

冬瓜黑心病发生的生理机制初探

陈逸林¹, 黄荣贵¹, 周 斌², 刘子凡¹, 廖道龙³, 王 静³

(1. 海南大学热带农林学院 海南儋州 571737; 2. 中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所 海口 571101;
3. 海南省农业科学院蔬菜研究所 海口 571100)

摘 要: 解析冬瓜黑心病发生的生理机制, 为其防治提供理论依据。以健康植株(HP)、发病植株(DP)以及发病果实的发病果肉(DD)、发病果实的健康果肉(DH)、健康果实的健康果肉(HH)为材料, 分析测定了不同器官(根、茎、叶、果实)中钙、硼含量、3 类果肉不同形态钙与氮素含量、内源激素含量、抗氧化酶活性及丙二醛(MDA)含量。结果表明, DD 果肉中抗氧化酶(SOD、POD、CAT)活性及 MDA 含量显著高于 DH 和 HH 果肉; DP 果实钙含量显著低于 HP, 叶片钙含量显著高于 HP; HH 果肉活性钙和水溶性钙含量显著高于 DD 和 DH, DD 果肉氮钙比、1-氨基环丙烷-1-羧酸(ACC)含量显著高于 DH 和 HH; DH 果肉赤霉素(GA3)含量显著高于 DD 和 HH, HH 果肉的水杨酸(SA)含量显著高于 DD; 果肉总钙、水溶性钙和活性钙含量与 SOD、POD、CAT 活性及 MDA 含量呈显著或极显著负相关; 果实钙含量与果实、茎、根硼含量及植株总硼含量呈极显著负相关, ACC 含量与 SOD、POD、CAT 活性及 MDA 含量呈极显著正相关。综上, 冬瓜黑心病是一种因植株钙分配失衡导致果实钙素和水溶钙含量下降, 果肉细胞膜和细胞壁受到损伤而引起物质外渗的生理性病害。本研究结果为冬瓜生产中黑心病的科学防治奠定了基础。

关键词: 冬瓜; 黑心病; 钙失衡; 代谢失衡

中图分类号: S642.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2026)06-180-07

Preliminary study on the physiological mechanism of fruit blackheart disease in wax gourd

Chen Yilin¹, Huang Ronggui¹, Zhou Bin², Liu Zifan¹, Liao Daolong³, Wang Jing³

(1. School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Danzhou 571737, Hainan, China; 2. Tropical Crops Genetic Resources Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101, Hainan, China; 3. Institute of Vegetables, Hainan Academy of Agricultural Sciences, Haikou 571100, Hainan, China)

Abstract: To elucidate the physiological mechanisms underlying the occurrence of blackheart disease in wax gourd and provide a theoretical basis for its prevention and control. Healthy plants(HP), diseased plants(DP), diseased fruit pulp in diseased fruits(DD), healthy fruit pulp in diseased fruits(DH), and healthy fruit pulp in healthy fruits(HH) were used as material, the content of calcium and boron in different organs (roots, stems, leaves and fruits) of DP and HP, the content of calcium, nitrogen, endogenous hormones, malondialdehyde(MDA) and the activity of antioxidant enzyme of three types of pulp were analyzed. The results showed that The activity of antioxidant enzyme(SOD, POD, CAT) and the content of MDA in DD pulp were significantly higher than those in DH and HH pulp. The calcium content of fruits in DP is significantly lower than that in HP, while the calcium content in leaves is significantly higher than that in HP. The content of the active calcium and water-soluble calcium of HH pulp were significantly higher than those of DD and DH, and the nitrogen-calcium ratio and 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid(ACC) of DD pulp were significantly higher than those of DH and HH. The content of gibberellic acid(GA3) of DH pulp was significantly higher than that of DD and HH, and the content of salicylic acid(SA) of HH pulp was significantly higher than that of DD. The total calcium, water-soluble calcium and active calcium content in the fruit pulp showed significant or highly significant negative correlations with SOD, POD, and CAT activity, as well as MDA content. The content of calcium in fruits was extremely significantly negatively correlated with the content of boron in fruits, stems, roots and the content of total boron in plants; ACC content showed a

收稿日期: 2025-12-01; 修回日期: 2026-01-19

基金项目: 海南省自然科学基金(324QN342)

作者简介: 陈逸林, 男, 在读硕士研究生, 研究方向为热带作物高效栽培。E-mail: 1396889509@qq.com

通信作者: 刘子凡, 男, 教授, 研究方向为热带作物高效栽培。E-mail: jiangxilaobiao@163.com

廖道龙, 男, 研究员, 研究方向为瓜菜栽培与育种。E-mail: ldlshe@sina.com

highly significant positive correlation with SOD, POD, and CAT activities, as well as MDA content. In conclusion, black-heart disease in wax gourd is a physiological disease caused by the imbalance of calcium distribution in the plant, which leads to a decrease in the content of calcium and water-soluble calcium of fruit, damage to the cell membrane and cell wall of the pulp, and causes the exudation of substances. The findings of this study lay the groundwork for the scientific control of blackheart disease in wax gourd production.

