

doi: 10.19928/j.cnki.1000-6346.2023.2032

# 外源 EBR 与 ALA 对高温胁迫下辣椒幼苗生长的影响

张文霞 陈 汉 胡佳未 黄 科 王军伟\*

(湖南农业大学园艺学院, 蔬菜生物学湖南省重点实验室, 园艺作物种质创新与新品种选育教育部工程研究中心, 农业农村部园艺作物(蔬菜、茶叶等)基因资源评价利用重点实验室, 湖南农业大学黄埔创新研究院, 湖南长沙 410128)

**摘 要:** 为探究外源 EBR 和 ALA 对高温胁迫下越夏辣椒幼苗生长的影响, 以博辣红牛和长研青香 2 个辣椒品种为试材, 喷施不同浓度的 EBR (0.001、0.01、0.1、1.0 mg · L<sup>-1</sup>) 与 ALA (15、30、45、60 mg · L<sup>-1</sup>)。结果表明: 外源 EBR 和 ALA 均能不同程度地提升幼苗抵御高温逆境的能力, 喷施不同浓度的 EBR 和 ALA 后, 辣椒幼苗株高、茎粗、干鲜质量、壮苗指数等生长指标均呈上升趋势, 抗氧化酶 SOD、POD、CAT 活性增强, MDA 含量降低, 脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白含量增加, NR、NiR、GS 等氮代谢关键酶活性显著提升, 且以 0.01 mg · L<sup>-1</sup> EBR 和 45 mg · L<sup>-1</sup> ALA 处理缓解高温胁迫效果最好。

**关键词:** 高温胁迫; 辣椒幼苗; 2, 4-表油菜素内酯 (EBR); 5-氨基乙酰丙酸 (ALA); 植物生长调节剂

辣椒 (*Capsicum annuum* L.) 属于茄科辣椒属, VC 含量在蔬菜中居首位 (赵书恒 等, 2022), 深受消费者喜爱。中国辣椒的年种植面积稳定在 210 万 hm<sup>2</sup> 以上, 种植面积和消费量均位居蔬菜之首, 在蔬菜周年供应中处于重要地位 (王立浩 等, 2021; 邹学校 等, 2022)。为了保障辣椒的周年供应, 各地大力发展春提早、秋延后等设施栽培 (周立杰, 2018; 戴雄泽, 2021)。高温强光环境容易导致辣椒幼苗徒长、品质下降, 对生产造成不利影响。现有的抗高温胁迫方式如采用降温设施、增加 CO<sub>2</sub> 浓度等成本过高 (Pereyda-González et al., 2022; Preet et al., 2022)。相比之下, 施用外源植物生长调节物质缓解高温强光具有操作简便、成本低和省事省力等优点 (刘宏运 等, 2023)。2, 4-

表油菜素内酯 (EBR) 被公认为第六大植物激素, 在诱导细胞生长、促进作物生长、增加产量的同时还能增强植株对寒、涝、旱等逆境的抵抗能力, 在植物高低温胁迫条件下调控各种生理过程 (叶巧玲 等, 2022)。5-氨基乙酰丙酸 (ALA) 是一种广泛存在于植物、动物、真菌及细菌等生物机体活细胞中的非蛋白氨基酸, 是所有卟啉类化合物生物合成的关键前体, 具有提高植物非生物胁迫耐受性的潜力 (Krishna et al., 2020)。这两类生长激素在逆境胁迫下可调控植物生理变化, 有效缓解逆境对植物造成的伤害。

随着全球“温室效应”的加剧, 蔬菜越夏育苗遭遇高温胁迫更加频繁, 研究施用外源植物生长调节物质缓解高温强光对辣椒育苗的影响具有重要意义。本试验以博辣红牛、长研青香为试材, 研究不同浓度外源 EBR 与 ALA 对越夏辣椒幼苗生长、抗氧化酶活性、渗透调节物质含量、氮代谢关键酶等指标的影响, 以筛选辣椒幼苗的最适外源 EBR 与 ALA 浓度, 旨在探究外源 EBR 与 ALA 缓解高温强光胁迫的生理机制, 并为其在辣椒育苗生产上的广泛应用提供理论基础。

张文霞, 女, 硕士研究生, 主要从事设施园艺栽培生理研究, E-mail: 2574272943@qq.com

\* 通信作者 (Corresponding author): 王军伟, 男, 副教授, 主要从事设施园艺栽培生理研究工作, E-mail: JunweiWang87@126.com

