



24-表油菜素内酯对樱桃番茄 光合特性和果实品质的影响

李 蒙, 束 胜, 郭世荣*, 杜 静, 王军伟

(南京农业大学园艺学院, 农业部南方蔬菜遗传改良重点开放实验室, 南京 210095; 南京农业大学(宿迁)设施园艺研究院, 江苏宿迁 223800)

摘 要:以樱桃番茄品种‘千禧’为试验材料, 采用醋糟基质桶式栽培的方法, 研究喷施不同浓度(0.05、0.10、0.20、0.40 mg · L⁻¹)的表油菜素内酯(EBR)对樱桃番茄植株叶绿素含量、光合气体交换参数、叶绿素荧光参数、产量及果实品质的影响。结果显示:(1)与对照相比, 喷施 0.05、0.10、0.20 mg · L⁻¹ EBR 显著提高了番茄叶片叶绿素含量、净光合速率(P_n)和蒸腾速率(T_r); 0.10 mg · L⁻¹ EBR 处理的番茄叶片实际光化学效率(Φ_{PSII})、有效光化学效率(F_v'/F_m')、非光化学淬灭系数(q_p)和电子传递速率(ETR)显著升高, 碳酸酐酶和 Rubisco 酶活性也显著增强。(2)0.10 mg · L⁻¹ EBR 处理番茄单果重和总产量分别比对照显著提高 17.5%、33.6%, 并且果实番茄红素和 β -胡萝卜素含量、可溶性固形物、可溶性糖、维生素 C 含量也显著增加。研究表明, 油菜素内酯可以调节光合酶的活性, 提高番茄叶片的光合作用能力, 促进番茄植株的生长发育, 从而提高番茄的产量和品质, 并以 0.10 mg · L⁻¹ EBR 处理的效果最好。

关键词: 24-表油菜素内酯(EBR); 樱桃番茄; 光合特性; 果实品质; 产量

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

Effect of 24-Brassinolides on Photosynthetic Characteristics and Fruit Quality of Cherry Tomato

LI Meng, SHU Sheng, GUO Shirong*, DU Jing, WANG Junwei

(College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Key Laboratory of Southern Vegetable Crop Genetic Improvement, Ministry of Agriculture, Nanjing 210095, China; Academy of Protected Horticulture, Nanjing Agricultural University(Suqian), Suqian, Jiangsu 223800, China)

Abstract: With cherry tomato cultivar ‘Qianxi’ as test material, the experiment was carried out with vinegar residue substrate to investigate the effects of different concentrations(0.05, 0.10, 0.20, 0.40 mg · L⁻¹) of 24-epibrassinolide on chlorophyll content, gas exchange parameters, chlorophyll fluorescence parameters, yield and fruit quality of cherry plants. The results showed that: (1) The chlorophyll content, net photosynthetic rate(P_n) and transpiration rate(T_r) were significantly enhanced by 0.05, 0.10 and 0.20 mg · L⁻¹ EBR. Chlorophyll fluorescence parameters such as Φ_{PSII} , F_v'/F_m' , q_p and ETR were significantly increased at the concentration of 0.10 mg · L⁻¹ EBR, the activities of carbonic anhydrase and Rubisco were also increased by EBR. (2) 0.10 mg · L⁻¹ EBR significantly increased levels of lycopene and beta-carotene, soluble solids, soluble sugar and vitamin C in cherry fruit, and also EBR significantly increased fruit weight and yield by 17.5% and 33.6% as compared to the control, respectively. These results indicated that EBR

收稿日期: 2014-09-13; 修改稿收到日期: 2014-10-30

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-25-C-03); 江苏省农业三新工程项目(SXGC[2013]331 和 SXGC[2014]256); 江苏省科技成果转化专项基金项目(BA2014147)

作者简介: 李 蒙(1989—), 男, 硕士, 主要从事设施园艺与无土栽培研究。E-mail: limengnld@163.com

* 通信作者: 郭世荣, 教授, 博士生导师, 主要从事设施园艺与无土栽培研究。E-mail: srguo@njau.edu.cn

could improve the yield and quality of tomato fruits by strengthening the photosynthetic enzymatic activity and promoting growth, and the treated concentration of 0.10 mg · L⁻¹ EBR showed the best effects on growth in cherry tomato plants.

Key words: 24-epibrassinolide (EBR); cherry tomato; photosynthetic characteristics; quality; yield

油菜素内酯 (Brassinolides, BRs) 是广泛存在于植物中的一种天然的甾醇类物质, 国际上被公认为活性最高的高效、广谱、无毒的植物生长激素, 广泛参与植物生长发育过程。随着工业提取技术的不断进步, 人工合成具有高活性的表油菜素内酯 (EBR) 在蔬菜、瓜果和树木上得到了广泛的应用。研究表明, 极低浓度的 EBR 处理就能使植物表现出显著的生理效应, 如促进生长、提高光合作用、增加坐果率、提高作物产量和品质等^[1-5]。Xia 等^[6]发现, 喷施 EBR 能显著增加饱和光下黄瓜幼苗的净光合速率; 张惟等^[7]研究表明 EBR 处理显著提高番茄的坐果率和产量。

樱桃番茄 (*Lycopersicon esculentum* Mill. var. *cerasiforme* Alef) 又称珍珠番茄、迷你番茄、小番茄等, 是一种重要的水果型茄果类蔬菜作物, 也是中国设施栽培中较为广泛的蔬菜品种之一。由于其口味香甜鲜美、富含多种营养物质、Vc 含量高、适宜生食, 因而深受居民喜爱。随着人们生活水平的提高, 消费者对樱桃番茄的需求量越来越大, 且对品质要求越来越高。醋糟是酿醋业的一大宗副产品, 具有颗粒较粗、通气孔隙度大、养分丰富等特性。近年来, 醋糟被广泛开发用于蔬菜育苗和栽培基质, 在生产中取得了良好的效果。研究表明, 醋糟混合基质可明显促进辣椒、西瓜、黄瓜等蔬菜作物的产量和品质^[8-9]。然而在基质栽培条件下, 施用 EBR 对蔬菜作物光合作用、产量和品质影响方面的研究鲜有报道。

