

3 种铁核桃对云斑白条天牛的抗性研究^{*}

徐 蕾¹ 郭春晖² 杨振德³ 庞洁芳¹ 陆节婷¹
杨 琼¹ 邝超娟⁴

(1. 钦州市林业科学研究所, 广西 钦州 535012; 2. 生态环境部黄河流域生态环境监督管理局生态环境监测与科学研究中心, 河南 郑州 450004; 3. 广西大学林学院, 广西 南宁 530004; 4. 钦州市林业局, 广西 钦州 535009)

摘要 为筛选出对云斑白条天牛 *Batocera lineolata* 具有抗性的铁核桃 *Juglans sigillata* 品种, 找出影响铁核桃抗虫性的主要化学物质, 在细香核桃 *J. sigillata* cv. ‘Xixiang’、龙佳核桃 *J. sigillata* cv. ‘Niangqing’ × *J. sigillata* cv. ‘Yangbidapao’ 和娘青核桃 *J. sigillata* cv. ‘Niangqing’ 3 种铁核桃苗上接种云斑白条天牛成虫, 比较受害面积并测定为害前后 3 个铁核桃品种树皮的营养物质、次生代谢物质含量、保护酶和蛋白酶抑制剂活性差异, 选出抗虫性最强的铁核桃品种。结果表明, 娘青核桃受到云斑白条天牛成虫的为害面积最小, 为 0.000 7 m², 影响铁核桃树皮抗虫性的主要营养和次生代谢物质是可溶性蛋白质和总酚; 影响铁核桃树皮抗虫性的主要保护酶和蛋白酶抑制剂分别是超氧化物歧化酶和胰凝乳蛋白酶抑制剂, 娘青核桃的抗虫性综合得分最高。由此得出, 3 个铁核桃品种中娘青核桃的抗虫性最强, 可溶性蛋白质、总酚、超氧化物歧化酶和胰凝乳蛋白酶抑制剂是影响铁核桃树皮抗虫性的主要物质。

关键词 铁核桃; 云斑白条天牛; 成虫; 抗虫性

中图分类号: S763.38 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-2053 (2024) 02-0069-08

Resistance of Three Varieties *Juglans sigillata* to *Batocera lineolata*

XU Lei¹ GUO Chunhui² YANG Zhende³ PANG Jiefang¹ LU Jieting¹
YANG Qiong¹ KUANG Chaojuan⁴

(1. Qinzhou Forestry Science Institute, Qinzhou, Guangxi 535012, China; 2. Ecological Environment Monitoring and Scientific Research Center, Yellow River Basin Ecology and Environment Administration, Ministry of Ecology and Environment, Zhengzhou, Henan 450004, China; 3. Forestry College, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China; 4. Forestry Bureau of Qinzhou City, Qinzhou, Guangxi 535009, China)

Abstract To screen out walnut varieties with excellent resistance to the *Batocera lineolata*. Find out the main chemicals that affect walnut insect resistance. Inoculate adults *B. lineolata* on the walnut Xixiang; Longjia and Niangqing seedlings. Compare the feeding area of different walnut varieties and measure the differences in nutrients, secondary metabolites, protective enzymes and protease inhibitors activities of bark of the three walnut varieties before and after affected. The result shows that the bark of Niangqing walnuts was the least affected by adult *B. lineolata*, which was 0.000 7 m², the main nutrients and secondary metabolites affecting insect resistance of walnut bark were soluble protein and total phenols. The main protective enzymes and protease inhibi-

^{*} 基金项目: 广西自然科学基金 (2017GXNSFAA198142), 创建国家森林城市专项—林木新品种引进及病虫害防治项目 (钦市财预 [2022] 32 号)。

第一作者: 徐蕾 (1995—), 女, 助理工程师, 主要从事森林保护学研究, E-mail: 903108032@qq.com。

通信作者: 杨振德 (1965—), 男, 教授, 主要从事植物生理生态和森林保护研究, E-mail: dzyang68@126.com。

tors affecting the insect resistance of walnut are superoxide dismutase and chymostatin inhibitor, among which the comprehensive score of insect resistance of the bark of Niangqing walnut is the highest. In conclusion, Niangqing walnut had the strongest insect resistance. Soluble proteins, total phenols, superoxide dismutase and chymotrypsin inhibitors are the main substances affecting the insect resistance of walnut bark. The result laid the foundation for the breeding of new walnut varieties and the study of plant resistance mechanism.

