

黄瓜和黑籽南瓜幼苗根系边缘细胞对肉桂酸胁迫的应答差异

乔永旭*

(唐山师范学院生命科学系, 河北唐山 063000)

摘 要: 为了探索肉桂酸 (cinnamic acid, CA) 对黄瓜和黑籽南瓜根系边缘细胞 (root border cell, RBC) 生理特性的影响, 以其幼苗为试材, 研究了 0、0.125 和 0.250 mmol · L⁻¹ CA 对两者 RBC 的数量、活率、黏胶层厚度、凋亡率以及幼苗根系活力的影响。结果表明: CA 胁迫降低了黄瓜和黑籽南瓜 RBC 数、活率和根系活力, 这种抑制效果在黄瓜上比在黑籽南瓜上更加明显; CA 胁迫增加了两者 RBC 的黏胶层厚度和凋亡率, 黑籽南瓜黏胶层厚度的增加量较黄瓜明显, RBC 凋亡率的增加程度低于黄瓜。0.125 mmol · L⁻¹ CA 对黄瓜和黑籽南瓜 RBC 的影响趋势与 0.250 mmol · L⁻¹ CA 一致, 其影响程度低于后者。RBC 附着根尖时, 0.250 mmol · L⁻¹ CA 处理的黄瓜的根系活力明显降低, 为对照的 83.3%, 而黑籽南瓜则无显著变化。去除 RBC 后, 0.250 mmol · L⁻¹ CA 明显降低了黄瓜和黑籽南瓜的根系活力, 且黄瓜的根系活力显著低于黑籽南瓜。RBC 能增强植物抵御 CA 胁迫的能力; 黑籽南瓜 RBC 因具有凋亡率低及较厚的黏胶层等特性, 在抵御 CA 胁迫的能力方面强于黄瓜。

关键词: 黄瓜; 黑籽南瓜; 肉桂酸; 胁迫; 根系边缘细胞

中图分类号: S 642.2; S 642.1

文献标志码: A

文章编号: 0513-353X (2015) 05-0890-07

Studies on Different Response of Cinnamic Acid to Root Border Cells in Cucumber and Figleaf Gourd Seedlings

QIAO Yong-xu*

(Department of Life Science, Tangshan Normal University, Tangshan, Hebei 063000, China)

Abstract: In order to study cinnamic acid (CA) stress on root border cells (RBCs) biological characteristic in cucumber and figleaf gourd seedlings, the number of RBCs, viability of RBCs, thickness of mucilage layer of RBCs, the apoptosis rate of RBC and root activities in both species seedlings stressed by 0, 0.125, 0.250 mmol · L⁻¹ CA were investigated. The results showed that the number of RBCs, viability of RBCs and root activities inhibited by CA in cucumber seedlings were higher than that in figleaf gourd seedlings. Thickness of mucilage layer of RBC increased was higher in CA treated figleaf gourd seedlings than that in CA treated cucumber seedlings, on the contrary apoptosis rate of RBCs was lower in CA treated figleaf gourd seedlings. For RBCs the same trend was observed in both species stressed by 0.125

收稿日期: 2015-01-07; **修回日期:** 2015-03-24

基金项目: 河北省科技计划项目 (13226922); 河北省高等学校科学技术研究青年基金项目 (QN20132018); 唐山师范学院博士基金项目 (2014A04)

* E-mail: qiaoyx123@163.com; Tel: 0315-3863212

and $0.250 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CA, but the extent of influence by lower concentration CA was lesser than that by higher CA concentration. $0.250 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CA inhibited root activities, which were more serious in cucumber seedlings than in figleaf gourd seedlings. Removal of RBCs from root tips led to more severe decline of root activities in $0.250 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CA treated cucumber and figleaf gourd seedling, it was more obvious in root activity in cucumber seedlings. It was concluded that RBCs play an important role in protecting root from CA toxicity, especially in figleaf gourd seedlings because of the lower apoptosis rate of RBCs and more thickness of mucilage layer of RBCs.