为此, 本试验以‘千禧’樱桃番茄品种为材料, 考察叶面喷施不同浓度 EBR 对樱桃番茄植株生长、光合作用、产量和品质的影响, 旨在筛选出基质培番茄的最适宜 EBR 使用浓度, 为进一步利用外源生长调节物质促进基质培樱桃番茄高效、优质、安全生产提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

栽培基质采用前期试验筛选出的最佳基质配方 (醋糟、草炭、蛭石体积比为 5 : 3 : 2), 3 种基质均由镇江培蕾有机肥有限公司提供, 其理化性状指标和营养元素含量见表 1; 供试樱桃番茄品种‘千禧’, 种

子由台湾农友种苗公司生产; 表油菜素内酯购自 Sigma 公司。

1.2 试验处理

试验于 2014 年 3 月至 7 月在南京农业大学实验基地的现代化温室中进行。樱桃番茄种子在 55 ℃ 的温水中浸泡 15 min, 然后在清水中浸泡 8 h, 此后置于 28 ℃ 的恒温箱中催芽。选取饱满、发芽整齐一致的种子播种于 72 孔穴盘中, 育苗期间根据基质的湿润程度和幼苗生长状况, 不定期用自来水补充基质水分。待番茄幼苗生长至 3 叶 1 心时, 挑选长势较好且一致的植株移栽于南京农业大学自行研制的 NAU-GI 型专用桶式栽培装置中 (栽培桶下口直径 22.5 cm, 上口直径 35 cm, 高 30 cm, 网芯盘直径 26.5 cm, 网芯筒下口直径 11.5 cm, 上口 13.5 cm, 高 12 cm, 可装 10 L 栽培基质), 株行距为 30 cm × 60 cm, 每个栽培桶中定植 1 株。

缓苗后, 白天温度控制在 28~30 ℃, 夜间 14~16 ℃。采用滴灌系统根据植株大小定时定量浇灌 Hoagland 营养液。定植成活后, 每株每天浇 1/2 Hoagland 营养液 200~500 mL; 开花结果期, 每株每天浇 1 倍 Hoagland 营养液 1.0~2.5 L。植株调整、病虫害防治等按有机栽培管理标准进行。

选取长势一致、生长健壮、结果正常、无机械损伤的樱桃番茄植株作为试验用植株, 采用单因素随机区组试验方法, 在樱桃番茄开花前 10 d 开始叶面

表 1 栽培基质的理化性状

Table 1 Main physical and chemical properties of different mixed vinegar residue substrates

项目 Item	数值 Value
容重 Bulk density/(g · cm ⁻³)	0.24
总孔隙 Total porosity/%	68.3
通气孔隙 Aeration porosity/%	24.8
持水孔隙 Water-holding porosity/%	43.5
水气比 WHP/AP	1.74
pH	6.58
全氮 Nitrogen/(g · kg ⁻¹)	11.44
全磷 Phosphorus/(g · kg ⁻¹)	2.77
速效钾 Available K/(g · kg ⁻¹)	15.35
钙 Calcium/(g · kg ⁻¹)	5.73
镁 Magnesium/(g · kg ⁻¹)	0.72
EC/(mS · cm ⁻¹)	0.74

喷施油菜素内酯,浓度设0.05、0.10、0.20、0.40 mg · L⁻¹ 4个水平,以喷清水为对照。每隔3 d喷施1次,共喷施3次。实验共设3次重复,每重复8棵植株。番茄出现第六花絮后打顶,果实全部成熟后采收测定果实大小,统计产量并取部分果实用于测定果实品质等相关指标。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 叶绿素含量 采用乙醇、丙酮、水混合液浸提法测定叶绿素含量。在樱桃番茄第1穗果实成熟期,取各小区中部植株的果实下部相邻第1片叶,剪碎,取0.1 g放入20 mL混合提取液(乙醇:丙酮:蒸馏水=4.5:4.5:1,体积比)中,在黑暗下浸泡提取至叶碎片完全变为白色为止。以提取液为对照,取浸提液分别在752型分光光度计上测定吸光度值OD₆₄₅和OD₆₆₃,最后计算叶绿素含量。

1.3.2 光合参数 在樱桃番茄第1穗果实成熟期,选取各小区中部植株的果实下部相邻第1片完全展开功能叶,用便携式光合测定系统(Li-6400,USA),于上午9:00~11:00测定植株光合气体交换参数。测定时使用开放气路,叶室温度控制在(25±1)℃,光强控制在800 μmol · m⁻² · s⁻¹,参比室CO₂浓度为(380±10) μmol · mol⁻¹,相对湿度(RH)为60%~70%。测定指标主要包括叶片的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间CO₂浓度(C_i)等。