Key words: Wax gourd; Black heart disease; Calcium imbalance; Metabolic disorder

冬瓜 [*Benincasa hispida* (Thunb) Cogn.] 是葫芦科冬瓜属的一年生蔓生草本植物, 是海南重要的冬季北运瓜菜种类。但是, 近几年海南冬瓜种植区均出现不同程度的“黑心冬瓜”, “黑心冬瓜”已经成为海南冬瓜的标签。冬瓜黑心病主要出现在果实膨大中后期, 具体表现为果实内部褐变, 一般先从果脐附近的果腔瓜瓢处开始发生, 然后向外往果肉处、向上往果蒂处逐渐蔓延^[1]。由于发病部位为果实内部, 从外观上无法辨别, 因此收购商不敢贸然采购, 种植户经济收入难以保证。

笔者项目组前期选取发病冬瓜果肉组织, 经消毒、无菌水冲洗后, 在培养基中培养一段时间后未检测到病原菌的存在, 故推测黑心病不是病理性病害, 极大概率为一种生理性病害。在生产中, 主要通过敲击果实来判别是否发病, 如声音较沉闷, 果实大概率发病; 如将发病冬瓜果实切开, 会发现果肉细胞充盈水分并伴有褐变, 推测发病果肉细胞失活, 细胞壁和细胞膜稳定性受损。

钙元素在维持细胞膜结构的完整性和细胞内膜系统的区域化中扮演着重要角色。钙离子与果胶形成果胶酸钙, 稳定细胞壁结构^[2]。其他矿质元素及内源激素水平会影响钙元素的吸收与分配。氮肥的过量施用, 影响钙离子的吸收和代谢; 硼元素的过量积累, 抑制钙元素的吸收^[3]; 脱落酸(ABA)能调节果实中钙的浓度^[4], 水杨酸(SA)通过增加胞间钙离子浓度来共同激活下游防御基因的表达, 从而触发植物的防御反应^[5]。乙烯可导致细胞壁结构的变化及成分分解, 使果实软化^[6], 1-氨基环丙烷-1-羧酸(ACC)是乙烯合成的天然前体^[7], 外源钙可以降低果实中 ACC 含量及其合成酶的活性^[8]。

研究表明, 冬瓜黑心病的发生与果实钙缺乏导致的代谢失衡相关^[9]。但发病与钙的具体形态关系还未明确, 且与其他矿质元素及内源激素的关系也未见报道。鉴于此, 笔者从比较不同发病程度冬瓜果肉细胞膜受损情况出发, 分析发病植株与健康植株不同器官钙和硼含量、不同类型果肉各类形态钙、氮、钾含量及内源激素含量的差异, 探索冬瓜黑

心病发生的生理机制, 以期为制定相应的预防措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与获取

试验在海南省文昌市文城镇和海南省琼海市博鳌镇冬瓜种植基地进行, 种植株行距为 80 cm×150 cm, 品种为黑金刚, 由海南省农业科学院蔬菜研究所育成。

2023 年 3 月, 在博鳌镇冬瓜采收期, 首先用敲击法随机初选发病果实, 同时选取大小、生长情况等基本一致的健康果实作为对照, 所选果实同时采集其植株, 发病果实、植株与对照的健康果实、植株分别采集 5 株(个), 其中 3 株(个)作为重复, 2 株(个)作为备用样品。运回实验室后, 果实去除上下两端不发病的部分后沿中线切开, 观察是否发病以剔除不合理样品, 最终获得发病植株与健康植株(分别用 DP 和 HP 表示), 植株样品按根、茎、叶器官分开, 叶片取成熟叶, 根系取主根, 洗净后剪成小段备用。

2024 年 3 月, 在海南省文昌市文城镇按 2023 年相同的方法在冬瓜田块选取发病果实和健康果实。将果实样品切开, 最终获得 3 类果肉, 分别为健康果实的健康果肉(HH)、发病果实的健康果肉(DH)、发病果实的发病果肉(DD), 切成小块备用。

1.2 测定指标与方法

根、茎、叶、果实经 80 °C 烘箱烘干至恒质量, 将其研磨成粉, 过 2 mm 筛网, 用于测定矿质元素和不同形态的钙含量; 果实经液氮猝灭后放置于 -80 °C 冰箱, 用于测定内源激素含量、抗氧化酶活性和丙二醛含量。

1.2.1 植株矿质元素含量的测定 采用凯氏定氮法测定氮含量, 采用火焰光度计法测定钾含量, 采用原子吸收法测定硼和钙含量^[10]。

1.2.2 果肉不同形态钙含量的测定 参考文献[11]的方法测定果实中不同形态的 Ca 含量。将 2 g 干粉样品加入 30 mL 蒸馏水中, 恒温摇动 1 h, 然后在 6000g、4 °C 下离心 10 min, 将上清液转移至 100 mL

