

# 茶籽象胁迫对油茶籽物质组成和功能的影响

李庆杨<sup>1,2</sup>, 崔茂凯<sup>1</sup>, 沈丹玉<sup>1</sup>, 倪张林<sup>1</sup>, 莫润宏<sup>1</sup>,  
张 威<sup>1</sup>, 舒金平<sup>1</sup>, 刘毅华<sup>1</sup>

(中国林业科学研究院亚热带林业研究所<sup>1</sup>, 杭州 311400)  
(浙江大学农业与生物技术学院农药与环境毒理研究所<sup>2</sup>, 杭州 310058)

**摘要:**为探究茶籽象(*Curculio chinensis*)胁迫对油茶籽物质组成及功能特性的影响,本研究以长林4号油茶为对象,比较了虫害籽与正常籽的物质组成及抗氧化特性差异。结果表明,虫害可显著改变油茶籽的脂肪酸组成和矿质元素含量:虫害籽单不饱和脂肪酸(C18:1)质量分数下降3.96%,而多不饱和脂肪酸(C18:2、C18:3)质量分数上升28.85%和25.93%;矿质元素Mg、P、Ti、Zn、Mo等质量分数整体降低10.41%~48.57%。抗氧化系统呈现特异性响应:脂氧合酶(LOX)活性升高17.38%,但多酚氧化酶(PPO)活性下降11.42%,总酚含量减少13.32%,导致FRAP、DPPH和ABTS<sup>+</sup>自由基清除能力降低9.58%~16.51%。通过相关性分析发现,抗氧化能力与C18:2/C18:3、PUFA等脂肪酸及Mn/Ba等微量元素呈显著负相关( $R \geq 0.7$ ,  $P < 0.05$ )。OPLS-DA分析筛选出C18:2、C18:3、PUFA及Mn等9个关键差异标志物(VIP > 1)。本研究明确了虫害胁迫下油茶籽品质劣变的关键生化特征,可为油茶籽油的安全生产和茶籽象的绿色防控提供参考。

**关键词:**茶籽象;油茶籽;抗氧化功能;相关性分析;差异标志物

DOI:10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.001278

中图分类号:TS222 文献标识码:A 文章编号:1003-0174(2026)01-0121-07

网络首发时间:2025-11-26 14:40:37

网络首发地址:<https://link.cnki.net/urlid/11.2864.TS.20251126.1332.004>

## Effects of *Curculio chinensis* infestation on the material composition and functional properties of *Camellia oleifera* seeds

Li Qingyang<sup>1,2</sup>, Cui Maokai<sup>1</sup>, Shen Danyu<sup>1</sup>, Ni Zhanglin<sup>1</sup>, Mo Runhong<sup>1</sup>, Zhang Wei<sup>1</sup>, Shu Jinping<sup>1</sup>, Liu Yihua<sup>1</sup>  
(Research Institute of Subtropical Forestry Chinese Academy of Forestry<sup>1</sup>, Hangzhou 311400)  
(Institute of Pesticide And Environmental Toxicology, College of Agriculture and Biotechnology<sup>2</sup>, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

**Abstract:** To investigate the effects of *Curculio chinensis* infestation on the material composition and functional properties of *Camellia oleifera* seeds, Changlin 4 *Camellia oleifera* was selected as the research object in this study, and the differences in material composition and antioxidant characteristics between insect-damaged and healthy seeds were compared. The results demonstrated that insect infestation significantly altered the fatty acid composition and mineral element content of *Camellia oleifera* seeds. Specifically, the content of monounsaturated fatty acid (C18:1) in insect-damaged seeds decreased by 3.96%, while the contents of polyunsaturated fatty acids (C18:2 and C18:3) increased by 28.85% and 25.93%, respectively; the contents of mineral elements such as Mg, P, Ti, Zn, and Mo were generally reduced by 10.41%–48.57%. The antioxidant system exhibited a specific response: lipoxygenase (LOX) activity increased by 17.38%, whereas polyphenol oxidase (PPO) activity decreased by

基金项目:浙江省科学技术厅“领雁”研发攻关计划项目(2023C02034)

收稿日期:2025-05-27

第一作者:李庆杨,男,1998年出生,博士,食用林产品品质与质量安全,1183956498@qq.com

通信作者:刘毅华,女,1981年出生,研究员,食用林产品品质与质量安全,liuyh@caf.ac.cn

11.42%, and the total phenol content was reduced by 13.32%, leading to a decrease of 9.58% – 16.51% in the free radical scavenging capacities (FRAP, DPPH, and ABTS<sup>+</sup>). Correlation analysis revealed that antioxidant capacity was significantly negatively correlated with fatty acids such as C18:2, C18:3 and PUFA), as well as trace elements such as Mn/Ba ( $R \geq 0.7$ ,  $P < 0.05$ ). OPLS-DA analysis screened out nine key differential biomarkers (VIP > 1), including C18:2, C18:3, PUFA, and Mn. This study clarified the key biochemical characteristics of quality deterioration of *Camellia oleifera* seeds under pest stress, which provides reference for the safe production of *Camellia oleifera* seed oil and the green prevention and control of *Curculio chinensis*.