1.3.3 叶绿素荧光参数 采用PAM-2100调制荧光仪(Walz,德国)进行测定。在樱桃番茄第1穗果实成熟期,选取各小区中部植株的果实下部相邻第1片完全展开功能叶,经过30 min充分暗适应,然后照射测量光,得到原初荧光(F₀),随后给一个饱和脉冲光(8 000 μmol · m⁻² · s⁻¹,0.8 s)后关闭,得到暗适应最大荧光(F_m)。打开作用光,待叶片光合作用达到稳态后得到光合稳态荧光(F_s)并记录,打开饱和脉冲光(8 000 μmol · m⁻² · s⁻¹,0.8 s)得到光化学作用下最大荧光(F_m'),然后关闭作用光,立即打开远红光,约3 s后关闭,得到光适应叶片的最小荧光(F₀')。根据公式计算:PS II最大光化学效率(F_v/F_m)=(F_m-F₀)/F_m;PS II实际光化学效率(Φ_{PSII})=(F_m'-F_s)/F_m';光化学淬灭系数(q_p)=(F_m'-F_s)/(F_m'-F₀') ;有效光化学效率(F_v'/F_m')=(F_m'-F₀')/F_m';电子传递速率(ETR)=(F_m'-F_s)/F_m'×PFD×0.5×0.84。在软件的Kinetics窗口监测各叶绿素荧光参数的动力学变化曲线,相应数据可直接从Report窗口导出^[10]。

1.3.4 碳酸酐酶和 Rubisco 酶活性 在番茄第1穗果实成熟期,取各小区中部植株的果实下部相邻第1片叶,准确称取0.5 g,参照李西腾等^[11]的方法,采用巴比妥缓冲液研磨,然后用pH计法测定碳酸酐酶活力;参照王盾^[12]的方法测定Rubisco酶初始活力。

1.3.5 果实产量及品质 用游标卡尺测定果实纵径、横径、果形指数(果实纵径/横径);用便携式硬度计测量硬度;果实重量采用电子分析天平称量;采用四分法,用组织捣碎机将果实打成匀浆进行品质检测。番茄红素含量参照胡晓波等^[13]的方法测定;β-胡萝卜素含量参照赵楠等^[14]的方法测定;维生素C含量采用2,6-二氯酚酚滴定法测定;可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝染色法测定;可溶性固形物含量参照GB12295-90折射仪法测定;可滴定酸含量采用NaOH滴定法测定;可溶性糖含量用蒽酮比色法测定;糖酸比为可溶性糖和可滴定酸的比值。

1.4 数据分析

试验数据采用Microsoft Excel 2003和DPS 7.05软件进行数据处理和统计分析,并用Duncan's检验法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 油菜素内酯对樱桃番茄叶绿素含量的影响

叶绿素作为光合作用中最主要的色素分子,参与光能吸收、传递和转化,其含量的高低与光合作用密切相关,并影响着植株干物质的积累^[15]。如表2所示,樱桃番茄叶片的叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素含量均随叶面喷施油菜素内酯(EBR)浓度增加表现出先增后降的趋势,且一定浓度的EBR(0.05~0.20 mg · L⁻¹)处理都明显高于对照(CK),并以0.10 mg · L⁻¹ EBR处理的叶绿素含量最高,而高浓度(0.40 mg · L⁻¹)的油菜素内酯处理显著降低了番茄叶片色素含量;同时,各处理间叶绿素a与叶绿素b比值与对照无显著差异。

2.2 油菜素内酯对樱桃番茄光合气体交换参数的影响

光合气体交换参数可以反映出番茄叶片通过光合作用制造碳水化物的能力。由图1可知,开花前喷施不同浓度EBR对番茄叶片气孔导度(G_s)和胞间CO₂浓度(C_i)均无显著影响;0.05、0.10、0.20 mg · L⁻¹ EBR处理不同程度地提高了樱桃番茄叶片的净光合速率(P_n),与对照相比分别显著增加了10.4%、24.5%、16.9%,但3个处理之间差异不显

表 2 油菜素内酯处理樱桃番茄叶片叶绿素的变化
Table 2 The chlorophyll content in leaves of cherry tomato spraying with EBR

EBR 浓度 EBR concentration /(mg · L ⁻¹)	叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content /(mg · g ⁻¹)	叶绿素 b 含量 Chlorophyll b content /(mg · g ⁻¹)	叶绿素总量 Chlorophyll content /(mg · g ⁻¹)	叶绿素 a/b Chl a/b
0(CK)	1.58±0.12b	0.49±0.04bc	2.08±0.17bc	3.21±0.06ab
0.05	1.81±0.08a	0.57±0.03ab	2.38±0.12ab	3.16±0.06ab
0.10	1.94±0.03a	0.63±0.01a	2.57±0.03a	3.09±0.01b
0.20	1.84±0.02a	0.57±0.01ab	2.42±0.02a	3.17±0.02ab
0.40	1.47±0.03b	0.44±0.01c	1.91±0.02c	3.30±0.02a

注:同列标有不同小写字母表示处理间在 0.05 水平达差异显著;下同。
Note:Different normal letters mean significantly different between treatments at 0.05 level;The same as below.

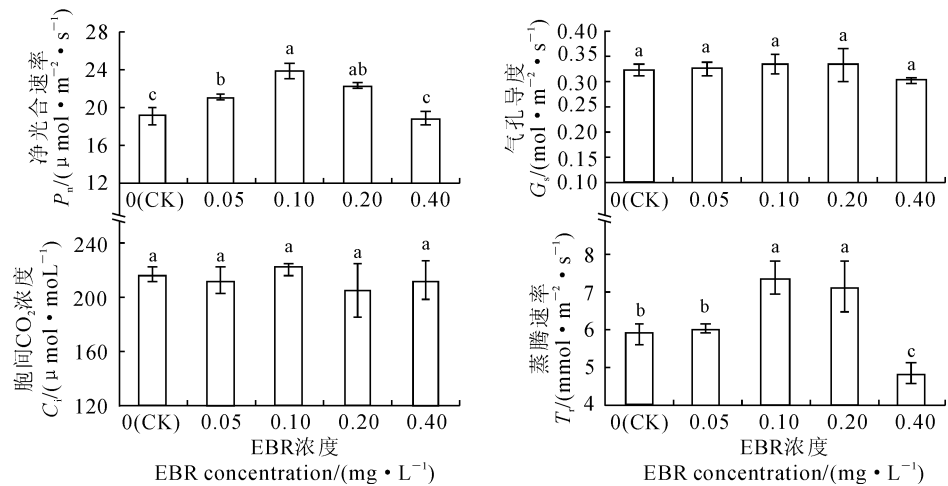


图 1 油菜素内酯处理樱桃番茄叶片光合气体交换参数的变化

Fig. 1 The photosynthetic gas exchange parameters in leaves of cherry tomato spraying with EBR