收稿日期: 2022-11-07; 接受日期: 2023-03-02

基金项目: 湖南省重点研发计划项目 (2021NK2006), 湖南省现代农业 (蔬菜) 产业技术体系项目, 湖南农业大学黄埔创新研究院项目

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与设计

试验于2021年7—8月在湖南省长沙市湖南农业大学教学基地智能温室内进行,基地属亚热带季风性湿润气候。越夏期间智能温室白天温度30~35℃,夜间20~25℃;晴朗天气光照强度为30 000~50 000 lx,阴雨天气为0~20 000 lx。

供试辣椒品种博辣红牛购于湖南兴蔬种业有限公司,长研青香购自长沙春润种业有限公司。EBR和ALA均来源于索莱宝生物科技有限公司。

辣椒进行漂浮育苗,于7月20日采用120孔漂浮盘在育苗池内播种。待幼苗长到两叶一心时,将清水换成霍格兰氏营养液,EC值控制在0.5 mS·cm<sup>-1</sup>,并对幼苗叶片进行喷施外源EBR与ALA处理,分别设置4个浓度梯度:EBR为0.001、0.01、0.1、1.0 mg·L<sup>-1</sup>,ALA为15、30、45、60 mg·L<sup>-1</sup>,均以喷施清水为对照(CK)。每个处理3次重复,每个重复1盘幼苗(120株),每盘每次喷施200 mL,2 d喷施1次,共喷施10次,于8月18日进行取样测定。

### 1.2 测定项目与方法

光照强度与温度:采用精创RC-5温度检测仪监测室外温度(测量范围-20~40℃,精度±0.5℃,分辨率0.1℃,每次测量间隔10 min),采用拓普云农科农业气象检测仪监测温室光照强度(测量范围0~200 000 lx,精度±2%,分辨率1 lx)。

幼苗形态指标:采用直尺测量幼苗茎基部到生长点的高度作为株高;用电动游标卡尺测量茎粗;采用百分之一电子天平测定幼苗鲜质量,千分之一电子天平测定幼苗根部、地上部和全株干质量,并计算壮苗指数。壮苗指数=(茎粗/株高+根干质量/地上部干质量)×全株干质量。

膜脂过氧化与抗氧化系统指标:采用北京索莱宝科技有限公司生产的丙二醛(MDA)测定试剂盒、超氧化物歧化酶(SOD)测定试剂盒、过氧化物酶(POD)测定试剂盒、过氧化氢酶(CAT)测定试剂盒分别测定MDA、SOD、POD、CAT活性。

渗透调节物质含量:采用北京索莱宝科技有限公司生产的脯氨酸含量检测试剂盒测定脯氨酸含量。参照上海苗彩生物科技有限公司生产的植物可

溶性糖检测试剂盒、BCA蛋白含量检测试剂盒分别测定可溶性糖、可溶性蛋白含量。

氮代谢关键酶活性:采用北京索莱宝科技有限公司生产的NR活性检测试剂盒、GS活性检测试剂盒分别测定硝酸还原酶(NR)、谷氨酰胺合成酶(GS)活性,参照上海苗彩生物科技有限公司生产的NIR活性检测试剂盒测定亚硝酸还原酶(NiR)活性。各指标测定均为生物学3次重复。

### 1.3 数据分析

采用SPSS 17.0软件进行方差分析,采用Duncan检验法进行多重比较和差异显著性分析,采用Microsoft Excel 2010与Graphpad 8.3.0软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 外源EBR与ALA对越夏辣椒幼苗形态指标的影响

由表1可知,外源喷施EBR、ALA可不同程度地促进越夏辣椒幼苗的生长,但各品种的株高、茎粗、干鲜质量、壮苗指数对EBR、ALA不同浓度的响应存在差异。对于博辣红牛,与CK相比,喷施EBR后各处理均提升了幼苗茎粗、干质量和壮苗指数,但均未达到显著差异水平;喷施ALA后各处理幼苗的鲜干质量和壮苗指数均显著提高,其中45 mg·L<sup>-1</sup>ALA处理效果最好。对于长研青香,与CK相比,喷施EBR后各处理均不同程度地提高了幼苗形态指标,但干质量、壮苗指数均与对照差异不显著;喷施ALA后各处理的幼苗形态指标均显著增加,各浓度处理间差异不显著。