Key words: cucumber; figleaf gourd; cinnamic acid; stress; root border cell

黄瓜 (*Cucumis sativus* L.) 由于栽培面积大, 复种指数高, 时常发生连作障碍。连作障碍产生的主因之一是植株根系分泌的一些自毒物质 (乔永旭 等, 2014)。这种自毒作用常见于芋头 (Asao et al., 2003)、黄瓜和西瓜 (Yu et al., 2000) 等, 这些植物的根系提取物或分泌物能明显抑制自身的生长, 而不能抑制其它物种的生长 (Ding et al., 2007)。

根系边缘细胞 (root border cell, RBC) 是指起源于根尖表皮并附着在根尖的活细胞, 保护植物根尖抵御外界有毒物质和微生物的危害 (Iijima et al., 2003)。近年来的研究表明, RBC 能够保护根尖免受 Al^{3+} 毒害 (Cai et al., 2011)、 Fe^{2+} 毒害 (Xing et al., 2008)、 Na^{+} 毒害 (乔永旭, 2011)、寄生线虫 (Wuyts et al., 2006)、致病细菌 (Knox et al., 2007)、侵染性真菌 (Jaroszuk-Scisel et al., 2009) 或者高浓度 CO_2 (Zhao et al., 2000) 的危害。目前关于 RBC 抵御自毒物质毒害的机理尚不清楚。

肉桂酸 (cinnamic acid, CA) 是黄瓜根系分泌物中一种重要的自毒物质, 在许多研究中作为典型的化感物质使用 (Yu & Matsui, 1994; Ding et al., 2007), 而该物质对黄瓜常用砧木——黑籽南瓜 (*Curcubita ficifolia* Bouché) 的影响不大。本研究中选择对 CA 敏感的黄瓜和耐受的黑籽南瓜为试验材料, 进行悬空培养, 研究 CA 对两者 RBC 数量、活率、黏胶层厚度、凋亡率及根系活力的影响, 并探讨在黄瓜和黑籽南瓜种间应答差异的生理原因。

1 材料与方法

1.1 试验材料及其处理

将由中国农业科学院蔬菜研究所提供的黄瓜 ‘中农 16 号’ 和云南黑籽南瓜种子用 70% 的乙醇消毒 60 s, 再用无菌蒸馏水冲洗 3 次, 并浸泡在无菌蒸馏水中 4 h, 之后转移到 28°C 培养箱内催芽, 待种子露白后进行试验。用铁丝将纱网固定于盛有 150 mL 蒸馏水的 1 000 mL 烧杯中, 将穿孔滤纸置于纱网上。将露白种子播于网孔中, 每个烧杯 30 粒种子。用塑料薄膜和橡皮筋封口, 置于 28°C 培养箱中黑暗培养。待种子根尖长至约 5 mm 时将烧杯分成 2 组。组 1 有 24 个烧杯, 组 2 有 12 个烧杯。

组 1: 每隔 1 h 对初生根分别喷施 pH 6.0 的 0、0.125 和 $0.250 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的肉桂酸 (cinnamic acid, CA) 水溶液, 连续喷 5 次。待根系长至 20 ~ 25 mm 时测定根系边缘细胞 (RBC) 数、活性、黏胶层厚度、凋亡率和根系活力。组 2: 对初生根用小水流 (无菌蒸馏水) 每 4 h 冲洗 1 次, 每次冲洗约 30 s, 以去掉 RBC (Cai et al., 2011), 再用 0、0.125 和 $0.250 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 CA 水溶液每隔 1 h 喷施 5 次, 待根系长至 20 ~ 25 mm 时测定根系活力。其中每个处理有 20 粒种子, 共有 3 次重复。