著;各浓度 EBR 处理还不同程度影响了樱桃番茄叶片的蒸腾速率(T_r),其中,0.05 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ EBR 处理无显著变化,0.10 和 0.20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ EBR 处理表现出显著促进作用,而更高浓度(0.40 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ EBR)处理则有显著抑制作用。

2.3 油菜素内酯对樱桃番茄叶绿素荧光参数影响

叶绿素荧光动力学技术被称为测定叶片光合功能快速、无损伤的探针^[16]。由图 2 可知,各个油菜素内酯处理樱桃番茄叶片 PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)在 0.81~0.87 之间,差异不显著。番茄叶片 PS II 实际光化学效率(Φ_{PSII})、光化学淬灭系数(q_p)、有效光化学效率(F_v'/F_m')及电子传递速率(ETR)在 0.10 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ EBR 处理下最高,与对照相比达到了显著差异水平,0.05 和 0.20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理次之,而 0.40 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理和对照 CK 最小。这表明在醋糟基质栽培条件下,喷施一定浓度的 EBR 能够提高樱桃番茄叶片 PS II 实际光化学效率,促进植株同化力的形成和光合电子的传递能力,从而提高番茄叶片的光合作用能力,并以 0.10 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ EBR 处理的效果最为明显。

2.4 油菜素内酯对樱桃番茄叶片碳酸酐酶和 Rubisco 酶活性的影响

由图 3 可知,叶面喷施一定浓度的 EBR(0.05~0.40 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)显著提高番茄叶片中碳酸酐酶的活性,0.05~0.40 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ EBR 处理的番茄叶片碳酸酐酶的活性比对照分别增加了 34.80%、73.30%、49.30%、51.80%;同时,叶面喷施 0.05、0.10、0.20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ EBR 显著提高了番茄叶片 Rubisco 酶的活性,与对照相比分别增加了 13.70%、28.10%、19.80%,并以 0.10 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ EBR 处理的效果最好。

2.5 油菜素内酯对樱桃番茄果实性状和产量构成的影响

如表 3 所示,在开花前 10 d 叶面喷施 0.05~0.40 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ EBR 均可不同程度增大樱桃番茄果实的纵径和横径,一定浓度 EBR(0.20 和 0.40 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)处理也增加了果形指数,但各 EBR 处理对樱桃番茄果实硬度影响不明显。其中 0.10 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ EBR 处理果实的纵径最大(3.29 cm),0.20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ EBR 处理果实的横径最大(2.56 mm)、果形指数最高(1.29),但仅各处理的纵径增幅达到显著水

平。同时,樱桃番茄的单株果数、单果重和单株总产量在喷施 $0.05 \sim 0.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ EBR 后得到不同程度提高,并有随 EBR 浓度升高而先升高后降低的趋势,并均在 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ EBR 处理下达到最大

值且显著高于对照; $0.05 \sim 0.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ EBR 处理番茄的单株总产量分别比对照增加了 15.1%、31.1%、21.2%和 3.5%,且在 0.10 和 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理条件下达显著水平。

2.6 油菜素内酯对樱桃番茄果实品质的影响

由表 4 可知,樱桃番茄果实番茄红素和 β -胡萝卜素含量在 $0.05 \sim 0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ EBR 处理下比对照不同程度提高,并均在 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ EBR 处理下达到最高值和显著水平,而在 $0.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ EBR 处理下显著低于对照;番茄果实维生素 C 含量在 0.10 和 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ EBR 处理下高于对照,并在 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ EBR 处理下达到最高值和显著水平,而在其余处理下显著低于对照;番茄果实的可溶性蛋白含量在叶面喷施 0.05 、 0.10 、 0.20 和 $0.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ EBR 后均得到显著提高,比对照分别增加了 64.1%、30.3%、43.7%、30.6%,但以 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ EBR 处理显著较高;番茄果实可溶性固形物含

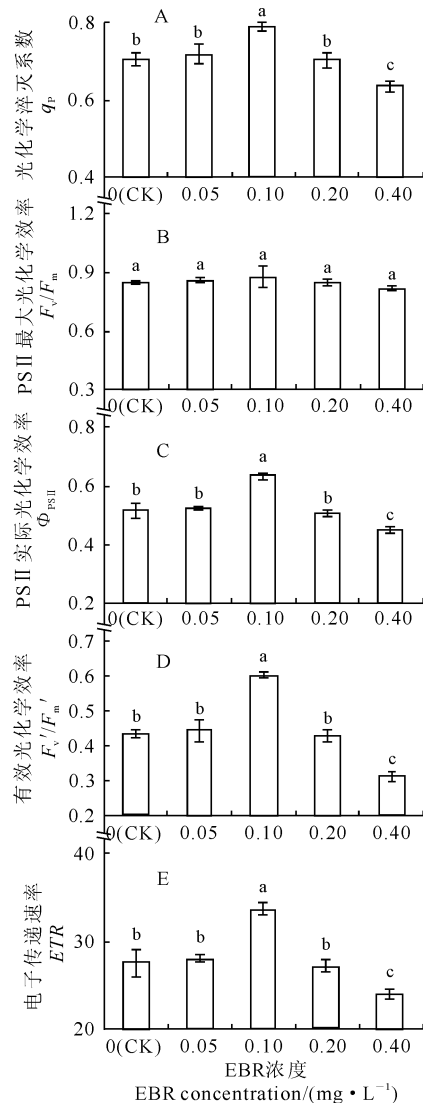


图 2 油菜素内酯处理樱桃番茄叶片叶绿素荧光参数的变化

Fig. 2 The quantum efficiency of photochemistry in leaves of cherry tomato spraying with EBR

