔数、单株隧道长度和单株存活幼虫数量平均值均为 0; ‘中单 105’ 单株蛀孔数、单株隧道长度和单株存活幼虫数量平均值分别为 1.52 个/株、7.33 cm/株和 1.32 头/株; ‘中单 111’ 单株蛀孔数、单株隧道长度和单株存活幼虫数量平均值分别为 1.57 个/株、8.73 cm/株和 1.45 头/株; ‘郑单 958’ 单株蛀孔数、单株隧道长度和单株存活幼虫数量平均值分别为 1.90 个/株、10.67 cm/株和 1.58 头/株。

综上所述, 不同遗传背景的转基因抗虫玉米 CM8101 基本不存在亚洲玉米螟危害, 单株蛀孔数、单株隧道长度和单株存活幼虫数量等指标显著优于其相应的非转基因对照玉米品种(‘中单 105’和‘中单 111’)和当地普通栽培玉米品种(‘郑单 958’),

表 1 转基因玉米 CM8101 叶片的田间抗虫性

Table 1 Resistance of CM8101 leaf against *Ostrinia furnacalis* in the field

材料	食叶级别	虫害级别	抗性水平
Materials	Leaf damage grade	Pest grade	Resistance level
中单 105	7.47±0.73 ^a	7	感
Zhongdan105			Sensitive
中单 111	5.14±1.63 ^b	5	中抗
Zhongdan111			Medium resistance
郑单 958	5.02±1.90 ^b	5	中抗
Zhengdan958			Medium resistance
CM8101-105	1.02±0.02 ^c	1	高抗
			High resistance
CM8101-111	1.08±0.11 ^c	1	高抗
			High resistance

注: 不同小写字母代表不同材料间的差异显著性(LSD, $P<0.05$)

Note: Different small letters indicate significant differences among different materials (LSD, $P<0.05$)

这表明不同遗传背景的转基因玉米 CM8101 茎秆对亚洲玉米螟均具有良好的抗性。

2 讨论

中国已获农业转基因生物安全证书的 5 个包括抗虫性状的玉米转化体所用抗虫基因分别为 *vip3Aa* (DBN9501)、*cry1Ab* (DBN9936)、*cry1Ab/cry2Ab* (GA-B-3)、*cry1Ab/cry2Aj* (双抗 12-5) 和 *mcry1Ab/mcry2Ab* (2A-7), 由于 *cry1Ab* 基因具有良好的抗虫特性, 上述 5 个转化体中的 4 个均包含了 *cry1Ab* 基因(或其优

化改造后的基因), *cry1Ab* 基因仍是当前国内最主要利用的 Bt 抗虫基因。本研究所用材料转 *cry1Ab-Ma* 基因抗虫玉米 CM8101 同样是导入了优化改造后的 *cry1Ab* 基因, 研究结果表明抗虫基因 *cry1Ab-Ma* 在不同遗传背景玉米中均能稳定表达, 转基因玉米的叶片、雌穗、茎秆等器官对亚洲玉米螟均具有优良的抗性, 抗性等级为 I 级, 这与张爽等(2020)研究结果一致。同时, 武奉慈等(2020)报道 *cry1Ab-ma* 基因在短期内对草地贪夜蛾 1 龄和 2 龄幼虫有良好的控制作用, 不同器官抗性水平由高到低分别为心叶>籽粒>花丝, 这也表明该基因具有较广的抗虫范围。

转基因抗虫玉米种植和生产应用还要充分考虑其环境安全性, 鲁鑫等(2018)报道了与其非转基因对照‘郑 58’相比, 转基因玉米 CM8101 对赤子爱胜蚓的存活率、体重变化量、蚓茧量和孵化幼蚓量以及白符跳的存活率均无显著影响; 范春苗(2019)研究结果表明转基因玉米 CM8101 与对照玉米‘郑 58’相比, 田间节肢动物在群落组成、主要种群动态和群落多样性等方面均无显著差异, 转 *cry1Ab-Ma* 基因抗虫玉米 CM8101 不会对玉米田节肢动物群落产生不利影响; 梁晋刚等(2019)在玉米苗期、花期和成熟期, 连续 2 年分析了转基因抗虫玉米 CM8101 对根际土壤含水量、pH、脲酶和酸性磷酸酶活性的影响, 结果表明转基因抗虫玉米 CM8101 与对照相比, 根际土壤含水量、pH、脲酶和酸性磷酸酶活性等没有发生显著变化, 转基因抗虫玉米 CM8101 对土壤生态系统具有安全性。综上所述, 可知转 *cry1Ab-Ma* 基因抗虫玉