1.2 测定项目与测定方法

根系边缘细胞 (RBC) 数和活率的测定: 挑选 9 个均匀一致的根尖, 将其浸泡在盛有 50 μL 蒸馏水的离心管中 1 min, 并用巴斯德吸液管轻微搅拌以便释放大量 RBC。取 10 μL RBC 悬浮液与 FDA-PI (FDA 25 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$, PI 10 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$) 复合染液以 1:1 混合, 染色 10 min。在荧光显微镜 Olympus BX 51, DP 70 下镜检, 活细胞呈现绿色 (FDA 荧光), 死细胞呈现红色 (PI 荧光), 用血细胞计数板计数 (Pan et al., 2004)。

RBC 黏胶层厚度的测定: 将获得的 RBC 悬浮液 10 μL 与 10 μL 的墨水混合, 将混合液滴在载玻片上, 盖片, 在荧光显微镜下观察测量。RBC 的黏胶层测量 3 个不同位置, 取其平均值 (Cai et al., 2011, Qiao et al., 2013)。

RBC 凋亡率的测定: 将获得的 RBC 悬浮液静置 2 h, 弃去蒸馏水, 加入少许 95% 乙醇静置 30 min, 再用磷酸缓冲液 (pH 6.0) 冲洗 2 ~ 3 次, 取细胞悬浮液与 Hoechst-33258 染液 (10 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$) 以 1:1 混合, 在荧光显微镜下观察活细胞与凋亡细胞的形态特征并计数 (马春红 等, 2011)。

根系活力的测定: 根系活力采用氯化三苯基四氮唑 (TTC) 法测定。

所有数据均重复 3 次, 采用 DPS7.05 软件进行单因素方差分析, *LSD* 法进行差异显著性比较, 应用 Microsoft Excel 2010 进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 肉桂酸 (CA) 对黄瓜和黑籽南瓜根系边缘细胞 (RBC) 数量和活率的影响

试验结果表明, 高浓度 CA 更能抑制黄瓜 RBC 的数量, 黑籽南瓜受到的抑制不明显。0.125 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CA 对两种瓜类 RBC 数的抑制程度均不显著; 0.250 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CA 处理后, 黄瓜 RBC 数较对照降低了 25.7%, 黑籽南瓜则无显著差异 (图 1)。

FDA-PI 染色试验表明, 高浓度 CA 更能抑制黄瓜 RBC 活率, 而黑籽南瓜受到的抑制不明显 (图 1; 图 2)。0.125 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CA 处理后两种瓜类 RBC 活率变化不大; 0.250 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CA 处理后, 黄瓜 RBC 活率较对照降低了 9.8%; 而黑籽南瓜无显著变化。

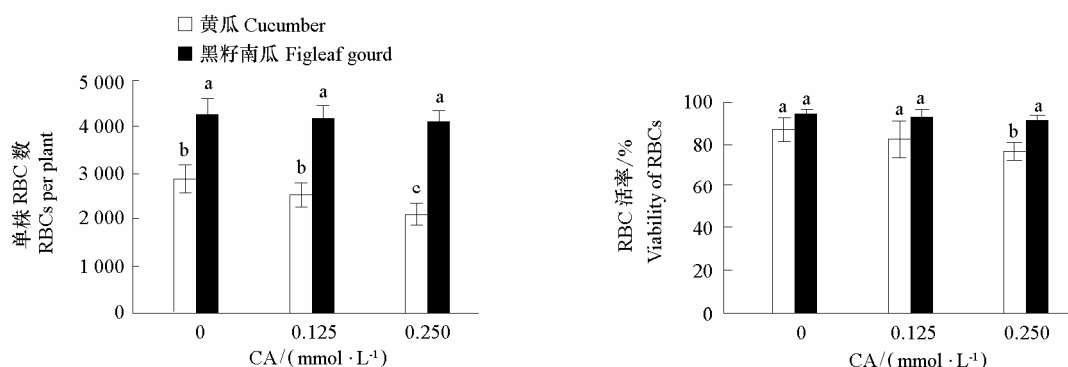


图 1 肉桂酸 (CA) 对黄瓜和黑籽南瓜根系边缘细胞 (RBC) 数量和活率的影响

不同字母表示 0.05 水平差异显著。下同。

Fig. 1 Effect of cinnamic acid (CA) on number and viability of root border cells (RBCs) in cucumber and figleaf gourd plants

Different letters in the figure mean significant at 0.05. The same below.