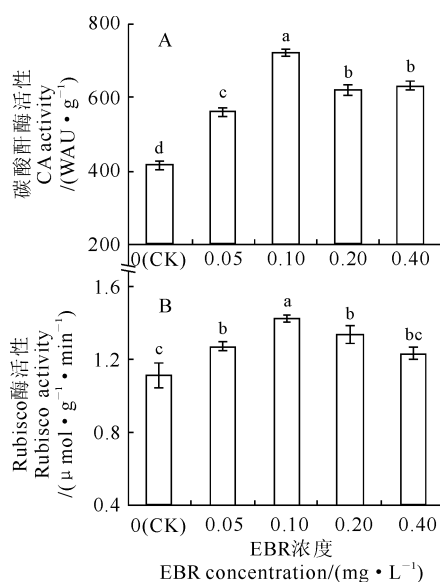


图 3 油菜素内酯处理樱桃番茄叶片碳酸酐酶和 Rubisco 酶活性的变化

Fig. 3 The activities of carbonic anhydrase and Rubisco in leaves of cherry tomato spraying with EBR

表 3 油菜素内酯处理樱桃番茄果实性状和产量构成的变化

Table 3 The fruit shape index, fruit hardness and yield of cherry tomato spraying with EBR

EBR 浓度 EBR concentration ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	横径 Transverse section diameter/mm	纵径 Vertical section diameter/mm	果形指数 Fruits shape index	果实硬度 Fruits hardness ($\times 10^5 \text{ Pa}$)	单株总产量 Yield ($\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$)	单果重 Fruits weight /g	单株果数 Fruits number ($\text{No} \cdot \text{plant}^{-1}$)
0(CK)	$2.29 \pm 0.14\text{a}$	$2.87 \pm 0.03\text{c}$	$1.25 \pm 0.07\text{ab}$	$2.55 \pm 0.18\text{a}$	$1\ 256.86 \pm 42.86\text{d}$	$9.25 \pm 0.36\text{b}$	$126.67 \pm 2.67\text{b}$
0.05	$2.55 \pm 0.05\text{a}$	$3.21 \pm 0.04\text{ab}$	$1.25 \pm 0.03\text{ab}$	$2.49 \pm 0.32\text{a}$	$1\ 446.12 \pm 74.92\text{c}$	$9.46 \pm 0.84\text{b}$	$145.67 \pm 0.33\text{ab}$
0.10	$2.44 \pm 0.12\text{a}$	$3.29 \pm 0.13\text{a}$	$1.21 \pm 0.05\text{b}$	$2.44 \pm 0.09\text{a}$	$1\ 647.63 \pm 27.17\text{a}$	$10.87 \pm 0.31\text{a}$	$159.67 \pm 1.33\text{a}$
0.20	$2.56 \pm 0.06\text{a}$	$2.94 \pm 0.07\text{b}$	$1.29 \pm 0.07\text{a}$	$2.56 \pm 0.11\text{a}$	$1\ 521.03 \pm 16.19\text{b}$	$10.02 \pm 0.35\text{ab}$	$147.33 \pm 2.03\text{ab}$
0.40	$2.35 \pm 0.07\text{a}$	$3.01 \pm 0.14\text{ab}$	$1.28 \pm 0.02\text{a}$	$2.46 \pm 0.03\text{a}$	$1\ 300.73 \pm 76.90\text{d}$	$9.27 \pm 0.81\text{b}$	$131.67 \pm 1.67\text{b}$

表 4 油菜素内酯处理樱桃番茄果实品质的变化
Table 4 The fruit quality of cherry tomato spraying with EBR

EBR 浓度 EBR concentration /(mg·L ⁻¹)	番茄红素 Lycopene /(μg·g ⁻¹)	β-胡萝卜素 Beta-carotene content /(mg·kg ⁻¹)	维生素 C Vc /(mg·kg ⁻¹)	可溶性蛋白 Soluble protein /(mg·g ⁻¹)	可溶性固形物 Soluble matter/%	可滴定酸 Organic acid/%	可溶性糖 Soluble sugar/%	糖酸比 Sugar acid ratio
0(CK)	59.09±2.07b	57.09±1.17c	102.13±1.41b	0.32±0.03c	10.9±0.05b	0.56±0.01a	3.05±0.39b	5.40±0.67b
0.05	60.59±2.05b	65.59±2.05b	83.33±3.15c	0.53±0.04a	10.53±0.15c	0.57±0.03a	3.34±0.03b	5.65±0.07b
0.10	66.41±2.04a	71.41±1.04a	114.93±3.07a	0.42±0.02b	11.33±0.08a	0.55±0.01a	4.12±0.09a	7.27±0.12a
0.20	58.72±2.07b	66.72±2.07b	106.66±5.93ab	0.46±0.03ab	11.33±0.08a	0.55±0.01a	2.92±0.19b	4.97±0.26b
0.40	43.23±1.09c	53.23±1.03d	77.33±1.99c	0.42±0.01b	11.42±0.14a	0.54±0.01a	3.03±0.03b	5.48±0.08b