Key words *Juglans sigillata*; *Batocera lineolata*; adult insect; insect resistance

铁核桃 *Juglans sigillata* 是胡桃科 Juglandaceae 胡桃属植物, 别名漾濞核桃、泡核桃等, 原产于我国西南地区, 是我国的原产树种之一^[1]。细香核桃 *J. sigillata* cv. ‘Xixiang’、龙佳核桃 *J. sigillata* cv. ‘Niangqing’ × *J. sigillata* cv. ‘Yangbidapao’ 和娘青核桃 *J. sigillata* cv. ‘Niangqing’ 均是从铁核桃中筛选出的优良品种^[2-5]。

云斑白条天牛 *Batocera lineolata* 是鞘翅目 Coleoptera 天牛科 Cerambycidae 昆虫, 分布范围广, 是林业有害生物的优势种, 主要危害的寄主有铁核桃、桉树、杨树、桑树 *Morus alba* 等^[6]。2005 年广西壮族自治区桂林市约有 26 hm² 的 15 a 生中径材桉树林受云斑天牛危害, 受害率达 20% 以上, 并导致桉树大量死亡^[7]。据调查, 永善县核桃林中云斑白条天牛的有虫株率为 50%, 最高可达 74 粒/株, 当核桃在受到云斑白条天牛的蛀食后, 会更容易引起其他害虫和病菌的侵入, 还容易被强风吹断, 甚至枯死^[8-9]。

细香、龙佳和娘青核桃作为广西壮族自治区河池市新引种的铁核桃品种, 在河池市各县均有种植。随着引种栽培范围的逐渐扩大, 在推广前进行云斑白条天牛的抗性研究对铁核桃新品种的选育及植物抗性机制研究具有重要意义。本研究通过分析影响铁核桃树皮抗虫性的主要营养物质、次生代谢物质和酶类物质, 筛选出 3 个铁核桃品种中抗虫性最强的铁核桃品种并找出影响铁核桃抗虫性的主要物质, 为铁核桃新品种的选育及植物抗性机制研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于广西大学林学院林学教学实践基地 (108°17'E, 22°50'N), 气候为典型的亚热带季风气候, 雨量充沛、气候温和; 年平均气温 22.0 °C, 年均降雨量约 1 300 mm, 平均相对湿度为 79%。

1.2 供试材料

供试的 3 个铁核桃品种均为 1 a 生嫁接铁核桃苗, 种植于广西大学林学院教学实践基地, 行距为 30 cm。恢复生长 2 个月后于 2020 年 5 月选择健康、无病虫害且长势相似的植株进行人工接虫试验和化学指标的测定, 其中平均苗高 92 cm, 平均地径 2.8 cm。

1.3 研究方法

1.3.1 树上套笼接虫 参照胡建军^[10]的人工接虫方法树上套笼接虫, 将 16 目的铁丝网裁剪成 60 cm×50 cm 的小块, 把铁丝网插入土中, 在核桃树基部围成一个高约 40 cm 的笼子, 用铁丝进行封边处理, 然后将成虫云斑白条天牛放入笼中, 最后用铁丝将笼子封严, 每个核桃品种各选取 3 株进行试验, 1 个笼中放 1 头云斑白条天牛成虫, 共计放入云斑白条天牛 9 头。

1.3.2 受害面积测定 把云斑白条天牛成虫接种在温室大棚的铁核桃苗后, 每日观察并计算接种一周后的受害面积, 铁核桃受害面积采用方格纸法测定。

1.3.3 树皮化学物质含量测定 用紫外分光光度计 UV-1801 测定树皮的化学物质含量。参照文献 [11-18] 的方法进行测定, 酶活测定分别在 3、6、13 天时进行测定。计算公式如下:

$$\text{POD 活力(A)} = \frac{\text{OD}_{470} \times V}{0.01 \times t \times V_s \times W_0} \quad (1)$$

$$\text{SOD 活力(A)} = \frac{(\text{OD}_0 - \text{OD}_1) \times V}{0.5 \times \text{OD}_0 \times t \times V_s \times W_0} \quad (2)$$

$$\text{CAT 活力(A)} = \frac{(\text{OD}_0 - \text{OD}_1) \times V}{0.1 \times t \times V_s \times W_0} \quad (3)$$

$$\text{PPO 活力(A)} = \frac{(\text{OD}_0 - \text{OD}_1) \times V}{0.01 \times t \times V_s \times W_0} \quad (4)$$

$$\text{TI 活力(A)} = \text{OD}_{256} / (0.01 \times V \times E_w) \quad (5)$$

$$\text{CI 活力(A)} = \text{OD}_{253} / (0.964 \times V \times E_w) \quad (6)$$

注: OD 表示吸光度数值的变化量, OD_0 表示初始吸光值, OD_1 表示最终吸光值, V 表示提取液总体积 (mL), t 表示反应时间 (s), V_s 表示待测液体积 (mL), W_0 表示铁核桃树皮样品质量 (g), E_w 表示含酶量 (mg)。

