

小麦籽粒营养物质和次生物质含量与其对玉米象抗性的关系

韩宪琪¹ 李雪娇¹ 冯淑娟¹ 成卫宁^{1*} 朱克岩²

(1. 西北农林科技大学, 农业部西北黄土高原作物有害生物综合治理重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 德克萨斯农工大学昆虫学系, 美国 德克萨斯州 778432)

摘要: 为明确生产栽培小麦品种对玉米象 *Sitophilus zeamais* (Motschulsky) 的抗性机制, 采用选择性和非选择性试验法系统评估了9个小麦品种对玉米象的抗性, 并分析了小麦籽粒营养物质和次生物质含量与其抗性的关系。结果显示, 不同小麦品种对玉米象的抗性存在显著差异, 其中陕麦139和西农88的不选择性和抗生性较弱, 小偃22、周麦16和周麦11较强; 玉米象成虫对西农165选择性最强, 虫口数为152.00头, 而卵至子代成虫发育历期最长, 为35.06 d, 子代成虫数、重量损失率和敏感系数均较低, 分别为19.67头、5.37%和8.30; 对周麦18选择性最差, 敏感性居中。玉米象成虫对不同小麦品种的选择性与各物质含量, 以及总酚、蛋白质含量与各抗性指标均无显著相关性, 但阿魏酸含量与子代成虫数、敏感系数及重量损失率显著负相关; 可溶性糖含量与子代成虫数、敏感系数及重量损失率显著正相关, 与卵至子代成虫发育历期显著负相关。表明小麦品种对玉米象的抗生性与其籽粒中阿魏酸和可溶性糖含量相关, 阿魏酸含量越高、可溶性糖含量越低, 小麦对玉米象的抗性越强。

关键词: 小麦品种; 玉米象; 选择性; 抗生性; 化学物质

Relationships between the contents of nutrients and secondary metabolites in wheat seeds and their resistance to *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae)

Han Xianqi¹ Li Xuejiao¹ Feng Shujuan¹ Cheng Weining^{1*} Zhu Keyan²

(1. Key Laboratory of Integrated Pest Management on Crops in Northwestern Loess Plateau, Ministry of Agriculture; Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China; 2. Department of Entomology, Texas A&M University, College Station, Texas 77843, USA)

Abstract: To clarify the resistance and the mechanisms of cultivated wheat varieties to the maize weevil *Sitophilus zeamais*, the resistances of nine wheat varieties to *S. zeamais* were evaluated using choice and no-choice test methods. The correlations between contents of nutrients and secondary metabolites in wheat seeds were studied, and their resistance to *S. zeamais* was analyzed using correlation analysis. The results showed that the resistance level of different wheat varieties to *S. zeamais* were significantly different. Both non-preference and antibiosis of Xinong 88 and Shaanmai 139 were lower than those of other wheat varieties, and those of Xiaoyan 22, Zhoumai 11 and Zhoumai 16 were stronger. Xinong 165 had the highest number of adults (152.00) among all wheat varieties in choice tests, but longest egg-to-adult duration (35.06 d), and lower number of progeny emerged (19.67), lower weight loss rate (5.37%) and susceptibility index (8.30) in non-choice tests. In contrast, Zhoumai 18 had the lowest number of

adults, but moderate susceptibility. No significant correlations were found between preference parameter and the contents of various chemicals, as well as between the contents of protein and total phenol and various resistance indicators. However, ferulic acid content had a clear negative correlation with the adult number of progeny, susceptibility index and weight loss rate. Soluble sugar content had a clear positive correlation with the adult number of progeny, susceptibility index and weight loss rate, and a clear negative correlation with egg to adult duration. The results indicated that antibiosis of wheat variety to *S. zeamais* was closely related to the content of ferulic acid and soluble sugar in wheat seeds. The higher ferulic acid content or the lower soluble sugar content, the stronger resistance of wheat has to *S. zeamais*.

Key words: wheat variety; *Sitophilus zeamais*; selectivity; resistance; chemical

小麦是世界上大多数国家最重要的粮食原料之一,是保障各国粮食安全的基础,而在储藏期间常常遭受各种虫害,其中以玉米象 *Sitophilus zeamais* (Motschulsky) 为主,被视为世界头号储粮害虫(郑旭等,2014)。该虫以成虫啃食和幼虫蛀蚀的方式进行为害,在适宜条件下6个月内可造成重量损失达35.12%(白旭光,2008)。目前,世界各国对玉米象的防治主要应用溴甲烷和磷化氢等化学杀虫剂熏蒸,但由此产生的药剂残留、害虫抗药性和大气臭氧层破坏等问题日益突出(Cheng et al., 2012; Mikami et al., 2012)。尽管气调法控制储粮害虫也受到极大关注(Cheng et al., 2012),但由于其应用需要严格密封条件和过长时间处理,难以大范围推广。利用寄主抗虫性不仅经济、安全、方便和有效,并已在多种农业害虫的防控中发挥了重要作用(Suleiman et al., 2015)。