表 2 转基因玉米 CM8101 雌穗的田间抗虫性

Table 2 Resistance of CM8101 ear against *Ostrinia furnacalis* in the field

材料	单株蛀孔数	单株隧道长度(cm)	危害级别	抗性水平
Materials	Tunnel number per plant	Tunnel length per plant (cm)	Pest grade	Resistance level
中单 105	1.28±0.27 ^a	2.60±0.68 ^a	6.07±0.32 ^a	感
Zhongdan105				Sensitive
中单 111	1.12±0.25 ^a	2.20±0.35 ^a	5.30±0.55 ^b	感
Zhongdan111				Sensitive
郑单 958	1.25±0.17 ^a	2.50±0.67 ^a	5.82±0.43 ^{ab}	感
Zhengdan958				Sensitive
CM8101-105	0.02±0.02 ^b	0.02±0.02 ^b	1.09±0.11 ^c	高抗
				High resistance
CM8101-111	0.02±0.03 ^b	0.02±0.02 ^b	1.11±0.13 ^c	高抗
				High resistance

注: 不同小写字母代表不同材料间的差异显著性(LSD, $P<0.05$)

Note: Different small letters indicate significant differences among different materials (LSD, $P<0.05$)

表 3 转基因玉米 CM8101 茎秆的田间抗虫性
Table 3 Resistance of CM8101 stem against *Ostrinia furnacalis* in the field

材料	单株蛀孔数	单株隧道长度(cm)	单株存活幼虫数量
Materials	Tunnel number per plant	Tunnel length per plant (cm)	Living larva number per plant
中单 105	1.52±0.35 ^a	7.33±2.69 ^a	1.32±0.33 ^a
Zhongdan105			
中单 111	1.57±0.48 ^a	8.73±1.89 ^a	1.45±0.17 ^a
Zhongdan111			
郑单 958	1.90±0.65 ^a	10.67±3.79 ^a	1.58±0.50 ^a
Zhengdan958			
CM8101-105	0.00±0.00 ^b	0.00±0.00 ^b	0.00±0.00 ^b
CM8101-111	0.00±0.00 ^b	0.00±0.00 ^b	0.00±0.00 ^b

注: 不同小写字母代表不同材料间的差异显著性(LSD, $P<0.05$)
Note: Different small letters indicate significant differences among different materials (LSD, $P<0.05$)

米 CM8101 种植对田间节肢动物群落、非靶标生物、土壤生态系统等均未见显著的影响; 转基因抗虫玉米 CM8101 在不同生态区、不同遗传背景条件下各主要器官对亚洲玉米螟均表现出高抗, 且抗性稳定, 这表明转基因抗虫玉米 CM8101 具有重要的生产应用价值, 上述结果以期为培育具有中国自主知识产权的转基因抗虫玉米新品种等提供依据。

当前, 包含 *cry1Ab*、*cry1Ac*、*cry9C* 和 *cry1Fa2* 等基因(或优化改造后的基因)的抗虫玉米先后获得商业化, 全球应用最广的抗虫玉米转化事件为 MON810、MON89034、Bt11 和 TC1507 等(燕树锋等, 2015)。同时, 对 *cry1Ah*、*cry1Ie*、*cry1Ca*、*cry2Aa*、*cry2Ab*、*cry2Ah*、*cry2Aj* 和 *vip3Aa* 等抗虫基因的杀虫效果也有相关研究报道, 这可在一定程度上避免之后长期使用单一抗虫基因, 使玉米螟等靶标害虫产生抗性或应对次要害虫和迁移害虫成为主要虫害, 增加抗虫谱范围(杨召军等, 2012; 刘臣等, 2017; Shwe et al., 2021)。此外, 转化多价抗虫基因或者通过杂交育种等方法将多个抗虫基因聚合, 培育复合抗虫性状的转基因玉米, 也将成为未来发展的主要方向。

3 材料与方法

3.1 试验材料

以转基因玉米 CM8101-105 和 CM8101-111 为试验材料, 以其相应遗传背景材料‘中单 105’和‘中单 111’及普通玉米‘郑单 958’为对照。其中, CM8101-105 和 CM8101-111 是通过农杆菌介导法将 *cry1Ab-Ma* 基因导入玉米杂交种 Hill 基因组中, 并通过回交转育和杂交组配, 分别获得的以‘中单

105’和‘中单 111’为遗传背景的转基因玉米杂交种。*cry1Ab-Ma* 基因是中国农业科学院作物科学研究所通过密码子优化等方法合成的具有中国自主知识产权的抗虫基因。转基因玉米和其相应遗传背景材料均来自中国农业科学院作物科学研究所; ‘郑单 958’由河南省农业科学院粮食作物研究所提供。