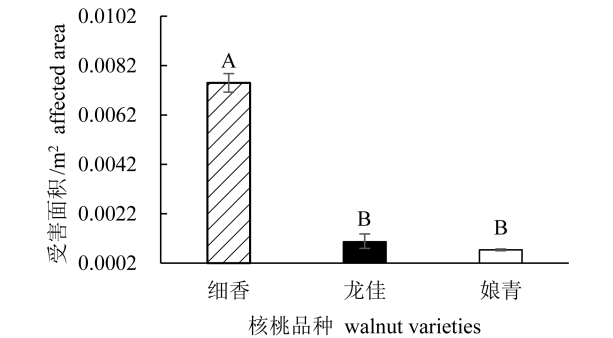
1.4 数据分析

用 Excel 2010 对各数据进行处理并制作相应的表格、折线图和柱形图, 运用 SPSS 22.0 对各组数据分别进行方差分析、相关性分析以及主成分分析。

2 结果与分析

2.1 铁核桃品种受害面积的比较分析

接种云斑白条天牛成虫一周后, 对细香、龙佳和娘青核桃的受害面积进行比较分析, 得出细香核桃的受害面积最大, 为 0.0075 m^2 , 极显著高于龙佳和娘青核桃 ($P<0.01$), 娘青核桃的受害面积最小, 为 0.0007 m^2 , 龙佳核桃和娘青核桃之间差异不显著 (图 1)。



注: 大写字母表示品种间差异极显著 ($P<0.01$)。
Note: Capital letters indicate very significant differences between varieties ($P<0.01$).

图 1 3 个铁核桃品种受害面积
Fig. 1 The affected area of three walnut varieties

2.2 为害前后铁核桃品种树皮化学物质含量

2.2.1 营养物质含量 为害前细香核桃树皮的可溶性糖、还原糖和可溶性蛋白质含量均值极显著高于龙佳和娘青核桃 ($P<0.01$); 为害后 3 个品种铁核桃树皮的可溶性糖、还原糖含量均下降, 细香核桃的降幅最大, 为 83.84% 和 43.10%, 可溶性蛋白质含量在受害后没有发现明显规律。受害对 3 个铁核桃品种树皮的还原糖含量均存在极显著影响 ($P<0.01$), 对细香和龙佳核桃树皮的可溶性糖含量存在极显著影响 ($P<0.01$), 对 3 个品种的可溶性蛋白质含量无显著影响 (表 1)。

2.2.2 次生物质含量 为害前娘青核桃树皮的单宁含量极显著高于龙佳和细香核桃 ($P<0.01$); 总酚含量极显著低于龙佳和细香核桃; 龙佳核桃树皮的黄酮含量极显著高于细香核桃和娘青核桃 ($P<0.01$)。为害后 3 个品种树皮的单宁、总酚含量差异极显著 ($P<0.01$), 细香核桃的变化率最大, 为 6.38% 和 13.05%。受害对 3 个品种铁核桃树皮的黄酮含量存在极显著影响 ($P<0.01$) (表 2)。

2.3 为害前后 3 个铁核桃品种树皮保护酶及蛋白酶抑制剂活性

2.3.1 保护酶活性 为害前, 娘青核桃树皮 POD 活性极显著高于龙佳核桃和细香核桃 ($P<0.01$); 细香、娘青核桃树皮 SOD 活性极显著高于龙佳核桃 ($P<0.01$); 3 个铁核桃品种树皮的 CAT 活性差异极显著 ($P<0.01$); 娘青核桃树皮的 PPO 活性极显著高于龙佳核桃和细香核桃 ($P<0.01$)。为害后, 3 个品种铁核桃树皮的 SOD 活性随着受害过后时间的延长, 均出现先下降后上升的趋势, CAT 活性随着为害过后时间的延长, 细香核桃和娘青核桃呈上升趋势, 龙佳核桃呈先上升后下降的趋势; POD 活性随着为害时间的延长,

表 1 云斑白条天牛为害前后 3 个铁核桃品种树皮营养物质质量分数 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$

Table 1 The nutrient content of the bark of the three walnut varieties before and after the injury