研究表明,储粮对害虫的抗性不仅受籽粒硬度(Dobie, 1974)、种皮厚度(Lale & Kartay, 2006)等外部形态和物理特征的影响,更与籽粒化学物质含量有关。如小麦对赤拟谷盗 *Tribolium castaneum* (Herbst) 的抗性与蛋白质含量有关(Wong & Lee, 2011);高粱对米象 *Sitophilus oryzae* (Linnaeus) 的抗性与酚酸含量有关(Ramputh et al., 1999);玉米对麦蛾 *Sitotroga cerealella* (Olivier) 的抗性与酚酸、直链淀粉含量密切相关(Demissie et al., 2015)。近年来,国内外在玉米和稻谷对玉米象抗性研究方面也做了大量工作,并取得了重要进展(Suleiman et al., 2015; Antunes et al., 2016),但关于小麦对玉米象抗性的研究较少,郑旭等(2014)认为角质小麦对玉米象的抗性较好,Dexter et al. (1989)发现小麦角质程度与蛋白组分有关,但尚未见蛋白组分与小麦抗性关系的报道,随着新的小麦品种不断出现,明确不同品种对玉米象的抗性极为重要。

鉴于此,本研究以陕西生产上大面积推广种植的9个小麦品种为材料,以成虫选择数、卵至子代成虫发育历期、子代成虫数、敏感系数和重量损失率为抗性指标,系统评估不同小麦品种对玉米象的抗性,并分析不同品种籽粒中阿魏酸、总酚、可溶性糖、4种蛋白质组分及贮藏蛋白等含量与抗性的关系,以期为抗性小麦品种的利用和培育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试小麦品种及虫源:陕农33、陕农981、陕麦139、小偃22、西农88、西农165、周麦18、周麦16和周麦11共9种小麦品种均由西北农林科技大学农学院提供。试验前所有品种置于-20℃处理2周,以杀死潜藏的仓虫,然后取出恢复至常温,调整其含水量至 $(13.5 \pm 0.5)\%$ 。玉米象为本实验室内饲养多代的品系,在 $27 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 的人工气候箱培养,挑取羽化7d内的成虫备用。

试剂和仪器:没食子酸、阿魏酸和蒽酮标准品,美国Sigma-Aldrich公司;考马斯亮蓝G-250、牛血清蛋白,美国Amresco公司;福林酚1N,上海荔达生物科技有限公司;无水碳酸钠、葡萄糖、磷酸、甲醇、氢氧化钠和无水乙醇,广东光华科技股份有限公司。小型家庭粉碎机,顺德科仕荣模具有限公司;UV-1000型紫外可见分光光度计,上海翱艺仪器有限公司。

1.2 方法

1.2.1 玉米象对不同小麦品种的选择性与为害

采用自由选择法测定成虫对不同品种的选择性。分别选取大小一致的不同小麦品种籽粒各50粒,放入有9个大小相同扇形分格、直径为20 cm的圆盘格子中,每分格放1个品种,品种间距1 cm,距盘中心5 cm,然后向盘中心接入900头玉米象成虫并盖

上扎有小孔的盖子,将圆盘置于 $27\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 条件下让成虫自由选择,12 h后各品种上的成虫分布数基本稳定时进行记录。重复3次。

另取各小麦品种籽粒50粒进行称重,然后放入有9个大小相同扇形分格、直径为20 cm的圆盘格子中,每分格放1个品种,盘中心接入900头玉米象成虫,置于上述相同条件下,48 h后移走成虫后再次称重,计算由成虫为害造成的重量损失率。重复3次。重量损失率=(受害前重量-受害后重量)/受害前重量 $\times 100\%$ 。

1.2.2 不同小麦品种对玉米象的抗生性测定

采用非选择试验法测定不同小麦品种对玉米象的抗生性。分别选取大小一致不同小麦品种籽粒各100粒,称重后放入50 mL离心管中,管壁扎孔保证空气流通,每品种接入20对玉米象雌雄成虫,将离心管置于 $27\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 的人工气候箱,待其产卵3 d后移走成虫,卵继续在气候箱内培养,在预计子代成虫开始羽化即大约20 d后每天08:00、14:00和20:00定时观察,记录羽化的成虫数并移走成虫,连续5 d没有成虫羽化即认为羽化结束,再次称重小麦种粒,计算卵至子代成虫的发育历期(即母代成虫从小麦样品移走至子代成虫羽化所需时间)、子代成虫数、种子重量损失率和敏感性系数(Dobie, 1974),重复3次。根据4个抗性指标进行聚类分析,综合评价各小麦品种对玉米象的抗生性(张宏宇和邓望喜, 1993)。敏感系数=子代成虫总数的自然对数/卵至子代成虫羽化的平均发育历期 $\times 100$ 。

1.2.3 小麦籽粒中化学物质含量的测定

取各小麦品种籽粒适量, 80°C 烘干至恒重,采用小型家庭粉碎机研磨成粉,过100目孔径筛后测定各化学物质含量。参照王丹和杜金华(2011)方法并加以改良对阿魏酸含量进行测定。称取各品种小麦粉100 mg放入50 mL离心管中,加入0.5%氢氧化钠8 mL,在 37°C 、200 r/min下振荡提取2 h,用4.0 mol/L盐酸溶液调节pH至2.0,再加入60%甲醇12 mL,振荡提取20 min,4 500 r/min离心15 min,上清液用60%甲醇定容至25 mL,用0.22 $\mu\text{mol/L}$ 滤膜过滤后,用分光光度计于320 nm处测定吸光值。以0.1 mg/mL阿魏酸溶液为标准样品,计算样品含量。重复3次。