量在除 0.05 mg·L⁻¹ EBR 以外的处理下分别比对照显著增加了 3.9%、4.1%、4.7%;与对照相比,番茄果实可滴定酸含量受 EBR 处理的影响不明显,其可溶性糖含量也仅在 0.10 mg·L⁻¹ EBR 处理下显著提高,从而使果实糖酸比也仅在 0.10 mg·L⁻¹ EBR 处理下较高。以上结果说明叶面喷施 EBR 能不同程度地提高樱桃番茄果实品质,其中以 0.10 mg·L⁻¹ EBR 处理效果最为明显。

3 讨 论

表油菜素内酯 (EBR) 具有促进作物生长、增加抗逆性、提高产量和品质等多种功能,在农业生产上得到广泛应用。本研究发现喷施一定浓度的 EBR (0.05~0.40 mg·L⁻¹) 能够激发醋糟基质栽培樱桃番茄的生长和发育潜力,促进醋糟基质栽培番茄的光合作用,进而提高番茄的产量和品质,其中 0.10 mg·L⁻¹ 浓度 BR 促进效应最为明显。

3.1 油菜素内酯对樱桃番茄叶片光合气体交换参数的影响

EBR 能够显著提高许多植物的光合作用,并可通过调节气孔和非气孔因素来促进光合效率。Fariduddin^[17]发现 EBR 能够显著提高芥菜的 C_i 和 G_s,促进光合作用;胡文海^[18]在黄瓜上的研究发现,EBR 能够提高 G_s,而对 C_i 无显著影响,并不能通过减少气孔限制来提高光合作用效率。这些研究表明 EBR 对光合作用气孔因素的调节因作物种类、施用方式、浓度等的不同而有所差异。本试验中,喷施 0.10 mg·L⁻¹ EBR 显著提高番茄 P_n,而对番茄叶片 C_i 和 G_s 无显著影响,说明 EBR 并非通过调节气孔因素来提高光合效率,而是可能通过调节非气孔因素来提高醋糟基质栽培番茄的光合作用。这与 Ogwenon^[19]在番茄上的研究结果一致。

3.2 油菜素内酯对樱桃番茄叶片叶绿素含量影响

叶绿素参与光合作用中光能的吸收、传递和转

化,其含量的高低直接影响着植物的光合作用进程^[20]。EBR 可以通过影响叶绿素含量从而调节光合作用。Hayat^[21]在番茄的研究中发现 EBR 能显著提高叶绿素含量,而 Yu^[22]研究表明喷施 EBR 对黄瓜叶绿素含量无显著影响,说明 EBR 对于叶绿素含量影响的不同可能与植物种类、施用的 EBR 种类、浓度和施用方式等的差异有关。本试验结果发现 0.05 和 0.40 mg·L⁻¹ 的 EBR 对樱桃番茄叶片叶绿素含量无显著影响,而 0.10 mg·L⁻¹ EBR 显著提高了叶绿素含量。研究认为 EBR 可以通过调节叶绿素合成和降解过程中的关键酶来影响叶绿素的含量;EBR 还可以通过调节聚光色素复合体附着蛋白的表达以影响叶绿素含量的变化^[23]。因此,0.10 mg·L⁻¹ EBR 显著提高番茄叶绿素的含量可能与上述原因紧密相关,然而其具体的机制还需进一步研究。

3.3 油菜素内酯对樱桃番茄叶片叶绿素荧光参数的影响

F_v/F_m 、 q_p 、 F_v'/F_m' 、 ETR 和 Φ_{PSII} 分别反映 PS II 最大光化学效率、光化学猝灭、有效光化学效率、电子传递速率和 PS II 实际光化学效率^[24]。醋糟基质栽培条件下 EBR 显著提高 q_p 、 F_v'/F_m' 、 ETR 和 Φ_{PSII} ,而对 F_v/F_m 无显著影响,这与 Xia 等^[6]在黄瓜叶片上的结果相近。 q_p 值的大小可以反映 PS II 开放中心的比例,EBR 可以通过增加反应中心的开放程度,使进入反应中心的光能更多地用于光化学反应,并最终用于碳同化。 Φ_{PSII} 的大小与 PS II 反应中心的开放程度和电子传递能力有关^[25-26]。因此 EBR 处理下番茄光化学效率的提高可以归结为以下两方面原因,一方面通过提高羧化能力,增加对非循环电子传递 ATP 和 NADPH 的需求,天线色素吸收的光能更多地用于光化学反应,导致 q_p 的增加^[6],从而提高 Φ_{PSII} ;另外,EBR 也可直接作用于光合电子传递链本身,提高 ETR ,进而增强番茄叶片

光合效能。

3.4 油菜素内酯对樱桃番茄叶片碳酸酐酶和 Rubisco 酶活性的影响

碳酸酐酶(CA)参与催化 CO_2 和 HCO_3^- 之间的相互转化反应,降低 CO_2 在叶肉细胞中的扩散阻力,促进 CO_2 向 Rubisco 扩散,为羧化反应提供底物^[27]。本试验中,EBR 显著提高 CA 的活性,这与 Hayat 等^[28]的研究结果相一致。研究认为 EBR 可以通过调节 CA 转录和翻译过程从而促进 CA 活性的上升。Rubisco 是卡尔文循环的关键酶和重要的限速因子,参与碳同化中 CO_2 的固定,对植物光合速率起重要作用^[29]。Xia 等^[6]在黄瓜上的研究发现,EBR 可以提高 Rubisco 大亚基和小亚基 mRNA 和蛋白表达丰度,从而提高 Rubisco 酶活性,本试验中,Rubisco 酶活性的上升也可能与 EBR 参与酶翻译和转录过程有关。因此,醋糟栽培条件下 EBR 可以通过提高 CA 和 Rubisco 的活性来促进碳同化的进行,从而增加光合产物的积累。