铁核桃品种 Walnut varieties	可溶性糖 Soluble sugar			还原糖 Reducing sugar			可溶性蛋白质 Soluble protein		
	未受害 Not injured	受害 Injured	显著性 Significance	未受害 Not injured	受害 Injured	显著性 Significance	未受害 Not injured	受害 Injured	显著性 Significance
细香	0.072±0.000A	0.012±0.000C	**	0.292±0.003A	0.166±0.006A	**	24.240±1.110A	25.213±0.899A	—
龙佳	0.014±0.000C	0.013±0.000B	**	0.127±0.004C	0.094±0.002B	**	16.427±0.380B	16.000±0.360B	—
娘青	0.015±0.000B	0.015±0.000A	—	0.187±0.004B	0.172±0.005A	**	12.423±0.421C	14.120±0.458C	—

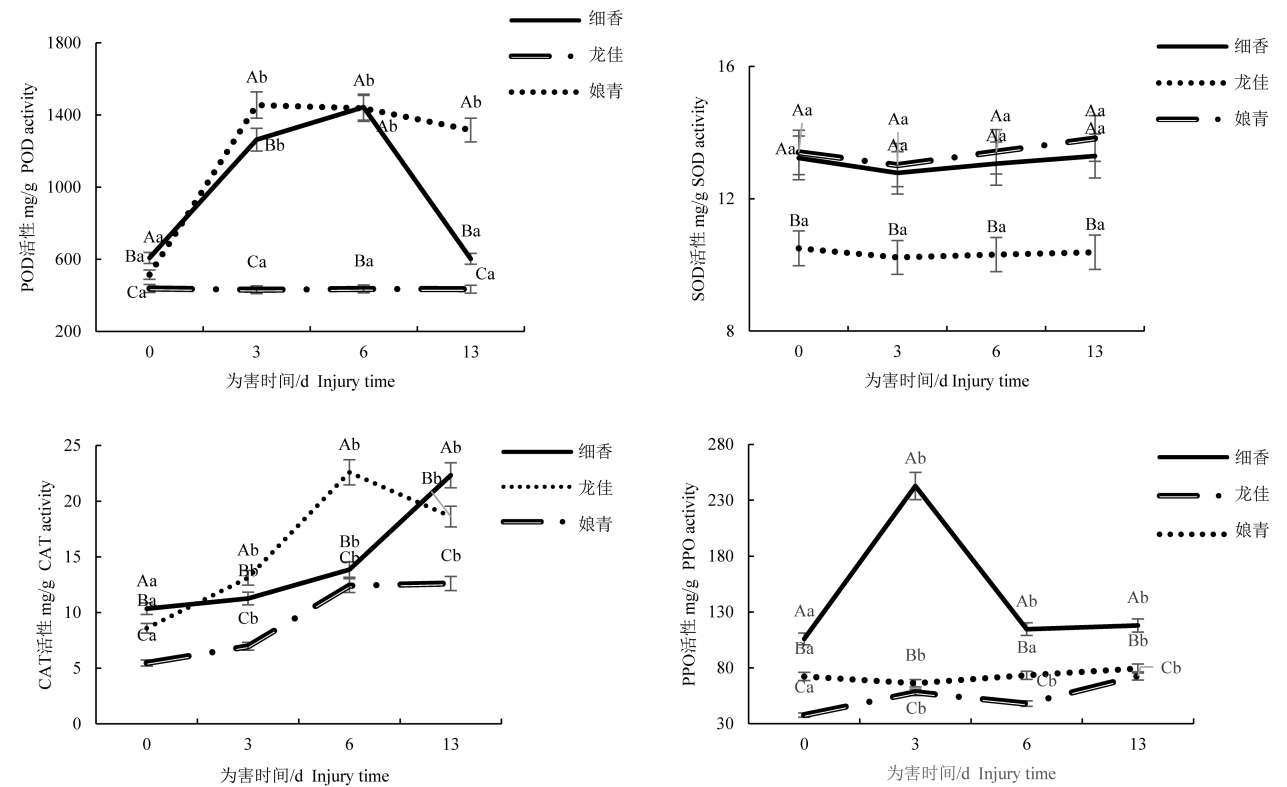
注: 不同大写字母代表每一列差异极显著 ($P<0.01$), “**” 代表受害前与受害后差异极显著 ($P<0.01$), “—” 表示差异不显著。
Note: Different capital letters represent very significant differences in each column ($P<0.01$), “**” represents very significant differences before and after victimization ($P<0.01$), “—” represents no significant differences before and after victimization.