采用福林酚法测定总酚含量(Bonoli et al., 2004)。取各品种部分过筛小麦粉,经氯仿脱脂后称250 mg放入10 mL离心管中,加入70%乙醇5 mL,然后于 40°C 超声浸提40 min,4 000 r/min离心15 min,

上清液用70%乙醇定容至5 mL待测。将1 mL样品液、1 mL福林酚试剂、2 mL 15%碳酸钠和6 mL 70%乙醇混匀后,室温下反应2 h,用分光光度计于760 nm处测定吸光值。以0.1 mg/mL没食子酸溶液为标准样品,计算样品含量。重复3次。

采用蒽酮-硫酸比色法测定可溶性糖含量(杨宇晖等, 2013)。称取各品种小麦粉10 mg放入10 mL离心管中,加入双蒸水5 mL,摇匀后在沸水中提取30 min,取出冷却后以4 000 r/min离心20 min,收集上清液。沉淀用5 mL双蒸水再提取1次,合并2次上清液,用双蒸水定容至25 mL待测。取10 mL试管,加入待测液0.5 mL、双蒸水0.5 mL、蒽酮试剂4 mL,摇匀后于沸水中加热10 min,冷却至室温后用分光光度计于620 nm处测定吸光值。以0.1 mg/mL葡萄糖溶液为标准样品,计算样品含量。重复3次。

参照许振柱等(2003)方法并稍作改良对蛋白质组分进行分离与含量测定。称取各品种小麦粉100 mg放于2 mL离心管中,按照清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白的顺序提取。清蛋白的提取:向离心管中加入双蒸水1 mL,振荡提取30 min后4 000 r/min离心15 min,收集上清液;沉淀用1 mL双蒸水再提取2次,3次上清液合并后定容至10 mL待测。将沉淀依次用10% NaCl、70%乙醇和0.2% NaOH按清蛋白同样步骤进行提取,获得球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白。以牛血清蛋白为标准样品,采用考马斯亮蓝G-250染色法测定各蛋白组分含量(Bradford, 1976),并计算贮藏蛋白含量(醇溶性蛋白与谷蛋白之和)。重复3次。

1.3 数据分析

试验数据采用SPSS 20.0软件进行统计分析。小麦品种间生化物质含量、玉米象卵至子代成虫的发育历期、子代成虫数、敏感系数与平方根反正弦转换后的重量损失率进行方差分析,采用Duncan氏新复极差法进行差异显著性检验,并对不同抗性指标与生化物质含量的关系进行相关分析。

2 结果与分析

2.1 玉米象对不同小麦品种的选择性与为害

玉米象成虫对不同小麦品种的选择性存在显著差异,其中对西农165的选择性最强,12 h后分布在该品种上的数量高达152.00头,显著高于其它品种;其次为陕麦139、陕农33和西农88,选择其它5个品种的成虫较少,以周麦18最少,为24.33头(图1-A)。48 h后,成虫啃食对西农88造成的重量损失最

大,达3.94%,显著高于除陕农33外的其它品种,小偃22最小为0.86%,显著低于西农88、陕农33和西

农165(图1-B)。除西农165外,成虫对小麦品种的选择性和为害造成的损失顺序基本一致。

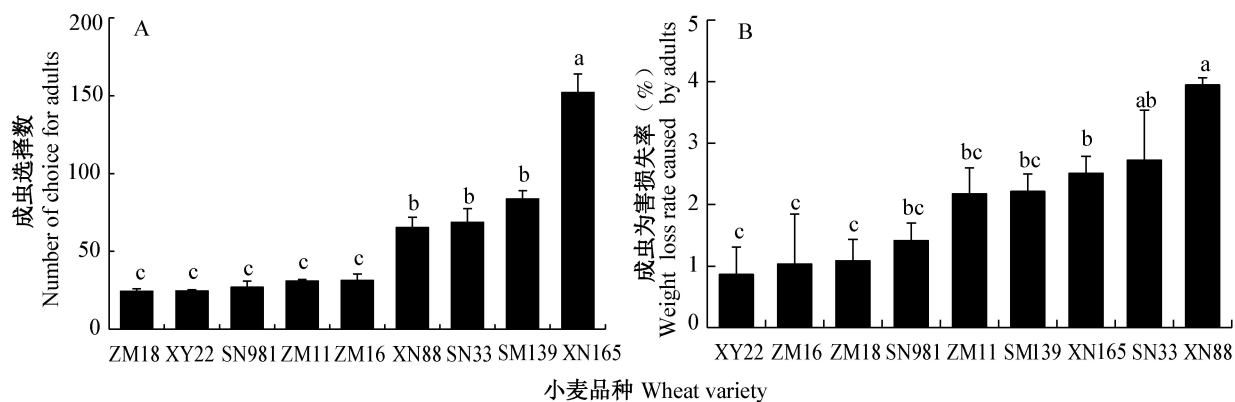


图1 玉米象成虫对不同小麦品种的选择性和为害损失率

Fig. 1 Selectivity and weight loss rate of *Sitophilus zeamais* adults to different wheat varieties

ZM18: 周麦18; XY22: 小偃22; SN981: 陕农981; ZM11: 周麦11; ZM16: 周麦16; XN88: 西农88; SN33: 陕农33; SM139: 陕麦139; XN165: 西农165。图中数据为平均数±标准误。不同字母表示经Duncan氏新复极差法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。ZM18: Zhoumai 18; XY22: Xiaoyan 22; SN981: Shaannong 981; ZM11: Zhoumai 11; ZM16: Zhoumai 16; XN88: Xinong 88; SN33: Shaannong 33; SM139: Shaanmai 39; XN165: Xinong 165. Data in the figure are mean±SE. Different letters indicate significant difference at $P<0.05$ level by Duncan's new multiple range test.