### 2.2 外源EBR与ALA对越夏辣椒幼苗缓解氧化损伤的影响

由表2可知,随着外源EBR浓度的增加,博辣红牛辣椒幼苗的MDA含量在0.01 mg·L<sup>-1</sup> EBR处理下最低,0.1 mg·L<sup>-1</sup> EBR处理下最高;长研青香辣椒幼苗MDA含量呈先升高后降低的趋势,且1.0、0.01、0.001 mg·L<sup>-1</sup> EBR处理均低于CK;两个辣椒品种幼苗SOD、POD、CAT活性均呈先升高后降低的趋势,且0.01 mg·L<sup>-1</sup> EBR处理的博辣红牛辣椒幼苗SOD、POD、CAT活性与0.1 mg·L<sup>-1</sup> EBR处理的长研青香辣椒幼苗SOD活性显著高于CK与其他处理、POP和CAT活性显著高于CK。

随着外源喷施ALA浓度的增加,两个辣椒品

表 1 外源 EBR、ALA 对越夏辣椒幼苗形态指标的影响

| 品种   | 处理      | 浓度/mg · L <sup>-1</sup> | 株高/cm          | 茎粗/mm          | 鲜质量/g          | 干质量/g          | 壮苗指数             |                 |
|------|---------|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|-----------------|
| 博辣红牛 | 清水 (CK) | 0                       | 20.8 ± 1.04 a  | 3.00 ± 0.16 b  | 4.69 ± 0.14 bc | 0.43 ± 0.01 a  | 0.199 ± 0.012 a  |                 |
|      |         | EBR                     | 0.001          | 21.9 ± 0.69 a  | 3.31 ± 0.10 ab | 4.37 ± 0.12 c  | 0.46 ± 0.02 a    | 0.215 ± 0.013 a |
|      |         | 0.01                    | 23.3 ± 1.15 a  | 3.53 ± 0.27 a  | 5.39 ± 0.21 a  | 0.49 ± 0.02 a  | 0.234 ± 0.018 a  |                 |
|      |         | 0.1                     | 20.3 ± 0.69 a  | 3.40 ± 0.06 ab | 5.10 ± 0.27 ab | 0.47 ± 0.01 a  | 0.232 ± 0.010 a  |                 |
|      |         | 1.0                     | 22.8 ± 1.07 a  | 3.19 ± 0.07 ab | 4.50 ± 0.22 bc | 0.44 ± 0.03 a  | 0.201 ± 0.013 a  |                 |
|      | ALA     | 0                       | 20.8 ± 1.04 c  | 3.00 ± 0.16 c  | 4.69 ± 0.14 d  | 0.43 ± 0.01 d  | 0.199 ± 0.009 d  |                 |
|      |         | 15                      | 23.3 ± 0.75 bc | 3.48 ± 0.16 ab | 5.89 ± 0.18 c  | 0.59 ± 0.02 c  | 0.275 ± 0.017 c  |                 |
|      |         | 30                      | 25.9 ± 0.69 ab | 3.24 ± 0.12 bc | 6.43 ± 0.38 bc | 0.65 ± 0.04 c  | 0.290 ± 0.029 bc |                 |
|      |         | 45                      | 27.3 ± 1.01 a  | 3.61 ± 0.11 ab | 7.47 ± 0.38 a  | 0.82 ± 0.04 a  | 0.371 ± 0.029 a  |                 |
|      |         | 60                      | 27.7 ± 0.92 a  | 3.77 ± 0.84 ab | 7.11 ± 0.29 ab | 0.72 ± 0.04 ab | 0.329 ± 0.038 ab |                 |
| 长研青香 | 清水 (CK) | 0                       | 19.7 ± 0.87 c  | 2.57 ± 0.08 a  | 3.92 ± 0.31 b  | 0.44 ± 0.02 a  | 0.200 ± 0.005 a  |                 |
|      |         | EBR                     | 0.001          | 26.4 ± 0.64 a  | 3.34 ± 0.17 a  | 5.93 ± 0.13 a  | 0.52 ± 0.02 a    | 0.232 ± 0.013 a |
|      |         | 0.01                    | 21.3 ± 1.13 bc | 3.14 ± 0.11 ab | 5.39 ± 0.43 a  | 0.47 ± 0.03 a  | 0.222 ± 0.015 a  |                 |
|      |         | 0.1                     | 19.7 ± 1.30 c  | 2.81 ± 0.13 bc | 4.92 ± 0.36 b  | 0.44 ± 0.02 a  | 0.205 ± 0.016 a  |                 |
|      |         | 1.0                     | 23.6 ± 0.97 ab | 2.90 ± 0.12 bc | 5.37 ± 0.38 a  | 0.52 ± 0.05 a  | 0.229 ± 0.018 a  |                 |
|      | ALA     | 0                       | 19.7 ± 0.87 c  | 2.57 ± 0.08 b  | 3.92 ± 0.31 b  | 0.44 ± 0.02 b  | 0.200 ± 0.005 b  |                 |
|      |         | 15                      | 23.9 ± 1.18 b  | 3.24 ± 0.18 a  | 6.31 ± 0.37 a  | 0.61 ± 0.05 a  | 0.276 ± 0.024 a  |                 |
|      |         | 30                      | 26.5 ± 0.81 ab | 3.26 ± 0.14 a  | 6.56 ± 0.38 a  | 0.66 ± 0.02 a  | 0.292 ± 0.013 a  |                 |
|      |         | 45                      | 25.7 ± 1.36 ab | 3.30 ± 0.11 a  | 6.33 ± 0.20 a  | 0.60 ± 0.03 a  | 0.271 ± 0.012 a  |                 |
|      |         | 60                      | 28.3 ± 0.95 a  | 3.27 ± 0.12 a  | 6.98 ± 0.32 a  | 0.72 ± 0.03 a  | 0.314 ± 0.021 a  |                 |