容量瓶中,提取3次,最后用蒸馏水定容。对于果胶酸钙、磷酸钙以及草酸钙,用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaCl}$ 、 $2\%\text{ HOAC}$ 、 $0.6\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$ 逐级提取,提取之后的残渣为硅酸钙,采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4(5:1)$ 混合酸消煮。最后用相应提取液定容,同时加入释放剂 $1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化锶溶液排除干扰。采用原子吸收分光光度计测定浸提液和消煮液,测定波长为 422.7 nm 。果肉的总钙含量为所有形态钙含量的总和。

1.2.3 果肉植物激素含量的测定 将样品送至南京瑞源有限公司,采用高效液相色谱-质谱联用技术(HPLC-MS/MS)测定脱落酸(ABA)、水杨酸(SA)、1-氨基环丙烷-1-羧酸(ACC)、赤霉素(GA_3)含量^[12]。

1.2.4 果肉抗氧化酶活性及丙二醛含量的测定 按照Solarbio(中国)提供的试剂盒说明书,采用分光光度法测定丙二醛(MDA)含量^[13]及过氧化物酶(POD)^[14]、过氧化氢酶(CAT)^[15]和超氧化物歧化酶(SOD)活性^[13]。

1.3 数据分析

采用Excel对数据进行分析,采用DPS 9.05软件检验差异显著性,采用OriginPro 2025b作图。

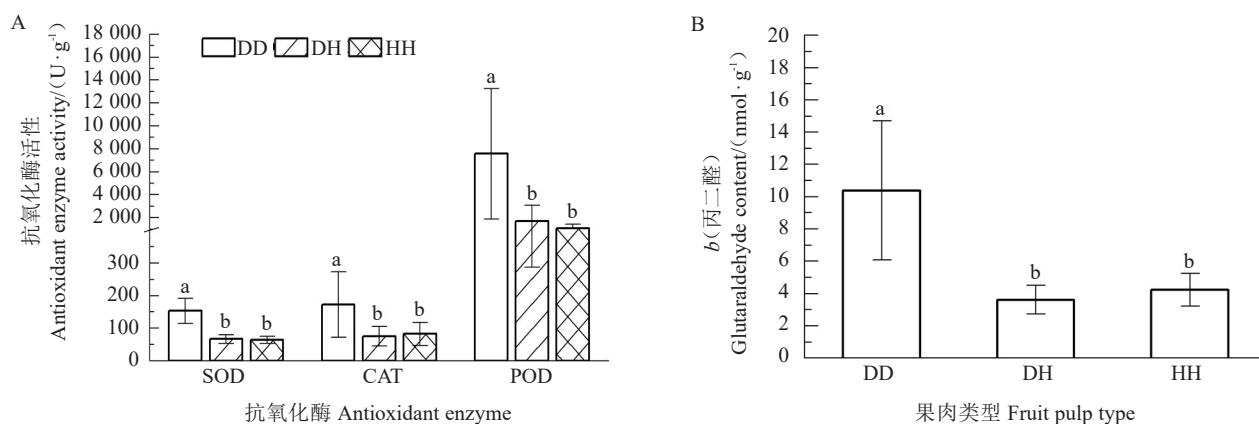
2 结果与分析

2.1 不同类型果肉细胞膜损伤的差异

由图1可知,SOD、CAT、POD活性和MDA含量均表现为DD果肉显著高于HH和DH果肉,其中,DD果肉中SOD、CAT、POD活性较HH果肉分别显著提高了138.50%、108.52%、603.74%,较DH果肉分别显著提高了128.77%、130.60%、351.32%,DD果肉中MDA含量较HH果肉显著提高了145.54%,较DH果肉显著提高了187.15%。但DH与HH果肉之间的SOD、CAT、POD活性及MDA含量均无显著差异。

2.2 不同类型植株间钙元素和硼元素含量差异

从图2可知,茎、叶片和植株总钙含量均呈现



注:不同小写字母表示样品间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference between samples ($P<0.05$). The same below.

图1 不同类型果肉抗氧化酶活性(A)与MDA含量(B)差异

Fig. 1 Difference in antioxidant enzyme activity(A) and malondialdehyde content(B) in fruit pulp