**Key words:** *Curculio chinensis*; *Camellia oleifera* seeds; antioxidant capacity; correlation analysis; differential biomarkers

植食性昆虫胁迫是影响木本油料作物产量和品质的关键生物逆境因子,其通过诱导宿主产生复杂的代谢重编程作用,可显著改变种实发育过程中的物质积累模式<sup>[1,2]</sup>。近年来,关于虫害介导的油料种实营养品质变异现象已引发学界关注,其中脂肪酸代谢调控机制因其直接关联油脂产品的营养功能特性而成为研究热点<sup>[3,4]</sup>。不同物种、基因型及危害强度下,宿主对虫害的生理响应呈现显著异质性<sup>[2,3]</sup>。榛子受红尾碧蜡危害后单不饱和脂肪酸(MUFA)含量降低<sup>[1]</sup>,而橄榄遭受果蝇侵染时,其橄榄油的脂肪酸谱并无显著变化,甚至观察到轻度受害的橄榄油中 MUFA 含量高于健康果<sup>[3]</sup>。此外,研究发现茶翅蜡侵染显著提高了橄榄果实中的总酚类物质含量及其抗氧化活性<sup>[5]</sup>,这一结果与榛子受红尾碧蜡危害后的变化趋势一致<sup>[1]</sup>。这种代谢响应的物种特异性表明,深入解析特定油料作物-害虫互作体系对精准评估农产品质量安全具有重要科学价值。

油茶籽油是从油茶籽中提取的植物油脂,富含以油酸为主的不饱和脂肪酸。由于其脂肪酸组分和理化性质与橄榄油极为相似,因此被誉为“东方橄榄油”<sup>[4]</sup>。此外,油茶籽油中含有丰富的天然抗氧化活性物质,有益于清除自由基和抑制氧化产物的生成<sup>[6]</sup>。茶籽象(*Curculio Chinensis*)是对油茶危害最为严重的种实害虫之一。目前,关于茶籽象胁迫对油茶影响的研究,大多集中在油茶的产量和外观品质方面<sup>[7,8]</sup>。已有研究显示,茶籽象的侵害会导致油茶落果现象加剧,茶籽质量降低<sup>[7]</sup>。在茶籽象胁迫对油茶营养成分影响的研究中,也主要局限于一些理化指标,例如油茶籽油的酸值和过氧化值在茶籽象胁迫后会极显著( $P < 0.01$ )升高<sup>[7]</sup>。目前,关于茶籽象胁迫对油茶籽中脂肪酸等重要基础组分的影响鲜见报道,对于茶籽象胁迫后油茶籽功能活性成分的变化情况更是缺乏研究。

本研究以长林 4 号油茶品种为研究对象,对正

常籽和虫害籽中的脂肪酸、矿质元素以及抗氧化相关指标(总酚、酶和体外抗氧化能力)进行测定与比较,分析茶籽象胁迫对油茶籽重要基础组成和抗氧化性能的影响,以期对油茶籽油的安全生产、品质调控以及茶籽象的绿色防控提供参考。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 实验样品采集

本研究供试材料采自浙江省丽水市青田县油茶实验基地,品种为长林 4 号。每个采样点随机采集约 2 kg 具有相同开裂程度的油茶果实,以确保样品成熟度一致。通过肉眼观察果实外壳和种壳表面昆虫蛀孔的有无,将油茶籽划分为正常籽(Normal seed, N)和虫害籽(Infested seed, I)2 类。油茶籽经人工破壳后,置于 60 °C 恒温干燥箱中干燥至水质量分数低于 6%,随后使用粉碎机研磨成粉末(过 60 目筛)。采用索氏提取法,以石油醚(沸程 60 ~ 90 °C)为溶剂提取茶油。所得茶油样品储存于琥珀色玻璃瓶中,于 -20 °C 低温保存备用,直至后续分析。

### 1.2 实验仪器与设备

7890A 气相色谱仪配火焰离子化检测器、ICP-OES 电感耦合等离子体发射光谱仪、ICP-MS 电感耦合等离子体质谱仪、Flexa-200 酶联免疫分析仪。

### 1.3 脂肪酸分析

脂肪酸组分采用气相色谱法测定<sup>[9]</sup>。

### 1.4 矿质元素分析

矿质元素采用 ICP-OES 和 ICP-MS 测定<sup>[9]</sup>。

### 1.5 氧化酶分析

过氧化物酶(POD)、多酚氧化酶(PPO)、脂氧合酶(LOX)和苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性测定均参照检测试剂盒进行。