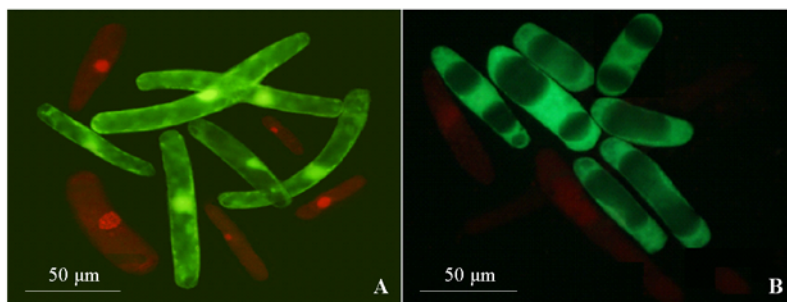


图2 FDA-PI 染色的黄瓜 (A) 和黑籽南瓜 (B) 的 RBC

绿色: 活细胞; 红色: 死细胞。

Fig. 2 RBCs of cucumber (A) and figleaf gourd (B) were dyed by FDA-PI

The live RBCs are green, the dead RBCs are red.

2.2 肉桂酸 (CA) 对黄瓜和黑籽南瓜根系边缘细胞 (RBC) 黏胶层厚度的影响

由图 3 和图 4 可知, 高浓度 CA 更能增加 RBC 黏胶层的厚度, 黑籽南瓜 RBC 黏胶层厚度的增加高于黄瓜。

0.125 mmol · L⁻¹ CA 处理后, 黄瓜和黑籽南瓜 RBC 黏胶层厚度与对照无显著差异; 0.250 mmol · L⁻¹ CA 处理后, 黄瓜与 0.125 mmol · L⁻¹ CA 处理相比增加不显著, 黑籽南瓜则增加 36.8%。

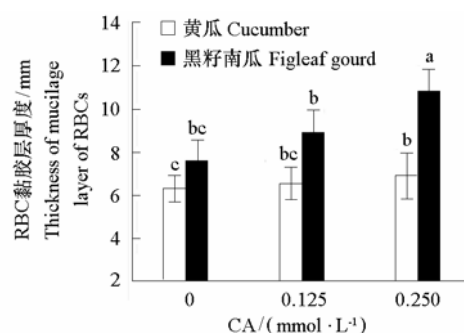


图3 肉桂酸 (CA) 对黄瓜和黑籽南瓜根系边缘细胞 (RBC) 黏胶层厚度的影响

Fig. 3 The effect of cinnamic acid (CA) on thickness of mucilage layer of RBCs of cucumber and figleaf gourd