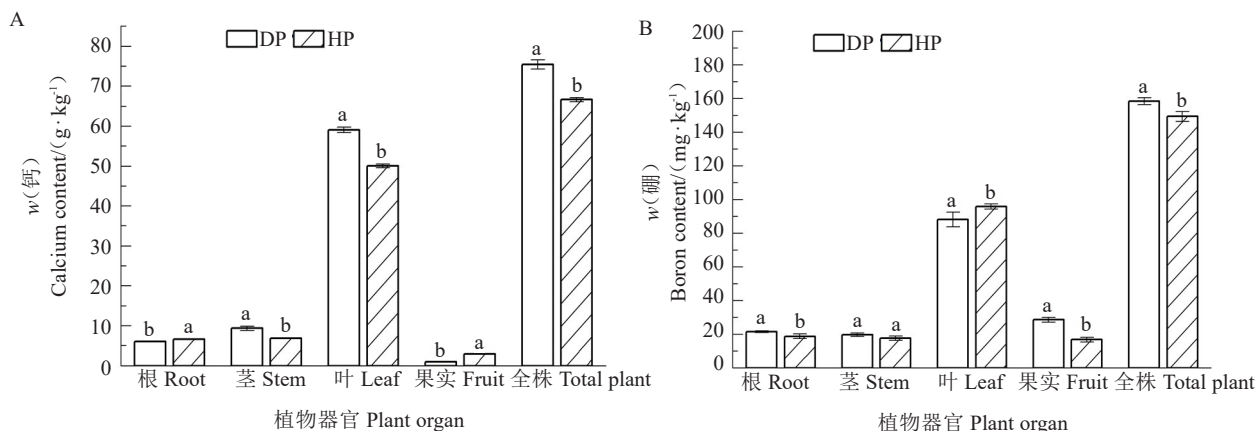


图2 冬瓜植株不同器官的钙(A)和硼含量(B)差异

Fig. 2 Difference of calcium (A) and boron(B) content across different organs of the plant

DP 植株显著高于 HP 植株;而根、果实的钙含量相反,表现为 DP 植株显著低于 HP 植株,其中,DP 植株的根、果实中的钙含量较 HP 植株分别显著下降了 9.46%、66.88%,茎、叶中的钙含量较 HP 植株分别显著升高了 35.96%、17.97%。此外,根、果实和植株总硼含量均呈现 DP 植株显著高于 HP 植株;植株的叶片硼含量相反,表现为 DP 植株显著低于 HP 植株;茎的硼含量在 DP 和 HP 植株间无显著差异,其中,DP 植株的根、果实中的硼含量较 HP 植株分别显著升高了 14.84%、69.93%,而叶片中的硼含量

则显著降低了 8.04%。

2.3 不同类型果肉不同形态钙含量差异

由表 1 可知,水溶性钙含量和活性钙总量均呈现 HH 果肉显著高于 DD 和 DH 果肉,DD 和 DH 果肉的水溶性钙含量较 HH 果肉分别显著下降了 60.07%、50.76%,DD 和 DH 果肉的活性钙含量较 HH 果肉分别显著下降了 65.53%、43.65%。而 DD 果肉与 DH 果肉之间无显著差异;果胶酸钙、磷酸钙、草酸钙含量和非活性钙总量在 DD、DH 和 HH 果肉间均无显著差异。

Table 1 Difference of calcium content of various forms in different types of fruit pulp (mg·kg ⁻¹)						
果肉类型 Fruit pulp type	w(活性钙)Active calcium content			w(非活性钙)Non-active calcium content		
	水溶性钙 Water-soluble calcium	果胶酸钙 Calcium pectate	总量 Total	磷酸钙 Calcium phosphate	草酸钙 Calcium oxalate	总量 Total
DD	136.23±33.96 b	179.88±35.50 a	316.12±49.47 b	200.23±50.39 a	155.44±75.08 a	355.68±99.97 a
DH	168.01±38.56 b	196.28±64.82 a	364.28±50.58 b	213.52±59.70 a	145.08±32.40 a	358.59±72.14 a
HH	341.10±85.99 a	182.13±39.05 a	523.28±121.93 a	175.54±36.39 a	125.98±13.13 a	301.52±38.35 a

注:同列不同小写字母表示样品间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different small letters in the same column indicate significant difference between samples($P<0.05$). The same below.

2.4 不同类型果肉氮、钾、钙含量分析

由表 2 可知,氮含量表现为 DH 果肉显著低于 DD 和 HH 果肉,DD 果肉与 HH 果肉之间无显著差异;DD、DH 和 HH 果肉的钾含量和钾/钙均无显著差异;钙含量表现为 HH 果肉显著高于 DD 果肉,

DD 果肉的钙含量较 HH 果肉显著下降了 27.48%,而 HH 与 DH 果肉、DD 与 DH 果肉之间均无显著差异;DD 果肉的氮/钙较 DH 和 HH 果肉分别显著提高了 38.02%、39.12%,而 DH 与 HH 果肉之间无显著差异。

Table 2 Nitrogen, potassium, and calcium content in different types of fruit pulp					
果肉类型 Fruit pulp type	w(氮) Nitrogen content/(g·kg ⁻¹)	w(钾) Potassium content/(g·kg ⁻¹)	w(钙) Calcium content/(g·kg ⁻¹)	氮/钙 N/Ca	钾/钙 K/Ca
DD	15.90±1.73 a	23.51±3.57 a	0.95±0.12 b	17.46±0.80 a	24.59±1.76 a
DH	12.91±1.76 b	26.53±0.91 a	1.07±0.24 ab	12.65±3.55 b	23.94±2.22 a
HH	16.02±0.64 a	25.20±3.15 a	1.31±0.22 a	12.55±2.49 b	20.83±4.38 a