2.2 不同小麦品种对玉米象的抗性

2.2.1 玉米象的发育历期和子代成虫数

在不同小麦品种上玉米象卵至子代成虫发育历期和子代成虫数差异显著。在西农165上卵至子代成虫发育历期最长,为35.06 d,显著高于其它品种;其次为周麦16、周麦18和周麦11;在陕麦139和西

农88上发育历期最短,为31.37~31.59 d,显著低于除陕农33和小偃22外的其它品种(图2-A)。子代成虫数与卵至子代成虫发育历期表现趋势相反,在9个小麦品种上西农88和陕麦139上的子代成虫数量最多,分别为51.33头和46.67头,西农165上最少,仅为19.67头(图2-B)。

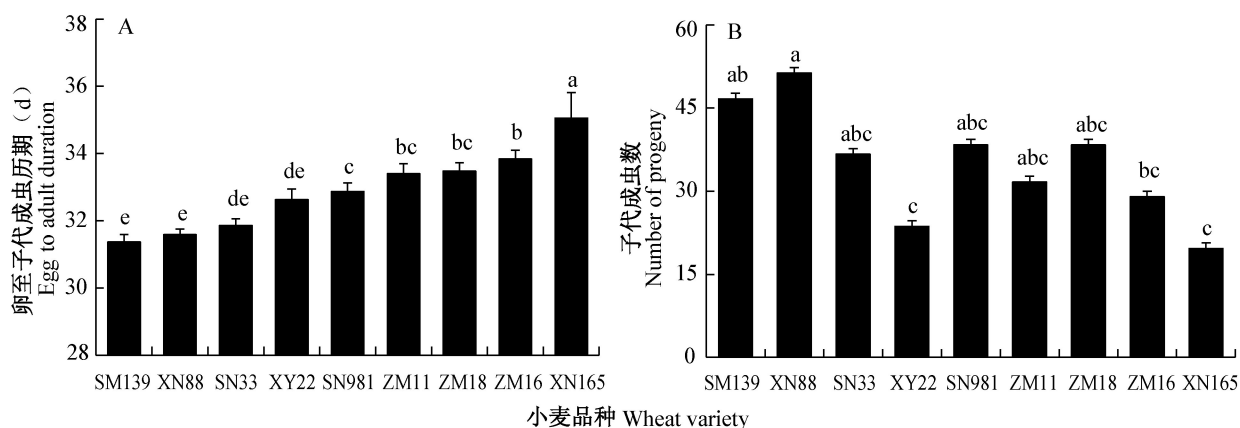


图2 不同小麦品种上玉米象的卵至子代幼虫发育历期和子代成虫数

Fig. 2 Egg to adult duration and the number of progeny of *Sitophilus zeamais* in different wheat varieties

SM139: 陕麦139; XN88: 西农88; SN33: 陕农33; XY22: 小偃22; SN981: 陕农981; ZM11: 周麦11; ZM18: 周麦18; ZM16: 周麦16; XN165: 西农165。图中数据为平均数±标准误。不同字母表示经Duncan氏新复极差法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。SM139: Shaanmai 39; XN88: Xinong 88; SN33: Shaannong 33; XY22: Xiaoyan 22; SN981: Shaannong 981; ZM11: Zhoumai 11; ZM18: Zhoumai 18; ZM16: Zhoumai 16; XN165: Xinong 165. Data in the figure are mean±SE. Different letters indicate significant difference at $P<0.05$ level by Duncan's new multiple range test.

2.2.2 玉米象对各品种的敏感系数和重量损失率

玉米象对西农 88 和陕麦 139 的敏感系数最高, 分别为 12.46 和 12.23, 显著大于对西农 165、小偃 22、周麦 16 和周麦 11, 敏感系数分别为 8.30、9.46、9.84 和 10.13, 周麦 18、陕农 981 和陕农 33 的敏感性居中, 即总体表现趋势与子代成虫数一致(图 3-A)。9 个小麦品种的重量损失率差异显著, 表现趋势与敏

感系数基本一致, 即西农 88 最高, 为 14.93%, 其次为陕麦 139 和陕农 33, 西农 165、小偃 22、周麦 16 和周麦 11 重量损失率最低, 为 4.65%~5.81%(图 3-B)。

综合抗生性试验的 4 个抗性指标, 可将 9 个小麦品种分为 3 类, 西农 88 和陕麦 139 为感虫品种; 西农 165、小偃 22、周麦 16 和周麦 11 为抗性品种; 周麦 18、陕农 981 和陕农 33 为中等抗性品种。