### 1.6 总酚分析(TPC)

TPC 测定参照 Li 等<sup>[10]</sup>的方法测定,采用福林-

酚比色法进行测定。

### 1.7 总抗氧化能力测定

铁离子还原能力(FRAP)、DPPH 自由基清除率和 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率参照 Li 等<sup>[10]</sup>方法进行测定。

### 1.8 数据处理

采用 SPSS 23.0 进行单因素方差分析和皮尔逊相关性分析;采用正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)对健康组和虫害组油茶籽的物质组成进行建模分析,基于变量投影重要性(VIP) > 1 筛选关键差异标志物。采用 origin 2018 软件制图,实现数据可视化。每个数据均为 3 次生物学重复。

## 2 结果与分析

### 2.1 茶籽象胁迫对油茶籽脂肪酸的影响

由表 1 可见,虫害胁迫显著改变了油茶籽脂肪酸组成。饱和脂肪酸中,I 组 C16:0 含量较 N 组升高 2.62% ( $P < 0.05$ ),而 C18:0 含量仅为 N 组的 85.35% ( $P < 0.05$ ),但总饱和脂肪酸(SFA)含量无显著差异。不饱和脂肪酸方面,I 组 C18:2、C18:3 和 C20:1 含量较 N 组分别升高 8.16% ~ 28.85% ( $P < 0.05$ ),其中多不饱和脂肪酸(PUFA)总量显著增加 28.83% ( $P < 0.05$ )。与之相反,MUFA 含量下降 4.06% ( $P < 0.05$ ),主要源于 C18:1 含量的显著降低 3.96% ( $P < 0.05$ )。

表 1 茶籽象胁迫对油茶籽脂肪酸的影响

脂肪酸组成	相对质量分数/%		I 组/N 组	变化趋势
	N 组	I 组		
C16:0	9.15 ± 0.00b	9.39 ± 0.01a	1.03	↑
C16:1	0.08 ± 0.00a	0.10 ± 0.03a	1.25	↑
C18:2	10.19 ± 0.01b	13.13 ± 0.02a	1.29	↑
C18:3	0.54 ± 0.00b	0.68 ± 0.00a	1.26	↑
C20:1	0.49 ± 0.00b	0.53 ± 0.00a	1.08	↑
C18:0	1.57 ± 0.00a	1.34 ± 0.00b	0.85	↓
C18:1	77.99 ± 0.01a	74.82 ± 0.05b	0.96	↓
SFA	10.72 ± 0.00a	10.73 ± 0.01a	1.00	↑
PUFA	10.72 ± 0.01b	13.81 ± 0.02a	1.29	↑
MUFA	78.56 ± 0.01a	75.45 ± 0.02b	0.96	↓
UFA	89.28 ± 0.00a	89.27 ± 0.01a	1.00	↓

注:N 代表正常籽,I 代表虫害籽。同一行中不同字母表示显著性显著( $P < 0.05$ )。下同。

### 2.2 茶籽象胁迫对油茶籽矿质元素含量的影响

由表 2 可见,油茶籽矿质元素呈现典型分级分布特征。常量元素(K > P > Mg > Ca)占主导地位,微量元素中 Mn (250.84 mg/kg) 为最高含量元素。虫害胁迫导致矿质元素代谢紊乱:常量元素中 Mg 和 P 含量分别下降 23.48% 和 13.37% ( $P < 0.05$ ),而 K

和 Ca 虽无显著差异( $P > 0.05$ ),但 N 组含量仍高于 I 组。微量元素呈现特异性响应模式:Mn、Ba 和 Cu 含量显著升高(分别为 N 组的 1.43、1.22 和 1.19 倍, $P < 0.05$ ),Ti、Zn 和 Mo 含量显著降低( $P < 0.05$ ),其中 Mo 含量下降幅度最大(N 组为 I 组的 2 倍)。