2.5 不同类型果肉间植物激素含量差异

由图 3 可知,DD 果肉的 ACC 含量显著较 DH 和 HH 果肉分别显著提高了 42.64%、48.20%,而 DH 与 HH 果肉之间无显著差异;DD、DH 和 HH 三类果肉之间的 ABA 含量均无显著差异;DD 果肉的 SA 含量较 HH 果肉显著下降了 23.91%,而 DD 与 DH 无显著差异;HH 果肉的 GA₃ 含量显著低于 DD 和 DH 果肉,DD 果肉的 GA₃ 含量显著低于 DH 果肉,DD 果肉的 GA₃ 含量较 HH 果肉显著提高了 211.51%,较 DH 果肉显著下降了 42.02%。

2.6 植株中钙含量和硼含量相关性分析

由图 4 可知,果实钙含量与根、茎、叶钙含量及

植株总钙含量和果实、茎、根硼含量及植株总硼含量均呈极显著负相关,与叶硼含量呈极显著正相关;果实硼含量与叶硼含量呈极显著负相关。

2.7 果肉中各指标相关性分析

选择不同类型果实存在差异的指标进行相关性分析,由图 5 可知,果肉总钙含量、水溶性钙含量和活性钙含量均与 ACC 含量、MDA 含量及 SOD、CAT、POD 活性呈显著或极显著负相关,与氮含量均呈极显著正相关;MDA 含量与 SOD、CAT、POD 活性呈极显著正相关;SOD、CAT 和 POD 活性之间呈极显著正相关;活性钙含量与水溶性钙含量呈极显著正相关;ACC 含量与 MDA 含量及 SOD、CAT、

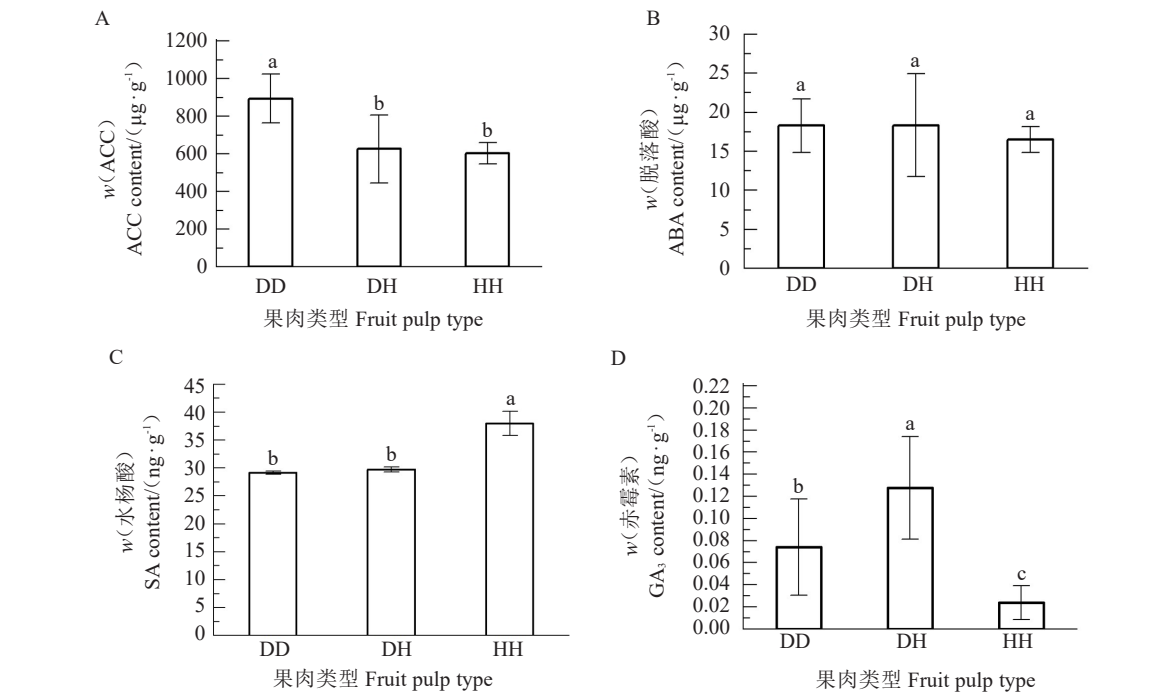
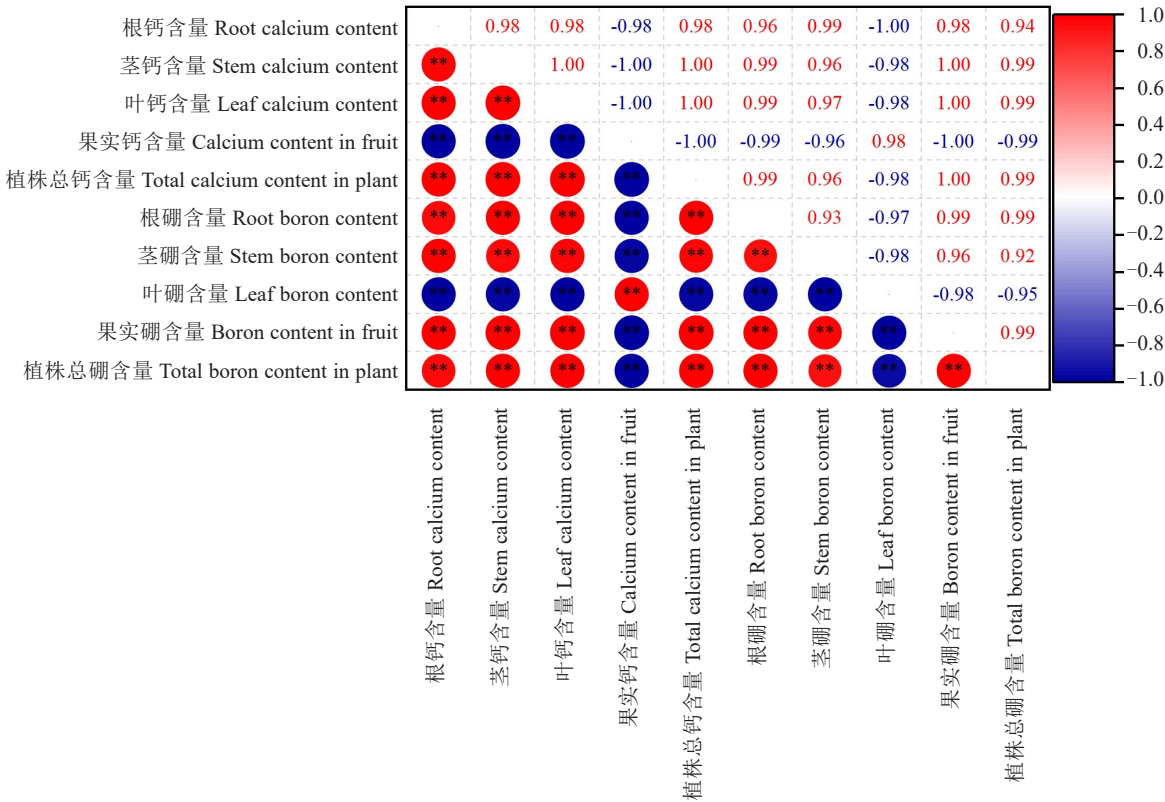