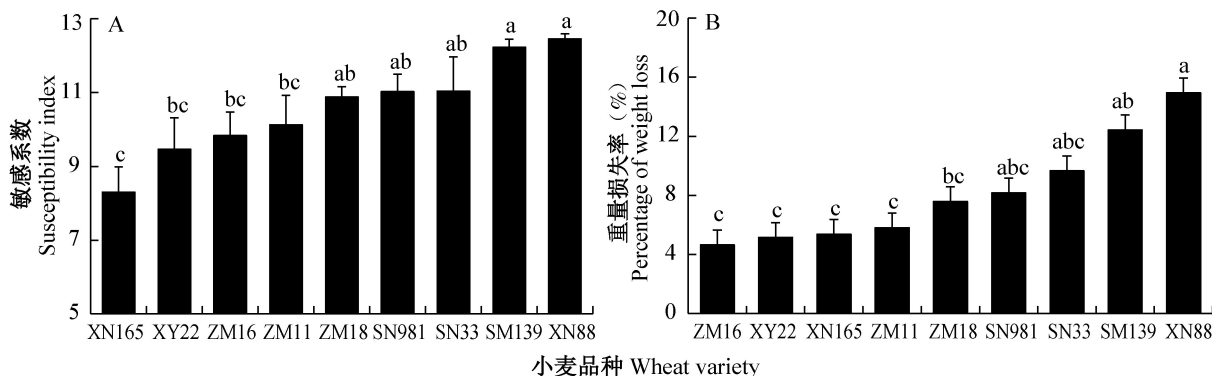


图 3 玉米象对不同小麦品种的敏感系数和重量损失率

Fig. 3 Susceptible index and percentage of weight loss of *Sitophilus zeamais* to different wheat varieties

XN165: 西农 165; XY22: 小偃 22; ZM16: 周麦 16; ZM 11: 周麦 11; ZM18: 周麦 18; SN981: 陕农 981; SN33: 陕农 33; SM139: 陕麦 139; XN88: 西农 88。图中数据为平均数±标准误。不同字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。XN165: Xinong 165; XY22: Xiaoyan 22; ZM16: Zhoumai 16; ZM11: Zhoumai 11; ZM18: Zhoumai 18; SN981: Shaannong 981; SN33: Shaannong 33; SM139: Shaanmai 139; XN88: Xinong 88. Data in the figure are mean±SE. Different letters indicate significant difference at $P < 0.05$ level by Duncan's new multiple range test.

2.3 不同小麦品种籽粒中化学物质含量差异

9 个小麦品种籽粒中各化学物质含量均存在显著差异。抗性品种小偃 22、西农 165、周麦 11 和周麦 16 的阿魏酸含量为 0.72~0.80 mg/g, 显著高于感虫品种西农 88 和陕麦 139; 周麦 16 的总酚含量最高, 陕农 981 最低, 分别为 1.33 mg/g 和 0.93 mg/g; 陕麦 139 的可溶性糖含量最高, 达 159.79 mg/g, 西农 165 最低, 仅为 115.67 mg/g; 周麦 18 的清蛋白含量最高, 为 18.63 mg/g, 陕麦 139 最低, 仅为 9.86 mg/g; 周麦 11 的球蛋白含量最高, 为 16.49 mg/g, 周麦 16 最低, 为 11.20 mg/g; 陕麦 139 的醇溶性蛋白含量最高, 抗性最弱的西农 88 最低; 而西农 88 的谷蛋白含量最高, 达 29.52 mg/g, 抗性较强的周麦 16 最低, 仅为 19.18 mg/g; 中抗品种陕农 33 的贮藏蛋白和总蛋白含量均最高, 分别为 46.87 mg/g 和 77.03 mg/g, 而抗性较强的周麦 11 和周麦 16 最低(表 1)。

2.4 小麦品种的化学物质含量与玉米象抗性关系

相关分析结果表明, 玉米象成虫对小麦品种的选择性及其为害损失率与所有物质含量相关性均不

显著。阿魏酸含量与子代成虫数量、敏感系数及重量损失率的相关系数 r 分别为 -0.72、-0.73 和 -0.76, 相关性均达显著水平; 可溶性糖含量与上述指标显著正相关, 相关系数 r 分别为 0.86、0.89 和 0.68, 与卵至子代成虫发育历期显著负相关, 相关系数为 -0.76; 总酚、4 种蛋白组分、贮藏蛋白、总蛋白含量与各指标间均无显著相关性(表 2)。

3 讨论

本试验应用 6 个指标系统评估了 9 个小麦品种对玉米象的抗性, 发现品种间的抗生性存在显著差异, 其中选择性较强的陕麦 139 和西农 88 的抗性最差, 重量损失最大, 表现为感虫, 如果继续种植, 应高度重视入仓前和储藏期管理; 选择性较弱的小偃 22、周麦 16 和周麦 11 敏感系数较低, 子代成虫数较少, 重量损失较小, 抗性较好。由于目前没有公认的小麦对玉米象抗性材料作对照, 因此本研究获得的抗性程度是相对的, 所得抗性品种在生产上应用前还需进一步验证。