3.5 油菜素内酯对樱桃番茄产量和果实品质影响

EBR 能够显著提高番茄^[3]、辣椒^[30]、黄瓜^[31]等作物的产量和品质。研究认为,EBR 可通过促进果实细胞分裂、增加细胞数量,促进器官的横向生长和纵向生长,使果实增大、重量增加^[32]。作物的结果能力与作物保留的花数和坐果率密切相关,EBR 可以延缓植物衰老^[33],减少花朵脱落,增加植物有效花朵数量^[3]。由于 EBR 延缓效应使叶片合成的同化物能更多地输送到果实^[34],另外由于 EBR 还可以增强光合作用以及促进同化物的运送^[35],不仅有助于提高单果重,也增加了果实数量。本研究结果表明,在樱桃番茄开花前 10 d 喷施不同浓度的

EBR,樱桃番茄果实的纵径、横径、单株总产量、单果重和单株果数显著增加,即 EBR 通过提高番茄单果重和坐果数来提高番茄的产量。

番茄红素、 β -胡萝卜素、适宜的糖度、酸度和可溶性固形物含量是构成番茄果实营养品质与风味品质的重要指标。本试验中,相对较低浓度的 EBR ($0.05 \sim 0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)处理可显著提高果实番茄红素和 β -胡萝卜素含量,而较高浓度的 EBR ($0.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)则抑制其积累,这与 Hayat 等^[21]的研究结果类似。果实成熟过程中往往伴随着叶绿素的降解和番茄红素、 β -胡萝卜素等类胡萝卜素的积累,主要由于 EBR 可以促进乙烯的合成^[36],从而激活类胡萝卜素相关合成酶基因的表达,进而促进番茄红素和胡萝卜素积累^[37]。本研究表明,喷施 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ EBR 显著提高番茄果实 Vc 含量、可溶性固形物含量、可溶性糖含量和糖酸比,而对可滴定酸含量无显著影响。番茄最佳风味的形成需要较高的糖度和相对较高的酸度,适宜的糖酸比能增加商品的风味品质与商品品质。EBR 可以通过促进光合作用,增强了源的供给能力,有助于促进果实内糖分积累^[36]。本试验中,EBR 对可滴定酸含量的影响较小,糖酸比的增加主要源于糖含量的提高。

综上所述,喷施一定浓度的 EBR ($0.05 \sim 0.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)可以通过促进番茄叶绿素合成、提高 Φ_{PSII} 光化学效率、激活碳酸酐酶和 Rubisco 酶活性等非气孔因素,提高番茄的光合作用能力,促进光合产物向果实运输,从而提高醋糟基质栽培番茄的产量和品质,其中以 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 EBR 在促进番茄植株光合效率、提高产量和品质上的作用效果最为明显。

参考文献:

- [1] KRISHNA P. Brassinosteroid-mediated stress responses[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2003, **22**(4): 289—297.
- [2] HAYAT S, ALI B, HASAN S. Brassinosteroid enhanced the level of antioxidants under cadmium stress in *Brassica juncea* [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, **60**(1): 33—41.
- [3] ALI B, HAYAT S, HASAN S. Effect of root applied 28-homobrassinolide on the performance of *Lycopersicon esculentum* [J]. *Scientia Horticulturae*, 2006, **110**(3): 267—273.
- [4] CHOUDHARY S P, YU J Q, YAMAGUCHI-SHINOZAKI K. Benefits of brassinosteroid crosstalk[J]. *Trends in Plant Science*, 2012, **17**(10): 594—605.
- [5] DIVI U K, KRISHNA P. Brassinosteroid: a biotechnological target for enhancing crop yield and stress tolerance[J]. *New Biotechnology*, 2009, **26**: 131—136.
- [6] XIA X J, HUANG L F, ZHOU Y H. Brassinosteroids promote photosynthesis and growth by enhancing activation of Rubisco and expression of photosynthetic genes in *Cucumis sativus* [J]. *Planta*, 2009, **230**(6): 1 185—1 196.
- [7] ZHANG W (张 惟), LIU Y X (刘亦学), YANG X R (杨秀荣), et al. Effect of brassinolides as on yield and quality of tomato [J]. *Tianjin Agricultural Sciences* (天津农业学报), 2004, **10**(2): 23—25 (in Chinese).
- [8] LIU CH J (刘超杰), GUO SH R (郭世荣), WANG CH Y (王长义), et al. Vinegar residue substrate as component of mixed substrate for pepper seedling growth [J]. *Acta Horticulturae Sinica* (园艺学报), 2010, **37**(4): 559—566 (in Chinese).