细香和娘青核桃树皮的出现先上升后下降的趋势。树皮出现先上升后下降又趋于平稳的趋势，而细 PPO 活性随着为害时间的延长，娘青和龙佳核桃香核桃的 PPO 活性变化不大。

表 2 为害前后 3 个铁核桃品种树皮次生物质质量分数 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$
Table 2 Bark secondary substance content of three walnut varieties before and after injury

铁核桃 品种 Walnut varieties	单宁 Tannin			总酚 Total phenolic			黄酮 Flavonoid		
	未受害 Not injured	受害 Injured	显著性 Significance	未受害 Not injured	受害 Injured	显著性 Significance	未受害 Not injured	受害 Injured	显著性 Significance
细香	0.627±0.034C	0.667±0.034C	—	74.863±0.381A	65.093±4.689B	**	15.190±0.409B	21.723±1.316	**
龙佳	1.118±0.059B	1.098±0.068B	—	76.657±0.661A	71.357±1.184A	*	16.957±0.058A	20.140±0.568	**
娘青	1.921±0.034A	1.902±0.034A	—	59.470±1.957B	57.323±2.031C	—	11.990±0.180C	19.790±0.638	**

注：不同大写字母代表每一列差异极显著 ($P<0.01$)，“*”代表受害前与受害后差异显著 ($P<0.05$)，“**”代表受害前与受害后差异极显著 ($P<0.01$)，“—”表示受害前与受害后差异不显著。
Note: Different capital letters represent very significant differences in each column ($P<0.01$), “*” represents significant differences before and after victimization ($P<0.05$), “**” represents very significant differences before and after victimization ($P<0.01$), “—” represents no significant differences before and after victimization.



注：数据为平均值±标准误。大写字母表示品种间差异极显著 ($P<0.01$)，小写字母表示为害前与为害后差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Data are mean ± standard error. Capital letters indicate very significant differences between varieties ($P<0.01$), lowercase letters indicate a significant difference between before and after victimization ($P<0.05$).

图 2 3 个铁核桃品种树皮被为害后不同时间保护酶活性
Fig. 2 The protective enzyme activity of three walnut bark at different time after injury

2.3.2 蛋白酶抑制剂活性 为害前 3 个品种铁核桃树皮的胰蛋白酶抑制剂活性 (Trypsin inhibitor, TI) 和胰凝乳蛋白酶抑制剂活性 (chymostatin inhibitor, CI) 活性存在极显著差异 ($P<0.01$)，龙佳核桃的 TI 活性均值最高，为 0.678 U/g，细香核桃的 CI 活性最高，为 15.370 U/g；为害后细香核桃的 TI 活性最低，为 0.495 U/g，娘青核桃树皮的 CI 活性最低，为 10.210 U/g。3 个品种铁

核桃树皮的 TI 活性变化值排序为娘青>细香>龙佳, CI 活性变化值排序为龙佳>娘青>细香。受害对细香核桃和娘青核桃树皮的 TI 均值存在极显著影响 ($P<0.01$), 对龙佳核桃和娘青核桃树皮的 CI 均值存在极显著影响 ($P<0.01$) (表 3)。

表 3 为害前后铁核桃树皮胰蛋白酶抑制剂 (胰凝乳蛋白酶抑制剂) 活性 $U \cdot g^{-1}$
Tab. 3 The activity of trypsin inhibitor (chymotrypsin inhibitor) in walnut bark before and after injury

铁核桃 品种 Walnut varieties	TI			CI		
	为害前均值 /($U \cdot g^{-1}$)	为害后均值 /($U \cdot g^{-1}$)	显著性 significance	为害前均值 /($U \cdot g^{-1}$)	为害后均值 /($U \cdot g^{-1}$)	显著性 significance
	The mean of TI before injury	The mean of TI after injury		The mean of CI before injury	The mean of CI after injury	
细香	0.340±0.110B	0.495±0.026C	**	15.370±0.433A	15.983±0.360A	—
龙佳	0.678±0.019A	0.722±0.019B	—	9.620±0.229B	11.733±0.469B	**
娘青	0.434±0.018B	0.956±0.019A	**	8.923±0.391C	10.210±0.229C	**

注: 数据为平均值±标准误。大写字母表示品种间差异极显著 ($P<0.01$)。“—”表示差异不显著。
Note: Data are mean ± standard error. Capital letters indicate very significant differences between varieties ($P<0.01$), “—” represents no significant differences before and after victimization.