表 1 不同小麦品种籽粒中化学物质组分含量

Table 1 Contents of chemical substances in wheat seeds of different wheat varieties									mg/g
品种 Variety	阿魏酸 Ferulic acid	总酚 Total phenol	可溶性糖 Soluble sugar	清蛋白 Albumin	球蛋白 Globulin	醇溶蛋白 Gliadin	谷蛋白 Glutenin	贮藏蛋白 Gluten protein	总蛋白 Total protein
西农 88 Xinong 88	0.59±0.02 c	1.17±0.08 ab	158.49±1.45 a	16.40±0.34 c	14.17±0.34 bc	16.28±0.65 d	29.52±0.90 a	45.80±1.50 a	76.37±0.96 ab
陕麦 139 Shaanmai 139	0.59±0.04 c	0.98±0.05 c	159.79±5.41 a	9.86±1.07 e	13.82±1.07 c	22.95±0.71 a	22.45±0.98 d	45.40±0.36 a	69.07±0.39 de
陕农 33 Shaannong 33	0.52±0.01 d	1.23±0.02 ab	148.59±6.01 ab	15.39±0.34 cd	14.78±0.34 bc	20.06±0.10 b	26.81±0.29 b	46.87±0.32 a	77.03±0.38 a
陕农 981 Shaannong 981	0.61±0.02 c	0.93±0.12 c	158.92±2.50 a	14.52±0.18 d	14.72±0.18 bc	20.08±0.46 b	25.23±0.73 bc	45.31±0.55 a	74.55±0.70 abc
周麦 18 Zhoumai 18	0.66±0.03 c	1.30±0.04 a	159.01±2.88 a	18.63±0.42 a	13.15±0.42 c	17.76±0.39 cd	22.61±0.43 d	40.38±0.35 b	72.16±1.35 cd
周麦 11 Zhoumai 11	0.77±0.01 ab	1.31±0.04 a	146.23±6.25 ab	17.90±0.66 ab	16.49±0.66 a	18.08±0.33 bcd	20.37±0.32 e	38.44±0.12 b	72.82±0.20 c
西农 165 Xinong165	0.72±0.01 b	1.06±0.04 bc	115.67±17.81 c	15.47±0.17 cd	11.36±0.17 d	19.47±1.46 bc	26.55±0.39 b	46.02±0.18 a	72.84±0.80 c
小偃 22 Xiaoyan 22	0.80±0.01 a	0.98±0.01 c	140.49±1.43 ab	16.73±0.39 bc	15.62±0.39 ab	16.67±0.45 d	24.36±0.76 cd	41.03±0.88 b	73.37±1.09 bc
周麦 16 Zhoumai 16	0.73±0.02 b	1.33±0.05 a	129.85±5.10 bc	17.79±0.47 ab	11.20±0.47 d	20.02±0.38 b	19.18±0.22 e	39.20±0.58 b	68.19±2.14 e

表中数据为平均数±标准误。同列不同字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。Data are mean±SE. Different letters in the same column indicate significant difference at $P<0.05$ level by Duncan's new multiple range test.

表 2 小麦籽粒中生化物质含量与其对玉米象抗性指标的关系

Table 2 Correlation between resistance indicators of wheat to <i>Sitophilus zeamais</i> and contents of various chemicals in wheat seeds												
抗性指标 Resistance indicator	成虫选择数 Number of choice for adults		成虫为害损失率 Weight loss rate caused by adults		卵至子代成虫发育历期 Egg to adult development duration		子代成虫数 Number of progeny		敏感系数 Susceptibility index		重量损失率 Percentage of weight loss	
	r	P	r	P	r	P	r	P	r	P	r	P
阿魏酸 Ferulic acid	-0.18	0.64	-0.52	0.15	0.62	0.07	-0.72	0.03*	-0.73	0.03*	-0.76	0.02*
总酚 Total phenol	-0.26	0.51	0.05	0.90	0.22	0.57	0.01	0.99	-0.03	0.94	-0.17	0.66
可溶性糖 Soluble sugar	-0.50	0.17	0.13	0.74	-0.76	0.02*	0.86	0.00**	0.89	0.00**	0.68	0.05*
清蛋白 Albumin	-0.43	0.25	-0.24	0.53	0.50	0.18	-0.37	0.33	-0.41	0.28	-0.50	0.17
球蛋白 Globulin	-0.47	0.20	0.08	0.83	-0.52	0.15	0.22	0.57	0.30	0.43	0.17	0.66
醇溶蛋白 Gliadin	0.32	0.41	0.51	0.16	-0.11	0.78	0.11	0.77	0.15	0.71	0.09	0.83
谷蛋白 Glutenin	0.44	0.23	0.28	0.46	-0.30	0.43	0.27	0.48	0.24	0.54	0.56	0.11
贮藏蛋白 Gluten protein	0.64	0.07	0.60	0.09	-0.37	0.33	0.34	0.37	0.32	0.40	0.61	0.08
总蛋白 Total protein	0.05	0.89	-0.10	0.79	-0.29	0.45	0.19	0.62	0.19	0.63	0.35	0.36

*和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著相关。* or ** shows significant correlation at $P<0.05$ or $P<0.01$ level, respectively.