图3 果肉 ACC、ABA、SA、 GA_3 含量差异
Fig. 3 Difference of ACC, ABA, SA, and GA_3 content in fruit pulp



注:*表示在 0.05 水平显著相关;**表示在 0.01 水平极显著相关。下同。
Note: * represents significant correlation at 0.05 level; ** represents extremely significant correlation at 0.01 level. The same below.

图4 冬瓜植株钙和硼含量相关性分析
Fig. 4 Correlation analysis of calcium and boron content in plants

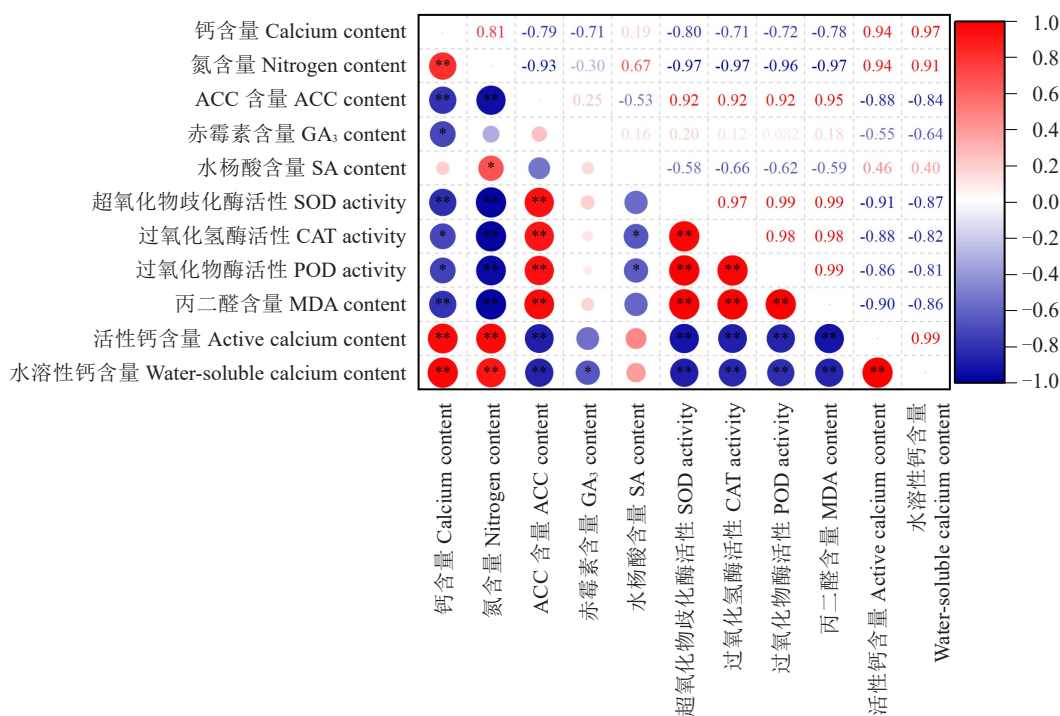


图5 果肉中各指标相关性分析热图

Fig. 5 Heatmap of correlation analysis for various indicators

POD 活性呈极显著正相关;SA 含量与 CAT 活性、POD 活性呈显著负相关;果肉氮含量与 MDA 含量、ACC 含量及 SOD、CAT、POD 活性呈极显著负相关,与 SA 含量呈显著正相关。