表 2 茶籽象胁迫对油茶籽矿质元素含量的影响

矿质元素/ mg/kg	N 组	I 组	I 组/ N 组	变化 趋势
常量元素 K	19 687.52 ± 856.02a	19 547.79 ± 505.54a	0.99	↓
Ca	1 783.66 ± 90.41a	1 758.37 ± 160.86a	0.99	↓
P	3 104.26 ± 152.81a	2 689.32 ± 46.49b	0.87	↓
Mg	2 360.26 ± 123.02a	1 806.00 ± 53.17b	0.77	↓
微量元素 Mn	206.24 ± 16.73b	295.43 ± 31.03a	1.43	↑
Ba	33.7 ± 1.95b	41.02 ± 2.01a	1.22	↑
Cu	8.35 ± 0.31b	9.90 ± 0.75a	1.19	↑
Co	0.02 ± 0.00a	0.02 ± 0.00a	1.00	↑
V	0.02 ± 0.00a	0.02 ± 0.00a	1.00	↑
Ni	2.84 ± 0.08a	2.80 ± 0.07a	0.99	↓
Ti	10.27 ± 0.57a	9.20 ± 0.16b	0.90	↓
B	0.12 ± 0.02a	0.10 ± 0.00a	0.83	↓
Fe	12.05 ± 3.10a	8.96 ± 0.67a	0.74	↓
Zn	15.68 ± 1.24a	10.00 ± 0.54b	0.64	↓
Mo	0.35 ± 0.03a	0.18 ± 0.01b	0.51	↓

### 2.3 茶籽象胁迫对油茶籽防御酶活性的影响

PPO、PAL、LOX 和 POD 是植物抗氧化系统中的关键酶,其活性水平能反映植物受外界逆境胁迫的响应程度。由表 3 可见,I 组 POD 和 LOX 活性均呈现上升趋势,分别是 N 组的 1.19 倍和 1.17 倍,其中 LOX 活性差异达到显著水平( $P < 0.05$ ),表明虫害诱导了氧化应激相关酶的激活。相反,I 组 PPO 活性显著下降( $P < 0.05$ ),仅为 N 组的 88.58%,而 PAL 活性虽下降 1.05%,但未达显著水平( $P > 0.05$ )。

表 3 茶籽象胁迫对油茶籽抗氧化防御系统的影响

抗氧化酶/ U/g	N 组	I 组	I 组/N 组	变化趋势
POD	2.04 ± 0.21a	2.43 ± 0.28a	1.19	↑
LOX	26.81 ± 0.21b	31.47 ± 2.04a	1.17	↑
PAL	2.29 ± 0.01a	2.27 ± 0.07a	0.99	↓
PPO	15.20 ± 0.28a	13.47 ± 0.42b	0.89	↓

### 2.4 茶籽象胁迫对油茶籽总酚和抗氧化能力的影响

总酚类物质含量(TPC)及抗氧化能力是评价油茶籽功能特性的重要指标。由图 1 可见,虫害胁迫导致 I 组 TPC 含量为 3.97 mg/g,较 N 组显著降低 13.32% ( $P < 0.05$ );DPPH·、ABTS· 和 FRAP 法是评估抗氧化能力的常用指标。3 种指标所表征的样品抗氧化能力变化基本一致,均表现出 N 组抗氧

化能力最强,I组抗氧化能力最弱。其中,I组 DPPH 和 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除能力(IC<sub>50</sub>分别为 10.87 μg/mL 和 7.09 μg/mL)较 N 组(IC<sub>50</sub>分别为 9.33 μg/mL 和 6.47 μg/mL)分别降低 16.51% 和 9.58%。此外,I组 FRAP 值显著低于 N 组( $P < 0.05$ ),降幅为 14.34%。

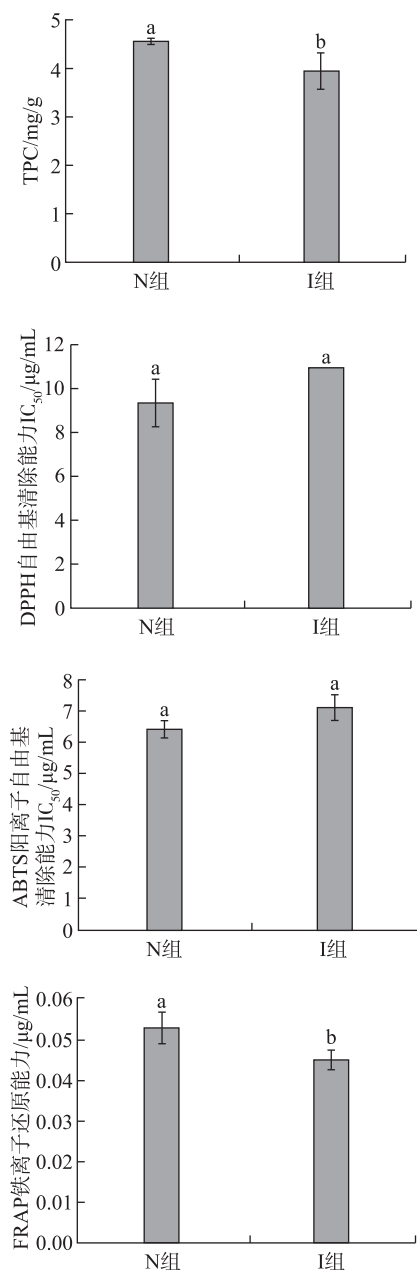


图1 茶籽象胁迫对油茶籽总酚和抗氧化能力的影响

### 3 讨论

植食性昆虫等诱发的生物胁迫对植物生长发育造成威胁,可导致全球近 30% 作物产量损失<sup>[11]</sup>。油茶籽作为 MUFA 和 PUFA 的重要来源<sup>[12]</sup>,其脂肪酸