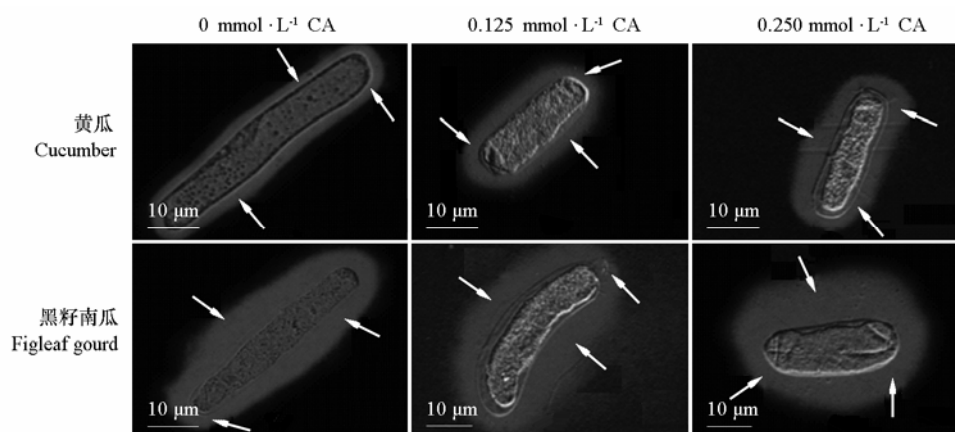


图4 肉桂酸 (CA) 处理后黄瓜和黑籽南瓜根系边缘细胞 (RBC) 的黏胶层

箭头为黏胶层的测定位置。

Fig. 4 The mucilage layer around RBCs from cucumber and figleaf gourd subjected to treatment with cinnamic acid (CA)

The arrows mean place measuring mucilage layer around RBCs.

2.3 肉桂酸（CA）对黄瓜和黑籽南瓜根系边缘细胞（RBC）凋亡率的影响

由图 5 可见，正常 RBC 的细胞核轮廓较圆，外形较小，且质地均匀一致，呈现蓝色亮斑；出现凋亡现象的 RBC 的细胞核出现弥散现象，轮廓不规则，外形变大，质地明暗交错，降解为稍亮的蓝色片段。

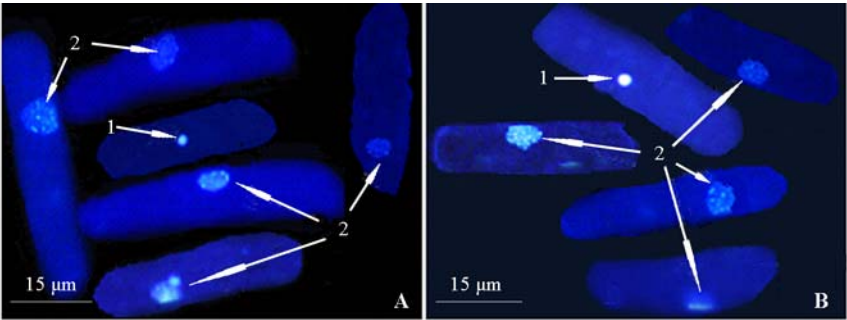


图 5 Hoechst-33258 染色的黄瓜（A）和黑籽南瓜（B）的根系边缘细胞（RBC）

1：正常的 RBC；2：出现凋亡片段的 RBC。

Fig. 5 The dispersed RBCs from root-tips of cucumber (A) and figleaf gourd (B) were dyed by Hoechst-33258

1: Normal RBCs; 2: Apoptosis RBCs.

由图 6 可以看出，高浓度 CA 更能增加 RBC 的凋亡率，同等浓度 CA 诱导黄瓜 RBC 的凋亡率明显高于黑籽南瓜。

0.125 mmol · L⁻¹ CA 处理后，仅黄瓜 RBC 的凋亡率增加 1.8%；0.250 mmol · L⁻¹ CA 处理后，黄瓜和黑籽南瓜 RBC 的凋亡率均显著增加 3.5%和 2.8%。

总体上说，黑籽南瓜 RBC 的凋亡率低于黄瓜，对照和 0.125 mmol · L⁻¹ CA 处理的黑籽南瓜分别较黄瓜低 1.5%和 2.1%。

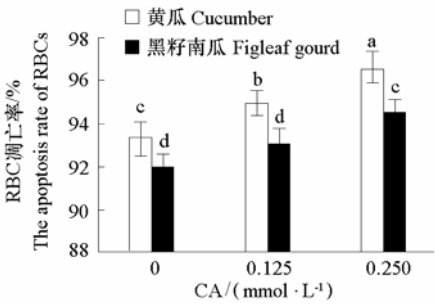


图 6 不同浓度肉桂酸（CA）对黄瓜和黑籽南瓜根系边缘细胞（RBC）凋亡率的影响

Fig. 6 The effect of different concentration cinnamic acid (CA) on the apoptosis of root border cells (RBCs) of cucumber and figleaf gourd