试验材料种植在河南省农业科学院新乡原阳转基因玉米中试基地内(35.011°N, 113.711°E), 与周边玉米的隔离距离符合国家转基因生物安全隔离要求。CM8101-105、CM8101-111、‘中单 105’、‘中单 111’和普通玉米对照‘郑单 958’, 上述 5 个材料均分别连续种植 5 行, 材料间随机排列, 4 次重复。播种行长为 4.5 m, 行距 60 cm, 株距为 25 cm, 3 粒播, 试验地四周设置保护行。试验材料全生育期不喷施杀虫剂, 其他田间管理同常规玉米。

3.2 Bt-Cry1Ab/1Ac 免疫试纸条检测

由于中国农业科学院作物科学研究所提供的转基因玉米 CM8101-105 和 CM8101-111 为育种中间材料组配出的杂交种, *cry1Ab-Ma* 抗虫基因在两转基因材料中仍存在分离, 因此, 转基因玉米出苗后需要提前先用 Bt-Cry1Ab/1Ac 免疫试纸条检测后再进行间苗, 留免疫试纸条检测阳性植株用于后续的亚洲玉米螟接虫鉴定。

Bt-Cry1Ab/1Ac 免疫试纸条由上海佑隆生物科技有限公司生产。免疫试纸条检测方法如下: 分别取转基因玉米 CM8101-105 和 CM8101-111 苗期叶片, 放置于 2 mL 离心管中, 加入液氮将其充分研磨, 再加入纯净水充分混合, 将试纸条样品端浸入上述溶液内, 静置 5 min 后, 进行免疫试纸条检查结果的

观察和记录。免疫试纸条上质检线(control line)出现说明检测环境正常,检测线(test line)出现说明所测样品为阳性。样品检测时如果只出现质检线,表明所测样品不是抗虫转基因玉米,如果质检线和检测线同时出现,表明所测样品为抗虫转基因玉米阳性株。

3.3 亚洲玉米螟接虫

分别于玉米心叶期(6~8 叶期)和吐丝期,对上述 5 个材料进行亚洲玉米螟人工接虫。当产在蜡纸上的亚洲玉米螟卵块大多发育至黑头期时,将蜡纸上的亚洲玉米螟卵块剪成每块含有 30~40 粒黑头卵的小块,在每株玉米心叶中(心叶期)和花丝丛外(吐丝期)接入即将孵化的黑头卵蜡纸片 2 小块,即每株接 60~80 粒亚洲玉米螟黑头卵,接虫后的植株挂牌标记,每个材料每个重复接虫 20~30 株。亚洲玉米螟接虫操作和随后的结果调查由河南省农业科学院植物保护研究所进行。亚洲玉米螟黑头卵块购自北京绽诺思特生物科技有限公司。

3.4 亚洲玉米螟危害情况调查

心叶期接虫危害情况调查:在接虫 2~3 周后,逐株调查玉米植株中上部叶片被玉米螟取食情况,记录食叶级别,每个材料每个重复鉴定 20~30 株。根据亚洲玉米螟幼虫取食心叶后所形成的叶片虫孔直径大小和数量划分食叶级别,食叶级别划分依据采用农业部 NY/T 1248.5-2006 的 9 级分级标准,逐株记载亚洲玉米螟食叶级别。同时,计算亚洲玉米螟对鉴定材料群体叶片危害等级(食叶级别)的平均值,计算方法如下:

平均食叶级别 = $\sum(\text{食叶级别} \times \text{该级别植株数}) / \text{调查总株数}$ 。

对亚洲玉米螟抗性水平评价标准也参照农业部 NY/T 1248.5-2006 标准进行。

吐丝期接虫危害情况调查:在收获前调查玉米雌穗被害程度,同时进行剖秆调查,每个材料每个重复鉴定 20~30 株。玉米雌穗调查单株蛀孔数、单株隧道长度和危害级别指标,抗性水平划分依据采用农业部 953 号公告-10.1-2007 的 5 级分级标准。剖秆调查茎秆单株蛀孔数、单株隧道长度、单株存活幼虫数量指标。

3.5 数据统计

采用 Microsoft Excel 2010 软件对数据进行录入和初步整理分析,采用 SPSS 21.0 软件进行方差分析和显著性测试($P < 0.05$)。

作者贡献

燕树锋是本研究的实验设计者和实验研究的执行人,完成数据分析,论文初稿的写作;许磊昱和张子豪参与实验设计,试验结果分析;刘海芳是项目的构思者及负责人,指导实验设计、数据分析、论文的写作与修改。全体作者都阅读并同意最终的文本。