组成变化直接影响油脂品质与营养价值<sup>[6]</sup>。本研究发现虫害诱发脂肪酸呈现特异性变化:MUFA 减少伴随 PUFA 代偿性增加,其中 PUFA 中的 C18:2、C18:3 在虫害籽中分别提高了 28.85% 和 25.93%。这一变化模式与红尾碧蚜危害榛子的研究结果一致<sup>[13]</sup>。这种脂肪酸重分配模式可能与虫害诱导的氧化应激响应相关。值得注意的是,PUFA 含量显著增加 28.82%,虽提升了油品不饱和度,但油脂氧化稳定性下降。这种质量-稳定性权衡关系表明,虫害胁迫下油茶籽面临营养品质提升与储藏安全降低的双重挑战。

矿质元素在植物的生长发育以及代谢过程中发挥着关键的调控作用。目前关于生物/非生物胁迫对植物矿质元素影响的研究结论尚不统一,但多数研究认为,胁迫条件下作物对大多数矿质元素的吸收和利用呈下降趋势,仅少数元素有所增加<sup>[14, 15]</sup>。本研究发现矿质元素代谢紊乱是虫害胁迫的另一重要特征。虫害籽 Mn、Ba 和 Cu 含量显著( $P < 0.05$ )增加(分别是正常籽的 1.43、1.22 和 1.19 倍),而 Mg、P、Ti、Zn 和 Mo 含量均显著( $P < 0.05$ )降低,其中 Mo 元素的降幅最大(2 倍)。而水稻经米象侵染也会导致稻米中的 P、Mg、K、Na 等元素异常积累<sup>[16]</sup>,表明不同虫害可能通过差异化机制干扰矿质元素平衡。Mn 和 Mo 作为抗氧化相关金属元素,其含量变化可能与虫害诱导的氧化应激反应存在协同调控关系。

脂肪酸与矿质元素的变化与虫害诱导氧化应激的关系也能从受试的抗氧化相关酶活的变化中得到印证。抗氧化酶在植物体内活性氧(ROS)清除过程起重要作用,是植物抵御生物和非生物胁迫的重要防御机制<sup>[17, 18]</sup>。在植物遭受昆虫侵染时,其体内会迅速激活包括 SOD、POD、PAL、PPO 等在内的抗氧化防御网络。SOD 作为第一道防线,通过催化超氧阴离子( $O_2^-$ )转化为  $H_2O_2$  和  $O_2$ <sup>[19]</sup>,可直接缓解虫害引发的氧化应激。POD 是木质素合成的关键酶,能催化单体木质素聚合成木质素,有助于巩固细胞结构<sup>[20]</sup>。PAL 作为苯丙烷代谢的限速酶,通过催化苯丙氨酸生成肉桂酸,促进植保素和水杨酸合成,从而增强宿主对病原入侵的系统性抵抗<sup>[21]</sup>。PPO 则通过氧化酚类物质生成醌类抗菌化合物,直接抑制病原菌生长<sup>[22]</sup>。本研究中防御酶活性呈现特异性响应模式:POD/LOX 的协同激活可能促进次生代谢产物的积累,而 PPO 活性降低则削弱了多酚类物质的抗氧化防御能力。这种酶活性的双向调节揭示了虫害胁迫