2. 4 3 个铁核桃品种抗虫性主成分分析

比较 3 个铁核桃品种树皮生理生化指标、树皮的受害面积与抗成虫云斑白条天牛之间的相关性; 探究这 13 个指标 (可溶性糖、还原糖、可溶性蛋白质、单宁、总酚、黄酮、CAT 活性、SOD 活性、POD 活性、PPO 活性、CI 活性、TI 活性和受害面积) 是否可以作为铁核桃对成虫云斑白条天牛抗性强弱的衡量指标。主要结果如下。

(1) 对 3 个铁核桃品种树皮的 13 个指标进行皮尔森相关性分析 (表 4), 结果表明: 可溶性糖与还原糖、CI 活性呈极显著正相关 ($P<0.01$); 可溶性蛋白质与单宁和 TI 活性呈极显著负相关 ($P<0.01$), 与 PPO 活性和 CI 活性呈极显著正相关 ($P<0.01$); 单宁与总酚、CAT 活性和 CI 活性呈极显著负相关 ($P<0.01$); POD 活性与 TI 活性呈极显著负相关 ($P<0.01$); PPO 活性与 CI 活性呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与 TI 活性呈极显著负相关 ($P<0.01$); 受害面积与可溶性蛋白质、黄酮、PPO 活性呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与 TI 活性呈极显著负相关 ($P<0.01$)。

(2) 对铁核桃树皮的 13 个指标进行主成分分析。结果表明, 铁核桃树皮的第 1 主成分主要为可溶性蛋白质和 CI 活性, 第 2 主成分主要为可溶性糖、POD 活性和总酚, 第 3 主成分主要为 SOD 活性和还原糖。

(3) 根据铁核桃树皮主成分分析表, 求出细香、龙佳、娘青核桃对云斑白条天牛成虫的综合

抗虫性得分。结果表明, 3 个品种铁核桃抗成虫云斑白条天牛的综合得分为细香核桃-0.95 分、龙佳核桃-0.76 分、娘青核桃 1.71 分 (表 6)。从综合得分和排序可以看出, 对于虫害的相关抗性物质生化响应, 娘青核桃的抗虫性是 3 个铁核桃品种中最强的。

3 结论与讨论

植物对昆虫的化学抗性机制是非常复杂的, 植物体内的营养物质含量差异以及特异性次生物质共同决定着植物对昆虫的抗性^[19-21]。在被害虫取食为害后, 植物体内的可溶性糖、可溶性蛋白质等营养物质含量会发生变化, 例如辣椒 *Capsicum annuum* 叶片在受到西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* 的迫害后可溶性糖含量会下降^[22-23]。高感桉树无性系在受到枝瘿姬小蜂 *Leptocybe invasa* 的侵害后, 其叶片中的可溶性蛋白质含量显著增加^[24]。关于次生代谢物质与植物抗虫性之间的关系, 有研究指出植物体内的单宁含量越高, 树种的抗性就越强^[25-26]。随着蓟马为害时间的延长, 不同辣椒品种体内的总酚含量均呈现不同程度的持续降低, 抗性品种的总酚含量降幅始终显著低于高感品种^[27], 这与本研究中铁核桃品种受到云斑白条天牛为害后总酚含量变化规律一致。由此, 我们得出总酚参与了铁核桃抵御天牛为害的生化反应, 进一步说明了酚类物质可以作为铁核桃抗虫性的指标之一。

表 4 铁核桃树皮生理生化指标的相关系数
Tab. 4 Correlation coefficient of physiological and biochemical indexes of walnut bark

指标 Index	可溶性糖	还原糖	可溶性 蛋白质	单宁	总酚	黄酮	CAT 活性	SOD 活性	POD 活性	PPO 活性	CI 活性	TI 活性	受害 面积
可溶性糖 Soluble sugar	1												
还原糖 Reducing sugar	0.871 **	1											
可溶性蛋白质 Soluble protein	0.518 *	0.467	1										
单宁 Tannin	-0.465	-0.224	-0.896 **	1									
总酚 Total phenolic	0.422	0.029	0.395	-0.711 **	1								
黄酮 Flavonoid	-0.366	-0.458	0.342	-0.341	-0.026	1							
CAT 活性 CAT activity	0.135	-0.214	0.576 *	-0.781 **	0.566 *	0.608 **	1						
SOD 活性 SOD activity	0.360	0.752 **	0.191	0.213	-0.552 *	-0.348	-0.511 *	1					
POD 活性 POD activity	-0.205	0.098	0.205	0.144	-0.617 **	0.564 *	-0.136	0.486 *	1				
PPO 活性 PPO activity	0.015	0.221	0.763 **	-0.528 *	-0.150	0.427	0.333	0.399	0.522 *	1			
CI 活性 CI activity	0.616 **	0.616 **	0.925 **	-0.831 **	0.453	0.025	0.372	0.299	0.038	0.682 **	1		
TI 活性 TI activity	-0.200	-0.228	-0.676 **	0.486 *	-0.025	-0.703 **	-0.431	-0.215	-0.736 **	-0.615 **	-0.481 *	1	
受害面积 Affected area	-0.282	-0.102	0.625 **	-0.457	-0.163	0.609 **	0.379	0.162	0.545 *	0.943 **	0.495 *	-0.590 **	1

注：“*”表示差异显著（ $P<0.05$ ），“**”表示差异极显著（ $P<0.01$ ）。
Note: “*” means significant difference ($P<0.05$), “**” means extremely significant difference ($P<0.01$).