2.4 肉桂酸（CA）对黄瓜和黑籽南瓜根系活力的影响

由图 7 可知，没有 CA 胁迫时，是否去除 RBC 对根系活力影响不大；CA 胁迫后，RBC 能降低其对两种瓜类根系活力的抑制，这在黑籽南瓜上表现的更明显。无论有无 RBC，0.125 mmol · L⁻¹ CA 对两种瓜类根系活力的抑制不显著。RBC 附着根尖时，0.250 mmol · L⁻¹ CA 使黄瓜根系活力降低了 16.7%，而黑籽南瓜的根系活力则没有受到大的影响。RBC 去除后，0.250 mmol · L⁻¹ CA 处理使两种瓜类的根系活力分别较不去除 RBC 时下降 24.4%和 18.5%，

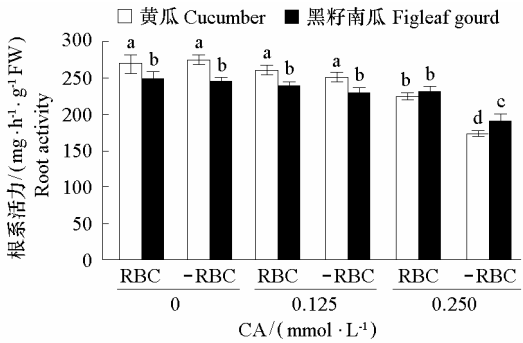


图 7 肉桂酸（CA）对黄瓜和黑籽南瓜根系活力的影响

Fig. 7 Effect of cinnamic acid (CA) on root activity in cucumber and figleaf gourd

并且黄瓜根系活力显著低于黑籽南瓜。由此可知, 黄瓜 RBC 抵御 $0.250 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CA 胁迫的能力低于黑籽南瓜。

3 讨论

过去普遍认为 RBC 没有活性, 只把它作为根系的一个结构和功能的组分, 后来发现多种植物的 RBC 脱离母体前的存活率超过 90% (李荣峰 等, 2007)。至今已经在 14 科 49 种植物中发现了大量存活的 RBC (Hawes et al., 2000; Cheng et al., 2008)。本研究中发现黄瓜与黑籽南瓜 RBC 的数量和活率有一定差异, 虽然二者同属于葫芦科植物, 但是前者 RBC 的数量和活率均低于后者, 该现象在同一物种的不同品种间也得到了证实 (Cai et al., 2011), 这可能和物种的特异性有关。此外 RBC 也具有抵御外界逆境因子胁迫的作用, 比如水稻 RBC 对 Al^{3+} 毒害的抵御 (Cai et al., 2011)、黄瓜 RBC 对 Na^+ 的抵御 (乔永旭, 2011)。CA 是瓜类植物主要的自毒物质之一, 长期栽培黄瓜的土壤中自毒物质的含量约为 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 在植株残渣丰富的土壤中含量更高。因此, 本试验选择的 CA 浓度在 $0 \sim 0.250 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间 (Ding et al., 2007)。此外, CA 能增强根系细胞膜脂过氧化程度, 抑制根系的生长, 其原因可能是 CA 提高了根系中活性氧水平和丙二醛的含量, 抑制了细胞周期蛋白基因的表达, 延长了细胞分裂周期, 降低了细胞分裂速度, 抑制了细胞伸长基因的表达 (Zhang et al., 2009)。本试验中研究了 CA 胁迫与 RBC 功能的关系, 发现 CA 对黄瓜和黑籽南瓜根系的活力均有一定的抑制作用, 而 RBC 能降低 CA 对两种瓜类根系活力的抑制, 并且不同作物的 RBC 抵御 CA 毒害的能力也不同。试验发现, 当根系失去 RBC 的保护后, 黄瓜和黑籽南瓜根系活力均受到 $0.250 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CA 的显著抑制; 在 RBC 保护下, 低浓度 CA 对黑籽南瓜根系活力的抑制不明显, 但对黄瓜根系活力抑制显著。由此可以推测黄瓜 RBC 抵御 CA 胁迫的能力低于黑籽南瓜。至于 RBC 抵御逆境因子的胁迫机理, Cai 等 (2011) 和 Qiao 等 (2013) 研究认为 RBC 通过增加黏胶层厚度和部分死亡来保护根系的生长, 本研究的结果也证实了这一点, 同时也发现 CA 胁迫后黑籽南瓜 RBC 的凋亡率和死亡率低于黄瓜, 但黏胶层厚度增加的幅度远超过黄瓜, 变厚的黏胶层能减缓 CA 对于 RBC 的毒害, 由此可以推断 RBC 能增强植物抵御 CA 胁迫的能力; 由于黑籽南瓜 RBC 因具有凋亡率低、活率高及较厚的黏胶层等特性, 因此在抵御 CA 胁迫的能力方面明显强于黄瓜。