致谢

本研究由转基因生物新品种培育重大专项(2016ZX08011003)、国家自然科学基金项目(3206-1143033)和河南省农业科学院青年国际交流基金共同资助。

参考文献

- Shabbir M.Z., Quan Y.D., Wang Z.Y., Bravo A., Soberon M., and He K.L., 2018, Characterization of the Cry1Ah resistance in Asian corn borer and its cross-resistance to other *Bacillus thuringiensis* toxins, *Sci. Rep.*, 8(1): 1-9.
- Shu Y.H., Du Y., Chen J., Wei J.X., and Wang J.W., 2017, Responses of the cutworm *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) to two Bt corn hybrids expressing Cry1Ab, *Sci. Rep.*, 7(1): 1-13.
- Shwe S.M., Wang Y.Q., Gao Z.P., Li X., Liu S., Bai S.X., Zhang T.T., He K.L., and Wang Z.Y., 2021, Toxicity of Cry1-Class, Cry2Aa, and Vip3Aa19 Bt proteins and their interactions against yellow peach moth, *Conogethes punctiferalis* (Guenee) (Lepidoptera: Crambidae), *J. Invertebr. Pathol.*, 178: 107507.
- Silva G.A., Picanco M.C., Ferreira L.R., Ferreira D.O., Farias E. S., Souza T.C., Rodrigues-Silva N., and Pereira E.J.G., 2018, Yield losses in transgenic Cry1Ab and non-Bt corn as assessed using a crop-life-table approach, *J. Econ. Entomol.*, 111(1): 218-226.
- 陈印军, 王琦琪, 向雁, 2019, 我国玉米生产地位、优势与自给率分析, *中国农业资源与区划*, 40(1): 7-16.
- 范春苗, 2019, 节肢动物群落对转 *cry1Ab-Ma* 基因抗虫玉米 CM8101 种植响应, 硕士学位论文, 吉林农业大学, 导师: 宋新元, pp.6-50.
- 国际农业生物技术应用服务组织, 2021, 2019 年全球生物技术/转基因作物商业化发展态势, *中国生物工程杂志*, 41(1): 114-119.
- 郭庆法, 高新学, 刘强, 刘铁山, 张成华, 董瑞, 叶金才, 2007, 黄淮海夏玉米区玉米育种现状及创新, *玉米科学*, 15(6): 1-4.
- 梁晋刚, 栾颖, 宋新元, 张正光, 2019, 转基因抗虫玉米 CM8101

- 对根际土壤主要理化性质和功能酶活性的影响, 浙江农业科学, 60(12): 2248-2252.
- 刘臣, 陈琳, 王冰洁, 赵曼, 梁革梅, 郭予元, 2017, 四种 Bt 蛋白对六种重要鳞翅目害虫的杀虫活性评价, 中国生物防治学报, 33(6): 774-779.
- 鲁鑫, 宋新元, 武奉慈, 杨小艳, 翁建峰, 王振华, 李新海, 2018, 转 *CryIAb-Ma* 基因抗虫玉米 CM8101 对白符跳和赤子爱胜蚓的影响, 环境昆虫学报, 40(2): 390-397.
- 孙红炜, 徐晓辉, 李凡, 杨淑珂, 路兴波, 2021, 转基因玉米双抗 12-5-21 的抗虫性及对草甘膦的耐受性, 生物安全学报, 30(1): 43-49.
- 武奉慈, 翁建峰, 李新海, 尹俊琦, 宋新元, 2020, 转 *CryIAb-ma* 基因玉米 CM8101 对草地贪夜蛾 1 龄和 2 龄幼虫的抗性, 植物保护学报, 47(4): 815-821.
- 燕树锋, 铁双贵, 岳润清, 韩小花, 齐建双, 卢彩霞, 2015, 转 *CryIAc-w* 基因抗虫玉米的获得及分子鉴定, 华北农学报, 30(5): 41-44.
- 杨小艳, 翁建峰, 谢树章, 雷开荣, 2015, 转 *CryIAb-Ma* 基因抗虫玉米植株的获得及其后代分析, 分子植物育种, 13(9): 1943-1948.
- 杨召军, 郎志宏, 张杰, 宋福平, 何康来, 黄大昉, 2012, 转 Bt *cryIAh/cryIIe* 双价基因抗虫玉米的研究, 中国农业科技导报, 14(4): 39-45.
- 张爽, 鲁鑫, 张嘉月, 杨小艳, 谢树章, 武凤慈, 宋新元, 王振华, 李新海, 翁建峰, 2020, 转 *CryIAb-Ma* 基因玉米 CM8101 对亚洲玉米螟抗性研究, 玉米科学, 28(1): 59-64.