在受到虫害胁迫等不利因素的影响下，植物自身除了改变化学物质含量来应对害虫的取食以外，还会通过改变体内酶类物质等防御方式对害虫的侵害行为产生一定的生理响应^[28-29]。有研究表明，在遭受染病、受害以及损伤后植物体内的CAT、POD等保护酶活性会出现高于未受害组的情况；不同品种大豆在被大豆食心虫*Leguminivora glycinivorella*为害后，蛋白酶抑制剂活性均高于对照组，抑制剂活性越高，表现出的抗虫性也越强^[30-33]。本研究中，抗性强的娘青核桃在被云斑白条天牛成虫取食为害后，其体内的CAT酶活性也呈现出随为害时间延长而升高的趋势。通过这些研究不难发现，昆虫取食或机械损伤诱导的抗

虫性，与植物体内防御酶有很大关系。寻找铁核桃的胰蛋白酶抑制剂基因也是今后需要进一步研究的内容。

细香、龙佳和娘青3个铁核桃品种中，娘青核桃受到云斑白条天牛成虫的取食为害面积最小且抗虫性综合得分最高，由此得出娘青核桃是抗虫性最强的铁核桃品种。在后期选育铁核桃抗虫性新品种时可以优先选取娘青核桃。除此之外，研究得出可溶性蛋白质、总酚、超氧化物歧化酶和胰凝乳蛋白酶抑制剂是影响铁核桃树皮抗虫性的主要物质，因此，也可以通过测定这几项生理指标得出铁核桃抗虫性的初步筛选品种。

表 5 铁核桃树皮生理生化指标的主成分分析

Tab. 5 Principal component analysis of physiological and biochemical indices of walnut bark

指标 Index	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2	主成分 3 Principal component 3	指标 Index	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2	主成分 3 Principal component 3
可溶性糖 Soluble sugar	0.393	0.770	0.363	SOD 活性 SOD activity	0.184	-0.061	0.964
还原糖 Reducing sugar	0.368	0.519	0.754	POD 活性 POD activity	0.355	-0.759	0.424
可溶性蛋白质 Soluble protein	0.973	0.181	0.030	PPO 活性 PPO activity	0.828	-0.357	0.201
单宁 Tannin	-0.854	-0.362	0.357	CI 活性 CI activity	0.864	0.386	0.175
总酚 Total phenolic	0.305	0.695	-0.578	TI 活性 TI activity	-0.792	0.345	-0.079
黄酮 Flavonoid	0.494	-0.646	-0.471	特征值 Eigenvalue	5.437	3.221	3.035
CAT 活性 CAT activity	0.619	0.081	-0.680	贡献率/% Contribution rate	41.823	24.781	23.344
受害面积 Affected area	0.729	-0.558	-0.031				

表 6 3 个铁核桃品种主成分综合得分

Tab. 6 The comprehensive scores of principal components of three walnut varieties

铁核桃品种 Walnut varieties	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2	主成分 3 Principal component 3	综合得分 Overall score	排序 Sort
娘青	3.00	1.06	0.68	1.71	1
龙佳	-0.91	0.42	-2.22	-0.76	2
细香	-2.09	-0.93	1.54	-0.95	3

参考文献

[1] 韩华柏,何方. 我国核桃育种的回顾和展望[J]. 经济林研究,2004,22(3):45-50.

[2] 董静,张雨,冯倩,等. 云南 3 个良种核桃的种实特征与品质评价[J]. 经济林研究,2010,28(4):79-82.

[3] 胡祥,刘云,徐涵,等. ‘龙佳’核桃品质分析及蛋白质提取工艺优化[J]. 食品科技,2021,46(2):225-231.

[4] 苏为耿,陆斌,刘金凤,等. 短侧枝挂果核桃优良品种选择[J]. 广西林业科学,2012(3):248-251.

[5] 李俊南,梁林波,习学良,等. 不同海拔下娘青核桃坚果性状及营养特征分析[J]. 经济林研究,2019,37(4):44-49.

[6] 吴广. 云斑天牛对核桃和桉树的选择性及适应机制初步研究[D]. 南宁:广西大学,2019.

[7] 奚福生,罗基同,李贵玉,等. 中国桉树病虫害及害虫天敌[M]. 南宁:广西科学技术出版社,2007.

[8] 胡光辉,闫争亮,段兆尧,等. 云斑天牛对永善县核桃危害程度分析[J]. 西部林业科学,2018,47(5):104-107.