3 讨论与结论

植物遭遇逆境伤害胁迫时,细胞内会积累超氧阴离子自由基等活性氧物质,破坏膜质中蛋白质结构和膜系统的稳定性,引起植物生理代谢系统紊乱。植物通过抗氧化酶代谢系统,消除过多的活性氧物质,减轻细胞膜系统的伤害^[16]。本研究发现,DD 果肉的 SOD、POD、CAT 活性较 DH 和 HH 果肉均显著提高,MDA 含量也显著增加,MDA 含量与 SOD、POD 和 CAT 活性均呈极显著正相关,说明发病果肉的细胞膜结构受到一定程度的损伤。

钙素水平与果实细胞壁与膜结构的完整性密切相关。钙素不足会导致细胞壁形成受阻或不能与果胶酸结合成果胶酸钙,过多的果胶酸会对细胞壁破坏和分解,造成果实细胞膜通透性增大,导致细胞内物质外渗到细胞间隙^[17-18]。前人研究发现,钙形态会影响果实褐变的进程^[19];活性钙含量下降会减弱果肉中原生质黏滞性和细胞壁刚性^[20];菠萝黑心病的严重程度和果实水溶性钙含量呈负相关^[21]。本研究发现,DP 植株果实钙含量显著低于 HP 植株,HH 果肉水溶性钙含量和活性钙总量均显

著高于 DH 和 DD 果肉,说明冬瓜黑心病的发生与果实钙含量,特别是与活性钙中的水溶性钙含量密切相关。Ca²⁺能降低细胞内活性氧 ROS 水平,避免 ROS 的过量积累对植物造成的氧化伤害^[22]。本研究发现,果肉总钙含量、水溶性钙含量和活性钙含量均与 SOD、POD、MDA 活性呈显著或极显著负相关,表明钙在一定程度上能抑制活性氧积累,维持膜结构,减轻或控制冬瓜黑心病的发生。

植株对钙的吸收和分配与蒸腾作用强弱有关。施氮量过高时,植株营养生长过旺,叶片及新生枝条蒸腾作用增强,大量钙进入叶片,导致进入果实中的钙含量降低^[23]。本研究发现,果实钙含量与茎、叶钙含量及植株总钙含量呈极显著负相关,说明果实缺钙并不是由植株缺钙引起的,而是与钙的分配有关。在本研究中,果实钙含量与果实、茎、根硼含量及植株总硼含量呈极显著负相关,这主要是由于硼、钙元素间存在拮抗作用^[24],继而引起果实生理性缺钙;本研究中发病植株叶片硼含量显著低于正常植株,由于硼能够引导糖优先分配到最重要的部位^[25],即发病植株会阻碍叶片光合产物向果实输送,从而引起果实发病;虽然硼在植物生长过程中能够维持细胞壁结构的完整性和稳定性,但过量的硼会导致细胞膜透性与游离脯氨酸含量上升^[26]。细胞结构稳定性还受其他矿质元素的影响。氮缺乏会导致细胞膜结构不完整,细胞分裂受阻;钾能

促进细胞壁的加厚,增强细胞结构的稳定性。果实氮含量高、高氮/钙会加剧苹果果实水心病的发生^[27-28]。本研究发现,黑心病的发生与果肉中氮含量、钾含量的关系并不密切,但与果肉中 N/Ca 相关,N/Ca 越高,发病概率越大。

研究表明,ACC 在轻度水心病菠萝中含量下降,中度水心病菠萝中含量升高^[29];内源 GA3 含量与菠萝黑心病的发生呈正相关^[30]。本研究发现,DD 果肉中 ACC 含量显著高于 DH 和 HH 果肉,SA 含量显著低于 HH;ACC 含量与 SOD、POD 活性及 MDA 含量呈极显著正相关。SA 可以通过激活抗氧化系统来保护植物^[31],发病果肉的 SA 含量较低,导致防御能力偏弱。

综上所述,冬瓜黑心病是一种因植株钙分配失衡导致果实钙素和果实水溶钙含量下降,果肉细胞膜和细胞壁受到损伤而引起物质外渗的生理性病害;较高的果实硼素含量、果肉 N/Ca 比、ACC 含量和较低的 SA 含量加剧冬瓜黑心病的发生。本研究结果为冬瓜生产中黑心病的科学防治提供了新的思路。