在自由选择试验中,成虫一般趋向于抗生性较弱的品种,但西农 165 子代成虫数最少、敏感系数最小,成虫的选择性却最强,致使其为害损失率偏高。研究表明,挥发性气味物质在昆虫的寄主选择中发

挥着重要作用(Bruce et al., 2005), 在储粮害虫中也发现了类似现象。如玉米象对寄主的趋向性、非寄主的趋避性(Ukeh et al., 2009)及其对稻谷不同品种的选择性均与挥发物密切相关(Trematerra, 2009), 推测西农 165 释放的挥发物可能对玉米象有强烈的吸引作用。关于玉米象寄主选择性与小麦挥发物的关系还需进一步研究, 明确引起选择作用的关键挥发物组分, 为研发玉米象引诱剂奠定基础。

酚类作为重要的防御性化合物, 含量高低与寄主抗虫性密切相关(Ramputhet al., 1999; Demissie et al., 2015)。本研究中, 尽管小麦对玉米象的抗性与总酚含量关系不明显, 但与酚类物质阿魏酸含量显著正相关, 这与 Serratos et al. (1987) 和 Classen et al. (1990) 认为玉米对玉米象的抗性与阿魏酸含量显著正相关的结果相似。可溶性糖含量是影响小麦对玉米象抗性的重要因素, 含量越高小麦重量损失率和敏感系数越大, 玉米象子代成虫数越多、发育越快, 这一结论与不同玉米品种对玉米象和大谷蠹 *Prostephanus truncatus* (Horn) 抗性的结论相同(Serratos et al., 1987; Nwankwo et al., 2014), 表明寄主可溶性糖含量可以作为抗虫指标并加以利用。

小麦蛋白组分比较复杂, 按其溶解性分为清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白, 其中贮藏蛋白主要由醇溶蛋白和谷蛋白组成(刘志华等, 2003)。研究表明, 食料中缺少某些蛋白组分, 储粮害虫发育不良(Nawrot et al., 1985), 但当种子蛋白含量过高时, 可能超出昆虫发育的最适需求, 反而不利于昆虫取食和生长(Arnason et al., 1993)。目前关于储粮抗虫性与蛋白质含量之间关系的研究结果也不尽一致。Nwosu (2016) 认为玉米对玉米象的抗性与蛋白含量显著负相关, 而 Classen et al. (1990) 表明二者显著正相关。本研究中小麦对玉米象的抗性与 4 种蛋白组分、贮藏蛋白和总蛋白含量关系均无显著相关性, 与 Mikami et al. (2012) 报道的玉米对玉米象抗性与蛋白含量相关性不显著的结果一致。可见储粮抗虫性与蛋白质含量之间的关系比较复杂, 故在进行抗性评价时应综合考虑多种因素。本试验仅对小麦籽粒中几种常见次生物质和营养物质含量与玉米象抗性的关系进行了研究, 其它与寄主抗虫性有关物质如蛋白酶抑制剂、淀粉酶抑制剂等与玉米象抗性的关系还有待进一步研究。

参 考 文 献 (References)

Antunes C, Mendes R, Lima A, Barros G, Fields P, Da Costa LB, Ro-

drigues JC, Silva MJ, Correia AM, Carvalho MO. 2016. Resistance of rice varieties to the stored-product insect, *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). *Journal of Economic Entomology*, 109(1): 445–453

Arnason JT, Lambert JDH, Gale J, Mihm J, Bjarnason M, Jewell D, Serratos JA, Fregeau-Reid J, Pietrzak L. 1993. Is “quality protein” maize more susceptible than normal cultivars to attack by the maize weevil *Sitophilus zeamais*? *Postharvest Biology and Technology*, 2(4): 349–358

Bai XG. 2008. Storage pests and control. Beijing: Science Press, pp. 214–215 (in Chinese) [白旭光. 2008. 储藏物害虫与防治. 北京: 科学出版社, pp. 214–215]

Bonoli M, Verardo V, Marconi E, Caboni MF. 2004. Antioxidant phenols in barley (*Hordeum vulgare* L.) flour: comparative spectrophotometric study among extraction methods of free and bound phenolic compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(16): 5195–5200

Bradford MM. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72(1/2): 248–254

Bruce TJ, Wadhams LJ, Woodcock CM. 2005. Insect host location: a volatile situation. *Trends in Plant Science*, 10(6): 269–274

Cheng WN, Lei JX, Ahn JE, Liu TX, Zhu-Salzman KY. 2012. Effects of decreased O₂ and elevated CO₂ on survival, development, and gene expression in cowpea bruchids. *Journal of Insect Physiology*, 58(6): 792–800

Classen D, Arnason JT, Serratos JA, Lambert JDH, Nozzolillo C, Philogène BJR. 1990. Correlation of phenolic acid content of maize to resistance to *Sitophilus zeamais*, the maize weevil, in CIMMYT'S collections. *Journal of Chemical Ecology*, 16(2): 301–315

Demissie G, Swaminathan R, Ameta OP, Jain HK, Saharan V. 2015. Biochemical basis of resistance in different varieties of maize for their relative susceptibility to *Sitotroga cerealella* (Olivier) (Lepidoptera: Gelechiidae). *Journal of Stored Products and Postharvest Research*, 6(1): 1–12

Dexter JE, Marchylo BA, Macgregor AW, Tkachuk R. 1989. The structure and protein composition of vitreous, piebald and starchy durum wheat kernels. *Journal of Cereal Science*, 10(1): 19–32