[9] 刘圣煌,杨江天,崔建新. 3 种天牛幼虫蛀食振动小波包特征及其识别[J]. 林业科学,2020,56(12):91-100.

[10] 胡建军,赵自成,苗世龙,等. 杨树人工接虫方法的研究[J]. 林业科学研究,1998,11(6):574-580.

[11] 路文静. 植物生理学实验教程[M]. 北京:中国林业出版社,2012.

[12] 李小芳. 植物生理学实验指导(第 5 版)[M]. 北京:高等教育出版社,2019,91-93.

[13] 刘慧文. 分光光度法快速测定核桃仁中总单宁含量[J]. 现代仪器,2010,16(6):35-36.

[14] 陈静. 遮光对铁核桃果实多酚积累及其相关基因表达

- 的影响[D]. 贵阳:贵州大学,2019.
- [15] 吴密,郭炳垚,陈泉亨,等. 瓜类作物营养成分与瓜类抗棕榈蓟马特性的相关性分析[J]. 南方农业学报, 2018,49(9):1776-1781.
- [16] 王燕芳,吴瑛. 外源水杨酸对棉花相关抗虫酶活性诱导的时间和浓度效应[J]. 江苏农业科学,2015,43(4):138-140.
- [17] 樊艳平,张耀文,赵雪英,等. 抗豆象绿豆胰蛋白酶抑制剂活性及理化性质[J]. 作物学报,2017,43(11):1696-1704.
- [18] 石媛媛,冯金周,于连海,等. 昆虫取食和剪叶刺激对油松针叶内部分防御物质的诱导效[J]. 河北农业大学学报,2017,40(1):81-86.
- [19] LIN PO-AN, PAUDEL SULAV, AFZAL AMIN, et al. Changes in tolerance and resistance of a plant to insect herbivores under variable water availability[J]. Environmental and Experimental Botany, 2021, 183(3):104334.
- [20] 李明阳,姚宇波,徐翔,等. 几种水稻对褐飞虱的抗性鉴定及抗性相关次生物质分析[J]. 应用昆虫学报, 2020,57(6):1375-1384.
- [21] RUMYANTSEV S D, VESELOVA S V, BURKHANOVA G F, et al. Induced resistance to the greenbug aphid *Schizaphis graminum* Rond. in species of the genus *Triticum*[J]. Vavilov Journal of Genetics and Breeding, 2019,23(7):865-872.
- [22] 李进步,方丽平,张亚楠,等. 不同类型品种棉花上棉蚜适生性及种群动态[J]. 昆虫学报,2007,50(10):1027-1033.
- [23] 贾彦霞,庞洪翠,姜灵,等. 辣椒叶片中单宁和总酚含量与其对西花蓟马抗性的关系[J]. 植物保护学报, 2018,45(5):1183-1184.
- [24] 王伟,徐建民,李光友,等. 桉树不同无性系叶片内含物变化与枝瘿姬小蜂抗性的关系[J]. 热带亚热带植物学报,2012,20(6):539-545.
- [25] 李会平,王志刚,杨敏生,等. 杨树单宁与酚类物质种类及含量与光肩星天牛危害之间关系的研究[J]. 河北农业大学学报,2003,26(1):36-39.
- [26] 周嘉熹,杨雪彦,宋占邦. 树木单宁含量可作为对两种星天牛的抗性指标[J]. 陕西林业科技,1996(4):15-18.
- [27] 贾彦霞,庞洪翠,姜灵,等. 辣椒叶片中单宁和总酚含量与其对西花蓟马抗性的关系[J]. 植物保护学报, 2018,45(5):1183-1184.
- [28] 杨雪彦,燕新华,周晓彬. 不同杨树营养物对黄斑星天牛抗性的研究[J]. 西北林学院学报,1992,7(3):26-33.
- [29] GAO HAOLI, ZOU JIANZHENG, LIN XUMIN, et al. *Nilaparvata lugens* salivary protein NIG14 triggered defense response in plants[J]. Journal of experimental botany, 2022,73(22):7477-7487.
- [30] 宋春满,高家合,邓建华,等. 寄主植物对云南烟蚜解毒酶和靶标酶活性的影响[J]. 西南农业大学学报, 2002,24(3):241-243.
- [31] 陈琳. 极端气候下杨树防御相关酶活性与烂皮病关系的研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2017.
- [32] 杨凡. 硅肥和虫害及机械损伤对油菜抗虫性的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.
- [33] 徐伟,张益恺,董亚南,等. 不同品种大豆蛋白酶抑制剂活性及其对大豆食心虫幼虫的影响[J]. 吉林农业大学学报,2019,41(3):267-273.