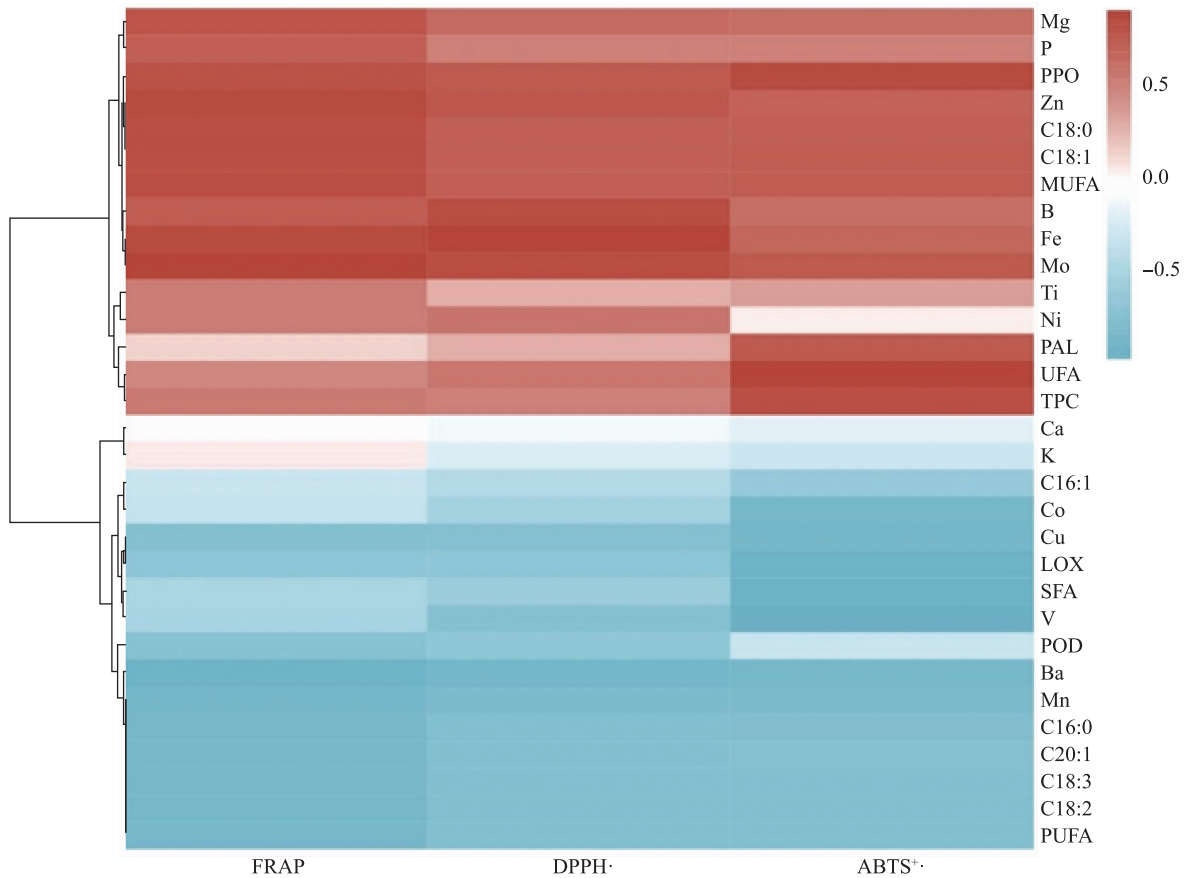


图 2 茶籽象胁迫下油茶籽抗氧化能力与脂肪酸、矿质元素及酶活性间的相关性分析

迫下油茶籽防御系统的动态失衡。POD 和 LOX 活性均呈现上升趋势, PPO 和 PAL 活性则呈现抑制状态, 这种现象与高温胁迫下油茶苗的 SOD、POD 和 CAT 活性协同上升<sup>[23]</sup>, 以及滇黄精受病毒侵染后 SOD、POD、PPO 和 PAL 活性显著波动<sup>[24]</sup>具有一致性, 表明不同胁迫类型可能共享部分抗氧化调控通路。

抗氧化能力是评估油茶籽功能品质的关键指标, 与酚类物质的含量及组成密切相关。本研究发现虫害胁迫导致总酚含量 (TPC) 显著下降 13.32% ( $P < 0.05$ ), 同时 DPPH·、ABTS<sup>+</sup>· 的清除力和 FRAP 的活性均同步降低。类似结果在橄榄受果蝇危害也有报道<sup>[3]</sup>, 表明酚类代谢紊乱可能是虫害胁迫下抗氧化能力受损的共性机制。通过皮尔逊相关性分析发现, 油茶籽抗氧化能力与化学成分存在显著交互作用(图 2)。具体而言, DPPH·、ABTS<sup>+</sup>· 的清除力和 FRAP 值与 C18:0、C18:1、MUFA、Zn、Fe、Mo、PPO 等指标呈显著正相关( $P < 0.05$ ), 相关性系数在 0.691 ~ 0.922 之间, 而与 C16:0、C18:2、C18:3、C20:1、PUFA、Ba 和 Mn 等指标呈显著负相关( $R \geq$

0.7,  $P < 0.05$ )。这种协同/拮抗作用揭示了脂肪酸组成变化与矿质元素动态平衡对抗氧化能力的复合调控机制, 其中 Mo 元素与 FRAP 值的强正相关性 ( $R = 0.922, P < 0.01$ ) 尤为值得关注。

OPLS-DA 模型验证了虫害胁迫下油茶籽物质组成的系统性变化(图 3)。N 组和 I 组被明显分为 2 组, 且组间样品无重叠现象, 表明模型具有较高的解释力与预测能力, 进一步验证了实验结果的可靠性。通过变量重要性投影 (VIP) 分析, 共筛选出 18 个 VIP 值 > 1 的差异性标志物(图 4), 结合 I/N > 1 的筛选