细胞凋亡在逆境的条件下容易发生, 严重时会引起细胞的死亡 (马春红 等, 2011)。本研究中发现, CA 胁迫引起了黄瓜和黑籽南瓜 RBC 的细胞核出现弥散现象, 增加了凋亡率, 最终引起了细胞死亡, 这也直接证明了 CA 胁迫降低了 RBC 活率的试验现象。该研究结论是否适用于其它植物或其它逆境因子对植物的胁迫, 有待于进一步的研究。

CA 是主要的自毒物质, 也是黄瓜连作障碍发生的重要诱因。研究发现黑籽南瓜的抗逆性优于黄瓜, 因而作为黄瓜的砧木应用于农业生产, 其中的机理尚无定论 (Ding et al., 2007)。本研究从 RBC 的角度研究, 发现黄瓜和黑籽南瓜 RBC 受到 CA 胁迫后表现的生理差异, 阐明了黑籽南瓜抵御逆境的能力强于黄瓜的机理, 为以黑籽南瓜为砧木嫁接黄瓜提供了理论支持。

References

- Asao T, Hasegawa K, Sueda Y, Tomita K, Tanjguchi K, Hosoki T, Pramanik M H R, Matsui Y. 2003. Autotoxicity of root exudates from taro. *Scientia Horticulturae*, 97: 389 - 396.
- Cai M Z, Zhang S N, Xing C H, Wang F M, Wang N, Zhu L. 2011. Developmental characteristics and aluminum resistance of root border cells in rice seedlings. *Plant Science*, 180: 702 - 708.