注: 表中同列数据后不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下表同。

表 2 外源 EBR 与 ALA 对越夏辣椒幼苗缓解氧化损伤的影响

| 品种   | 处理      | 浓度/mg · L <sup>-1</sup> | MDA/nmol · g <sup>-1</sup> | SOD/U · g <sup>-1</sup> | POD/U · g <sup>-1</sup> | CAT/U · g <sup>-1</sup> |                    |
|------|---------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|
| 博辣红牛 | 清水 (CK) | 0                       | 156.910 ± 13.96 ab         | 58.631 ± 1.17 e         | 135.085 ± 4.01 e        | 87.370 ± 5.50 c         |                    |
|      |         | EBR                     | 0.001                      | 131.877 ± 7.47 ab       | 92.919 ± 5.85 c         | 275.690 ± 89.03 d       | 318.416 ± 105.15 b |
|      |         | 0.01                    | 97.930 ± 8.19 b            | 124.478 ± 1.73 a        | 810.432 ± 46.43 a       | 479.673 ± 13.06 a       |                    |
|      |         | 0.1                     | 185.968 ± 75.12 a          | 111.707 ± 2.32 b        | 569.555 ± 47.82 b       | 222.107 ± 13.54 b       |                    |
|      |         | 1.0                     | 102.932 ± 2.46 b           | 75.646 ± 4.77 d         | 409.423 ± 24.69 c       | 261.965 ± 125.98 b      |                    |
|      | ALA     | 0                       | 156.910 ± 13.96 a          | 58.631 ± 1.17 c         | 135.085 ± 4.01 d        | 87.370 ± 5.50 d         |                    |
|      |         | 15                      | 166.607 ± 44.65 a          | 52.350 ± 1.59 d         | 274.851 ± 35.11 c       | 96.080 ± 2.86 d         |                    |
|      |         | 30                      | 105.132 ± 16.89 bc         | 113.527 ± 2.39 a        | 429.570 ± 44.37 b       | 156.462 ± 13.98 b       |                    |
|      |         | 45                      | 76.398 ± 16.96 c           | 94.185 ± 1.43 b         | 607.960 ± 45.08 a       | 224.471 ± 12.01 a       |                    |
|      |         | 60                      | 130.021 ± 14.49 ab         | 53.892 ± 1.37 d         | 316.188 ± 88.15 c       | 118.156 ± 13.89 c       |                    |
| 长研青香 | 清水 (CK) | 0                       | 152.397 ± 7.20 ab          | 50.676 ± 1.60 e         | 113.452 ± 7.17 c        | 35.930 ± 22.86 c        |                    |
|      |         | EBR                     | 0.001                      | 122.121 ± 4.05 c        | 60.973 ± 1.34 d         | 315.542 ± 93.9 b        | 116.071 ± 14.04 b  |
|      |         | 0.01                    | 126.335 ± 28.05 bc         | 99.307 ± 3.03 b         | 545.378 ± 58.23 a       | 197.411 ± 11.85 a       |                    |
|      |         | 0.10                    | 165.106 ± 16.66 a          | 152.790 ± 2.80 a        | 614.425 ± 71.37 a       | 137.377 ± 1.89 b        |                    |
|      |         | 1.0                     | 104.521 ± 5.59 c           | 66.427 ± 1.25 c         | 289.031 ± 41.84 b       | 142.165 ± 28.2 b        |                    |
|      | ALA     | 0                       | 152.397 ± 7.20 a           | 50.676 ± 1.60 e         | 113.452 ± 7.17 c        | 35.930 ± 22.86 c        |                    |
|      |         | 15                      | 146.865 ± 8.40 a           | 70.942 ± 1.92 d         | 411.209 ± 90.03 b       | 162.437 ± 31.3 b        |                    |
|      |         | 30                      | 139.563 ± 47.45 a          | 118.309 ± 2.07 a        | 614.578 ± 63.80 a       | 187.521 ± 61.10 b       |                    |
|      |         | 45                      | 93.695 ± 17.00 b           | 104.032 ± 2.47 b        | 728.194 ± 61.53 a       | 302.477 ± 8.60 a        |                    |
|      |         | 60                      | 158.844 ± 3.33 a           | 89.132 ± 3.62 c         | 436.236 ± 100.03 b      | 175.392 ± 18.88 b       |                    |