参考文献

- [1] 廖道龙,陈贻诵,尤志聪,等.一种冬瓜黑心病的防治方法:CN202311149625.X[P].2023-10-13.
- [2] 周卫,汪洪.植物钙吸收、转运及代谢的生理和分子机制[J].植物学通报,2007,24(6):762-778.
- [3] 马明,尹晓宁,刘小勇,等.硼与苹果水心病关系的研究[J].中国果树,2009(3):24-27.
- [4] Rai G K, Khanday D M, Choudhary S M, et al. Unlocking nature's stress buster: Absciscic acid's crucial role in defending plants against abiotic stress[J]. Plant Stress, 2024, 11: 100359.
- [5] Saleem M, Fariduddin Q, Castroverde C D M. Salicylic acid: A key regulator of redox signalling and plant immunity[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 168: 381-397.
- [6] Fan J, Xu M Y, He Z, et al. Ethylene promotes fruit softening of 'Nanguo' pear via cell wall degradation[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2024, 43: 4770-4781.
- [7] Adams D O, Yang S F. Ethylene biosynthesis: Identification of 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid as an intermediate in the conversion of methionine to ethylene[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1979, 76(1): 170-174.
- [8] 李天来,吕双双,许传强,等.钙在乙烯促进网纹甜瓜果实软化过程中的作用[J].园艺学报,2009,36(6):821-828.
- [9] Chang J J, Liao D L, Li J L, et al. Calcium deficiency leads to fruit blackheart formation by disrupting glycometabolism and phenylpropanoid metabolism in wax gourd[J]. Postharvest Biology and Technology, 2024, 211: 112851.
- [10] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [11] Hou J Y, Riaz M, Yan L, et al. Effect of exogenous L-aspartate nano-calcium on root growth, calcium forms and cell wall metabolism of *Brassica napus* L.[J]. Nanoimpact, 2022, 27: 100415.
- [12] Tansupo P, Suwannasom P, Luthria D L, et al. Optimized separation procedures for the simultaneous assay of three plant hormones in liquid biofertilizers[J]. Phytochemical Analysis, 2010, 21(2): 157-162.
- [13] Minami M, Yoshikawa H. A simplified assay method of superoxide dismutase activity for clinical use[J]. Clinica Chimica Acta, 1979, 92(3): 337-342.
- [14] Doerge D R, Divi R L, Churchwell M I. Identification of the colored guaiacol oxidation product produced by peroxidases[J]. Analytical Biochemistry, 1997, 250(1): 10-17.
- [15] Johansson L H, Borg L A H. A spectrophotometric method for determination of catalase activity in small tissue samples[J]. Analytical Biochemistry, 1988, 174(1): 331-336.
- [16] Rajput V D, Harish, Singh R K, et al. Recent developments in enzymatic antioxidant defence mechanism in plants with special reference to abiotic stress[J]. Biology, 2021, 10(4): 267.
- [17] Herremans E, Melado-herreros A, Defraeye T, et al. Comparison of X-ray CT and MRI of watercore disorder of different apple cultivars[J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 87: 42-50.
- [18] 陈德伟,汤寓涵,石文波,等.钙调控植物生长发育的进展分析[J].分子植物育种,2019,17(11):3593-3601.
- [19] 李磊,涂郑禹,宋翔,等.不同处理对采后“南果梨”贮藏期间果皮钙形态及褐变的影响[J].北方园艺,2016(4):128-132.
- [20] 陈晶英.橄榄果实发育过程中钙信使系统及营养元素的变化分析[D].福州:福建农林大学,2020.
- [21] Hewajulige I G N, Wijeratnam R W, Wijesundera R L C, et al. Fruit calcium concentration and chilling injury during low temperature storage of pineapple[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2003, 83(14): 1451-1454.
- [22] 刘欣悦,刘轶飞,易伯涛,等.外源钙缓解花生低温光合障碍的调控机制[J].植物营养与肥料学报,2022,28(2):291-301.
- [23] White P J, Broadley R M. Calcium in plants[J]. Annals of Botany, 2003, 92(4): 487-511.
- [24] 王智明,王敏欣,王怀春.钙、硼与早酥梨木栓化褐变的关系研究[J].农业研究与应用,2019,32(6):12-16.
- [25] 刘磊超,姜存仓,董肖昌,等.硼胁迫对枳橙砧木细根根尖成熟区和幼嫩叶片细胞结构的影响[J].中国农业科学,2015(24): 4957-4964.
- [26] 陈晟,施木田,吴宇芬,等.硼胁迫对不同基因型西瓜部分生理指标的影响[J].中国农学通报,2016,32(16):56-60.
- [27] 李宏建. Ca^{2+} 介导 MdWRKY9 调控苹果果实水心病发生的分子机制[D].沈阳:沈阳农业大学,2024.
- [28] 孟繁佳,于春开,宫玉东,等.日韩梨水心病的症状、发生原因及防治方法[J].烟台果树,2009(2):42.
- [29] 姚艳丽,付琼,周迪,等.水心病菠萝果实生理指标和内源激素含量变化[J].热带作物学报,2021,42(9):2587-2593.
- [30] Pusittigul I, Kondo S, Siriphanich J. Internal browning of pineapple (*Ananas comosus* L.) fruit and endogenous concentrations of abscisic acid and gibberellins during low temperature storage[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 146: 45-51.
- [31] Chen Y E, Cui J M, Li G X, et al. Effect of salicylic acid on the antioxidant system and photosynthesis in wheat seedlings[J]. Biologia Plantarum, 2016, 60: 139-147.