- Cheng W R, Liu P, Xu G D, Cai M Z. 2008. Effects of Al^{3+} on the biological characteristics of cowpea root. *Acta Physiologiae Plantarum*, 30: 303 – 308.
- Ding J, Sun Y, Xiao C L, Shi K, Zhou Y H, Yu J Q. 2007. Physiological basis of different allelopathic reactions of cucumber and figleaf gourd plants to cinnamic acid. *Journal of Experimental Botany*, 58: 3765 – 3773.
- Hawes M C, Gunawardena U, Miyasaka S, Zhao X W. 2000. The role of root border cells in plant defense. *Trends in Plant Science*, 5: 127 – 133.
- Iijima M, Barlow P W, Bengough A G. 2003. Root cap structure and cell production rates of maize (*Zea mays*) roots in compacted sand. *New Phytologist*, 160: 127 – 134.
- Jaroszuk-Scisiel J, Kurek E, Rodzik B, Winiarczyk K. 2009. Interactions between rye (*Secale cereale*) root border cells (RBCs) and pathogenic and nonpathogenic rhizosphere strains of *Fusarium culmorum*. *Mycological Research*, 113: 1053 – 1061.
- Knox O G G, Gupta V V S R, Nehl D B, Stiller W N. 2007. Constitutive expression of Cry proteins in roots and border cells of transgenic cotton. *Euphytica*, 154: 83 – 90.
- Li Rong-feng, Cai Miao-zhen, Liu Peng, Liang He, Xu Gen-di. 2007. The stress response and resistance of root border cells in plants. *Guihaia*, 27 (3): 497 – 502. (in Chinese)
- 李荣峰, 蔡妙珍, 刘 鹏, 梁 和, 徐根娣. 2007. 植物根边缘细胞的抗逆性研究进展. *广西植物*, 27 (3): 497 – 502.
- Ma Chun-hong, Li Xiu-li, Dong Wen-qi, Zhang Hong-xin, Li Yun-chao, Cui Si-ping, Wang Li-an, Jia Yin-suo, Dai Zhi-gang. 2011. Detection of apoptosis in homocaryon with C and N cytoplasm of maize induced by *Helminthosporium maydis* race C (HMC) toxin. *Scientia Agricultura Sinica*, 44 (9): 1823 – 1829. (in Chinese)
- 马春红, 李秀丽, 董文琦, 张红心, 李运朝, 崔四平, 王立安, 贾银锁, 戴志刚. 2011. HMC 毒素诱导玉米同核 C、N 细胞质细胞凋亡的荧光显微观察. *中国农业科学*, 44 (9): 1823 – 1829.
- Pan J W, Ye D, Wang L L, Hua J, Zhao G F, Pan W H, Han N, Zhu M Y. 2004. Root border cell development is a temperature-insensitive and Al -sensitive process in barley. *Plant and Cell Physiology*, 45: 751 – 760.
- Qiao Y X, Zhang Y P, Zhang H X, Tian Y Q, Gao L H. 2013. Developmental characteristics and cinnamic acid resistance of root border cells in cucumber and figleaf gourd seedlings. *Journal of Integrative Agriculture*, 12 (11): 2065 – 2073.
- Qiao Yong-xu. 2011. Effects of NaCl stress on generation of root border cells in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Plant Physiology Journal*, 47 (1): 97 – 101. (in Chinese)
- 乔永旭. 2011. NaCl 胁迫对黄瓜根系边缘细胞发生的影响. *植物生理学报*, 47 (1): 97 – 101.
- Qiao Yong-xu, Zhang Yong-ping, Gao Li-hong. 2014. Study on different responses to cinnamic acid and sub-low temperature stress on cucumber and figleaf gourd seedlings. *Journal of China Agricultural University*, 19 (4): 86 – 94. (in Chinese)
- 乔永旭, 张永平, 高丽红. 2014. 黄瓜和黑籽南瓜对肉桂酸及亚低温交叉胁迫的应答差异. *中国农业大学学报*, 19 (4): 86 – 94.
- Wuyts N, Maung Z T Z, Swennen I R, Waele D D. 2006. Banana rhizodeposition: Characterization of root border cell production and effects on chemotaxis and motility of the parasitic nematode *Radopholus similis*. *Plant and Soil*, 283: 217 – 228.
- Xing C H, Zhu M H, Cai M Z, Liu P, Xu G D, Wu S H. 2008. Developmental characteristics and response to iron toxicity of root border cells in rice seedlings. *Journal of Zhejiang University Science B*, 9: 261 – 264.
- Yu J Q, Matsui Y. 1994. Phytotoxic substances in the root exudates of *Cucumis sativus* L. *Journal of Chemical Ecology*, 20: 21 – 31.
- Yu J Q, Shou S Y, Qian Y R, Hu W H. 2000. Autotoxic potential in cucurbit crops. *Plant and Soil*, 223: 147 – 151.
- Zhang Y, Gu M, Xia X J, Shi K, Zhou Y H, Yu J Q. 2009. Effects of phenylcarboxylic acids on mitosis, endoreduplication and expression of cell cycle-related genes in roots of cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Journal of Chemical Ecology*, 35 (6): 679 – 688.
- Zhao X W, Misaghi I J, Hawes M C. 2000. Stimulation of border cell production in response to increased carbon dioxide levels. *Plant Physiology*, 122: 181 – 188.