- [9] SONG X X(宋夏夏), SHU SH(束 胜), GUO SH R(郭世荣), *et al.* Effects of vinegar residue mixed substrates on growth and yield of mini-cucumber[J]. *Journal of Changjiang Vegetables* (长江蔬菜), 2013, 10: 30—34 (in Chinese).
- [10] CHEN X B(陈新斌), SUN J(孙 锦), GUO SH R(郭世荣), *et al.* Effects of the dithiothreitol on activate oxygen metabolism and chlorophyll fluorescences in spinach leaves under seawater stress[J]. *Acta Horticulturae Sinica* (园艺学报), 2012, **39**(12): 2 457—2 467 (in Chinese).
- [11] LI X T(李西腾), ZHAO X ZH(赵新政), QUE X F(阙小峰), *et al.* Effect of salt stress on rape carbonic anhydrase[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research* (农机化研究), 2006, 8: 134—136 (in Chinese).
- [12] 王 盾. Rubisco 活化酶大小同工型与水稻光合作用的关系研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [13] HU X B(胡晓波), WEN H L(温辉梁), XU Q(许 全), *et al.* Determination of lycopene's content[J]. *Food Science* (食品科学), 2005, 9: 548—551 (in Chinese).
- [14] ZHAO N(赵 楠), LI Y Y(李勇勇), SHAO M F(邵明飞), *et al.* The optimization of method for determination of β -carotene from spirulina powder[J]. *Journal of Heze University* (菏泽师专学报), 2012, (5): 30—34 (in Chinese).
- [15] TIAN J L(田吉林), YANG Y A(杨玉爱), HE Y K(何玉科). Salt tolerance of transgenic tomato with *HAL1* gene[J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology* (植物生理与分子生物学学报), 2003, **29**(5): 409—414 (in Chinese).
- [16] LI N(李 宁), WANG M Y(王美月), SUN J(孙 锦), *et al.* Effects of exogenous 24-epibrassinolide on growth and photosynthesis of tomato seedlings under low light stress[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2013, **33**(7): 1 395—1 402 (in Chinese).
- [17] FARIDUDDIN Q, YUSUF M, HAYAT S. Effect of 28-homobrassinolide on antioxidant capacity and photosynthesis in *Brassica juncea* plants exposed to different levels of copper[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, **66**(3): 418—424.
- [18] HU W H(胡文海), HUANG L F(黄黎锋), MAO W H(毛伟华), *et al.* Role of brassinosteroids in the regulation of photosynthetic apparatus in cucumber leaves[J]. *Acta Horticulturae Sinica* (园艺学报), 2006, **33**(4): 762—766 (in Chinese).
- [19] OGWENO J O, SONG X SH, SHI K, *et al.* Brassinosteroids alleviate heat-induced inhibition of photosynthesis by increasing carboxylation efficiency and enhancing antioxidant systems in *Lycopersicon esculentum*[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2008, **27**(1): 49—57.
- [20] CHEN X B(陈新斌), SUN J(孙 锦), GUO SH R(郭世荣), *et al.* Chlorophyll metabolism of spinach leaves under seawater stress[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2012, **32**(9): 1 781—1 787 (in Chinese).
- [21] HAYAT S, ALYEMENI M N, HASAN S A. Foliar spray of brassinosteroid enhances yield and quality of *Solanum lycopersicum* under cadmium stress[J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2012, **19**(3): 325—335.
- [22] YU J Q, HUANG L F, HU W H. A role for brassinosteroids in the regulation of photosynthesis in *Cucumis sativus*[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004, **55**(399): 1 135—1 143.
- [23] HASAN S A, HAYAT S, AHMAD A. Brassinosteroids protect photosynthetic machinery against the cadmium induced oxidative stress in two tomato cultivars[J]. *Chemosphere*, 2011, **84**(10): 1 446—1 451.
- [24] ZHANG SH R(张守仁). A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance[J]. *Chinese Bulletin of Botany* (植物学通报), 1999, **16**(4): 444—448 (in Chinese).
- [25] YUET P K. A simulation study of electrostatic effects on mixed ionic micelles confined between two parallel charged plates[J]. *Langmuir; the ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 2004, **20**(19): 7 960—7 971.
- [26] MAXWELL K, JOHNSON G N. Chlorophyll fluorescence—a practical guide[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2000, **51**(345): 659—668.
- [27] TIWARI A, KUMAR P, SINGH S. Carbonic anhydrase in relation to higher plants[J]. *Photosynthetica*, 2005, **43**(1): 1—11.
- [28] HAYAT S, YADAV S, WANI A S. Comparative effect of 28-homobrassinolide and 24-epibrassinolide on the growth, carbonic anhydrase activity and photosynthetic efficiency of *Lycopersicon esculentum*[J]. *Photosynthetica*, 2011, **49**(3): 397—404.
- [29] PARRY M A J, MADGWICK P J, CARVALHO J F C. Prospects for increasing photosynthesis by overcoming the limitations of Rubisco[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2007, 145: 31—43.
- [30] SERNA M, HERNANDEZ F, COLL F. Brassinosteroid analogues effects on the yield and quality parameters of greenhouse-grown pepper (*Capsicum annum* L.)[J]. *Plant Growth Regulation*, 2012, **68**(3): 333—342.
- [31] FU F Q, MAO W H, SHI K. A role of brassinosteroids in early fruit development in cucumber[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2008, **59**(9): 2 299—2 308.
- [32] CLOUSE S D, SASSE J M. Brassinosteroids; Essential regulators of plant growth and development[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1998, 49: 427—451.
- [33] IWAHORI S, TOMINAGA S, HIGUCHI S. Retardation of abscission of *Citrus* leaf and fruitlet explants by brassinolide[J]. *Plant Growth Regulation*, 1990, **9**(2): 119—125.
- [34] HAYAT S, AHMAD A, MOBIN M. Photosynthetic rate, growth, and yield of mustard plants sprayed with 28-homobrassinolide[J]. *Photosynthetica*, 2000, **38**(3): 469—471.
- [35] FUJII S, SAKA H. Distribution of assimilates to each organ in rice plants exposed to a low temperature at the ripening stage, and the effect of brassinolide on the distribution[J]. *Plant Production Science*, 2001, **4**(2): 136—144.
- [36] VARDHINI B V, RAO S S R. Acceleration of ripening of tomato pericarp discs by brassinosteroids[J]. *Phytochemistry*, 2002, **61**(7): 843—847.
- [37] GIOVANNONI J. Molecular biology of fruit maturation and ripening[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 2001, 52: 725—749.