Dobie P. 1974. The laboratory assessment of the inherent susceptibility of maize varieties to post-harvest infestation by *Sitophilus zeamais* Motsch. (Coleoptera, Curculionidae). *Journal of Stored Products Research*, 10(3): 183–197

Lale NES, Kartay MO. 2006. Role of physical characteristics of the seed in the resistance of local cultivars of maize to *Sitophilus zeamais* infestation in storage. *Tropical Science*, 46(1): 1–3

Liu ZH, Hu SL, Han ZJ, Jiang ZF. 2003. Relationship between protein compositions of wheat and bread making quality. *Cereals and Oils*, (10): 7–9 (in Chinese) [刘志华, 胡尚连, 韩占江, 姜振峰. 2003. 小麦蛋白质组分与加工品质关系. *粮食与油脂*, (10): 7–9]

Mikami AY, Carpentieri-Pípulo V, Ventura MU. 2012. Resistance of

- maize landraces to the maize weevil *Sitophilus zeamais* Motsch. (Coleoptera: Curculionidae). Neotropical Entomology, 41(5): 404–408
- Nawrot J, Warchalewski JR, Stasinska B, Nowakowska K. 1985. The effect of grain albumins, globulins and gliadins on larval development and longevity and fecundity of some stored produce pest. Entomologia Experimentalis et Applicata, 37(2): 187–192
- Nwankwo EN, Egwuatu RI, Okonkwo NJ, Boateng BA. 2014. Screening of ten maize varieties, *Zea mays* (L.) for resistance against *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera: Bostrichidae) from different zones of Nigeria and Ghana. Academic Journal of Entomology, 7(1): 17–26
- Nwosu LC. 2016. Chemical bases for maize grain resistance to infestation and damage by the maize weevil, *Sitophilus zeamais* Motschulsky. Journal of Stored Products Research, 69: 41–50
- Ramputh A, Teshome A, Bergvinson DJ, Nozzolillo C, Arnason JT. 1999. Soluble phenolic content as an indicator of sorghum grain resistance to *Sitophilus oryzae* (Coleoptera: Curculionidae). Journal of Stored Products Research, 35(1): 57–64
- Serratos A, Arnason JT, Nozzolillo C, Lambert JDH, Philogene BJR, Fulcher G, Davidson K, Peacock L, Atkinson J, Morand P. 1987. Factors contributing to resistance of exotic maize populations to maize weevil, *Sitophilus zeamais*. Journal of Chemical Ecology, 13(4): 751–762
- Suleiman R, Rosentrater KA, Bern CJ. 2015. Evaluation of maize weevils *Sitophilus zeamais* Motschulsky infestation on seven varieties of maize. Journal of Stored Products Research, 64: 97–102
- Trematerra P. 2009. Preferences of *Sitophilus zeamais* to different types of Italian commercial rice and cereal pasta. Bulletin of Insectology, 62(1): 103–106
- Ukeh DA, Birkett MA, Bruce TJ, Allan EJ, Pickett JA, Mordue AJ. 2010. Behavioural responses of the maize weevil, *Sitophilus zeamais*, to host (stored-grain) and non-host plant volatiles. Pest Management Science, 66(1): 44–50
- Wang D, Du JH. 2011. Rapid determination of ferulic acid in wheats and malts by colorimetry. Food and Fermentation Industries, 37(1): 146–151 (in Chinese) [王丹, 杜金华. 2011. 比色法快速测定小麦及其麦芽中的阿魏酸. 食品与发酵工业, 37(1): 146–151]
- Wong N, Lee CY. 2011. Relationship between population growth of the red flour beetle *Tribolium castaneum* and protein and carbohydrate content in flour and starch. Journal of Economic Entomology, 104(6): 2087–2094
- Xu ZZ, Yu ZW, Wang D, Zhang YL. 2003. Effect of irrigation conditions on protein composition accumulation of grain and its quality in winter wheat. Acta Agronomica Sinica, 29(5): 682–687 (in Chinese) [许振柱, 于振文, 王东, 张永丽. 2003. 灌溉条件对小麦籽粒蛋白质组分积累及其品质的影响. 作物学报, 29(5): 682–687]
- Yang YH, Zhang QW, Liu XX. 2013. The relationship between the contents of nutrients and tannins in different cotton varieties and their resistance to *Apolygus lucorum*. Scientia Agricultura Sinica, 46(22): 4688–4697 (in Chinese) [杨宇晖, 张青文, 刘小侠. 2013. 棉花营养物质和单宁含量与其对绿盲蝽抗性的关系. 中国农业科学, 46(22): 4688–4697]
- Zhang HY, Deng WX. 1993. The application of fuzzy clustering analysis for studying the resistance of stored rice grain of different varieties to maize weevil. Journal of Plant Protection, 20(1): 49–53 (in Chinese) [张宏宇, 邓望喜. 1993. 稻谷在储藏期对玉米象抗性的模糊聚类分析. 植物保护学报, 20(1): 49–53]
- Zheng X, Fan JS, Zhang LX. 2014. Research advances on the bionomics and control of *Sitophilus zeamais* M. Chinese Agricultural Science Bulletin, 30(4): 221–225 (in Chinese) [郑旭, 范锦胜, 张李香. 2014. 玉米象生物生态学及防治技术研究进展. 中国农学通报, 30(4): 221–225]

(责任编辑:王璇)