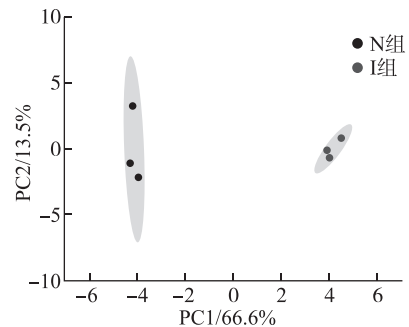


图 3 OPLS-DA 分析

标准,最终确定9个关键指标,包括5种脂肪酸(C16:0、C18:2、C18:3、C20:1、PUFA),3种矿质元素(Mn、Ba、Cu)和1种酶活性指标(LOX)。值得注意的是,C18:2、C18:3和PUFA的VIP值>1.22,且L/N>1.26,表明多不饱和脂肪酸代谢网络对虫害胁迫响应尤为敏感。

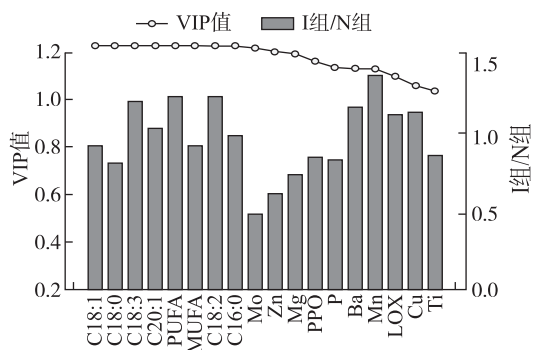


图4 VIP值和L/N图

#### 4 结论

本研究探究了茶籽象胁迫对油茶籽物质组成的影响,结果表明,虫害胁迫会导致单不饱和脂肪酸(C18:1)含量下降,而多不饱和脂肪酸含量显著增加,呈现脂肪酸重分配特征;Mg、P、Ti、Zn、Mo等关键矿质元素含量整体降低,其中Mo元素降幅最大。抗氧化系统呈现动态失衡:LOX活性升高,而PPO活性下降,伴随总酚含量(TPC)降低及DPPH、ABTS<sup>+</sup>、FRAP自由基清除能力下降。通过OPLS-DA模型筛选出9个虫害响应标志物,其中多不饱和脂肪酸代谢网络对虫害胁迫尤为敏感(VIP>1.22)。因此,虫害胁迫导致的油茶籽生化指标变化不仅影响其功能品质,更可能导致油脂氧化稳定性下降,进而增加储存风险。

#### 参考文献

- [1] Turan A. Effect of the damages caused by the green shield bug (*Palomena prasina* L.) on the qualitative traits of hazelnuts[J]. *Grasas y Aceites*, 2021, 72(1): e391
- [2] Valencić V, Butinar B, Podgornik M, et al. The effect of olive fruit fly *Bactrocera oleae* (Rossi) infestation on certain chemical parameters of produced olive oils[J]. *Molecules*, 2021, 26(1):95
- [3] Medjkouh L, Tamendjari A, Keciri S, et al. The effect of the olive fruit fly (*Bactrocera oleae*) on quality parameters, and antioxidant and antibacterial activities of olive oil[J]. *Food & Function*, 2016, 7(6):2780-2788
- [4] 李庆杨, 沈丹玉, 莫润宏, 等. 基于脂质组学的油茶籽油脂轮廓与功能特性分析[J]. *中国粮油学报*, 2023, 38(7):133-139  
Li Q, Shen D, Mo R, et al. Lipid profile and functional analysis of *Camellia* oil based on lipidomics[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2023, 38(7):133-139
- [5] Ivancic T, Grohar M C, Jakopic J, et al. Effect of brown marmorated stink bug (*Halyomorpha halys* Stål.) infestation on the phenolic response and quality of olive fruits (*Olea europaea* Stål.)[J]. *Agronomy*, 2022, 12(9):2200
- [6] 杨海余, 龚文芳, 崔坤鹏, 等. 油茶籽油品质性状研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2024, 39(8):210-223  
Yang H, Gong W, Cui K, et al. Progress of research on quality characteristics of *Camellia oleifera* seed oil[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2024, 39(8):210-223
- [7] 李苗苗. 茶籽象对油茶危害性研究及其风险评估[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016: 20-27
- [8] 舒金平, 滕莹, 刘剑, 等. 油茶采前落果原因初步分析[J]. *中国植保导刊*, 2013, 33(1):9-14  
Shu J, Teng Y, Liu J, et al. Preliminary analysis on the causes of pre-harvest fruit drop in *Camellia oleifera*[J]. *China Plant Protection*, 2013, 33(1):9-14
- [9] Li Q, Mo R, Wang R, et al. Characterization and assessment of chemical components in walnuts with various appearances[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2022, 107:104361
- [10] Li Q, Cui M, She J, et al. Preparation high quality *Camellia* oil by combining ultrasound pre-treatment and microwave as drying method: interactive effect on drying kinetics, metabolite profile and antioxidant ability[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2025, 117:107338
- [11] Delgado-Baquerizo M, Guerra C A, Cano-Díaz C, et al. The proportion of soil-borne pathogens increases with warming at the global scale[J]. *Nature Climate Change*, 2020, 10(6):550-554
- [12] 沈丹玉, 任传义, 袁新跃, 等. 茶树籽和油茶籽中脂溶性化学成分的比较研究[J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(11):43-48  
Shen D, Ren C, Yuan X, et al. Comparative study on lipophilic components in tea seed and *Camellia*[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2016, 31(11):43-48
- [13] Ozdemir I O, Karakaya O, Ates U, et al. Characterization of hazelnut kernel responses to brown marmorated stink bug [*Halyomorpha halys* Stal (Hemiptera: Pentatomidae)] infestations: changes in bioactive compounds and fatty acid

- composition[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2023, 124:105696
- [14] Zhang Y, Wang Y, Ding Z, et al. Zinc stress affects ionome and metabolome in tea plants[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2017, 111:318–328
- [15] Luy X, Kong H, Luo Y, et al. The impact of magnesium on the growth, physiology and quality of tea (*Camellia sinensis* L.) plants under acid stress[J]. *Agronomy*, 2024, 14(4):767
- [16] Houketchang Ndomou S C, Balti B T, Tambo S T, et al. Influence of weevil on the physicochemical characteristics, functional properties, and nutritional value of rice (*Oryza sativa* L.) produced at Yagoua (far – north Cameroon) [J]. *Heliyon*, 2024, 10(9): e30918
- [17] Abacigil T Ö, Kıralan M, Ramadan M F. Quality parameters of olive oils at different ripening periods as affected by olive fruit fly infestation and olive anthracnose [J]. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 2023, 34(2):595–603
- [18] Ren T, Zheng P, Zhang K, et al. Effects of GABA on the polyphenol accumulation and antioxidant activities in tea plants (*Camellia sinensis* L.) under heat – stress conditions [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 159:363–371
- [19] 侯丽媛, 陈禹怀, 王育川, 等. 干旱胁迫时间对藜麦苗期生理特性的影响及耐旱性评价[J]. *核农学报*, 2024, 38(11):2237–2246  
Hou L, Chen Y, Wang Y, et al. Influence of drought stress duration on quinoa physiological characteristics and drought tolerance evaluation at seedling stage[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2024, 38(11):2237–2246
- [20] 张书凝, 郑舒琪, 王新胜, 等. 柑橘果皮生理性病害与细胞壁代谢的关系研究进展[J]. *园艺学报*, 2025, 52(2):513–525
- Zhang S, Zheng S, Wang X, et al. Advances in the relationship between cell wall metabolism and physiological diseases of *Citrus* peel [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2025, 52(2):513–525
- [21] 叶小真, 杨婕, 冯丽贞, 等. 桉树 PAL 基因克隆及焦枯病菌诱导下的表达分析[J]. *林业科学研究*, 2019, 32(6):99–105  
Ye X, Yang J, Feng L, et al. Cloning of PAL gene from *Eucalyptus* and its expression under *Calonectria pseudoreteaudii* stress[J]. *Forest Research*, 2019, 32(6):99–105
- [22] 李凌峰, 常晓涵, 许汝冰, 等. 丁香酚诱导烟草抗青枯病的效果及促生作用[J]. *中国烟草科学*, 2025, 46(1):33–39  
Li L, Chang X, Xu R, et al. Induction of eugenol for tobacco resistance to bacterial wilt disease and its growth promotion effect[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2025, 46(1):33–39
- [23] 傅志强, 张恒, 刘祯, 等. 不同油茶品种苗对高温胁迫的生理响应及耐热性评价[J]. *林业科学研究*, 2024, 37(2):189–200  
Fu Z, Zhang H, Liu Z, et al. Evaluation of the physiological response and heat tolerance of seedlings of different *Camellia oleifera* cultivars to high temperature stress[J]. *Forest Research*, 2024, 37(2):189–200
- [24] 杨泽芬, 陈泽历, 袁宝怡, 等. 病毒病害对滇黄精生理生化特性、产量及品质的影响[J]. *西北植物学报*, 2024, 44(7):1028–1036  
Yang Z, Chen Z, Yuan B, et al. Effects of viral infection on physiological and biochemical characteristics and the yield and quality of *Polygonatum kingianum* [J]. *Acta Botanica Boreali – Occidentalia Sinica*, 2024, 44(7):1028–1036.