种的 MDA 含量呈先降低后升高的趋势, SOD、POD、CAT 活性呈先升高后降低的趋势; 且以 45 mg · L<sup>-1</sup> ALA 处理下 MDA 含量最低, POD、CAT 活性最高, 均与 CK 差异显著, 而 SOD 活性也显著高于 CK。

### 2.3 外源 EBR 与 ALA 对越夏辣椒幼苗渗透调节物质含量的影响

2.3.1 外源 EBR 与 ALA 对越夏辣椒幼苗脯氨酸含量的影响 由图 1 可知, 与 CK 相比, 外源喷施不同浓度的 EBR 和 ALA 后, 总体上提高了越夏辣椒

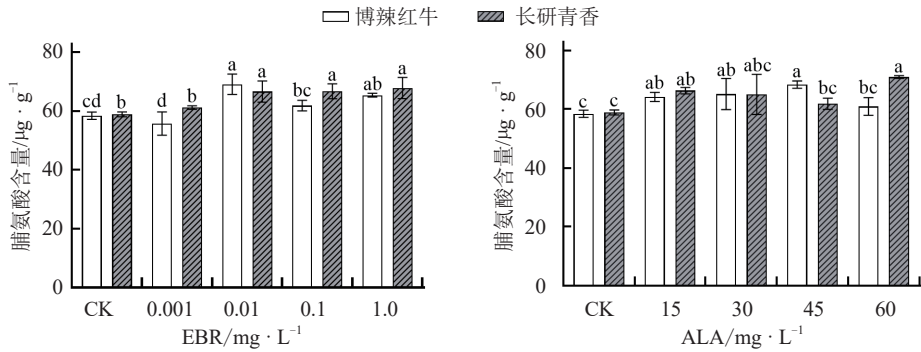


图1 外源 EBR 与 ALA 对越夏辣椒幼苗脯氨酸含量的影响  
同一品种图柱上不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下图同。

幼苗脯氨酸 (Pro) 含量。

随着 EBR 浓度的增加, 博辣红牛辣椒幼苗 Pro 含量在 0.01、1.0  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  处理下均显著高于 CK, 且以 0.01  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  处理的含量最高; 长研青香辣椒幼苗 Pro 含量在 0.01、0.1、1.0  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  处理下均显著高于 CK 和 0.001  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  处理, 但三者之间差异不显著。

随着 ALA 浓度的增加, 博辣红牛辣椒幼苗 Pro 含量呈先升高后降低的趋势, 且以 45  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  处理下的 Pro 含量最高, 显著高于 CK 和 60  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  处理; 长研青香辣椒幼苗在 15、60  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  处理下的 Pro 含量均显著高于 CK, 而在 30、45  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  处理下 Pro 含量与对照无显著差异。

2.3.2 外源 EBR 与 ALA 对越夏辣椒幼苗可溶性糖、可溶性蛋白含量的影响 由图 2 可知, 与清水对照相比, 外源喷施不同浓度的 EBR 和 ALA 后, 除博辣红牛的 0.001、1.0  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  EBR 处理可溶性蛋白含量略低于 CK 外, 两个品种的幼苗可溶性糖、可溶性蛋白含量均增加, 且随着处理浓度的增加呈先升高后降低的趋势。博辣红牛辣椒幼苗在 0.01、0.1  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  EBR 处理下的可溶性糖含量均显著高于 CK, 0.01  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  EBR 处理下的可溶性蛋白含量显著高于 CK 和其他处理; 长研青香辣椒幼苗在 0.01、0.1  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  EBR 处理下的可溶性糖、可溶性蛋白含量均显著高于 CK, 且两个浓度处理之间差异不显著。博辣红牛辣椒幼苗在 45  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  ALA

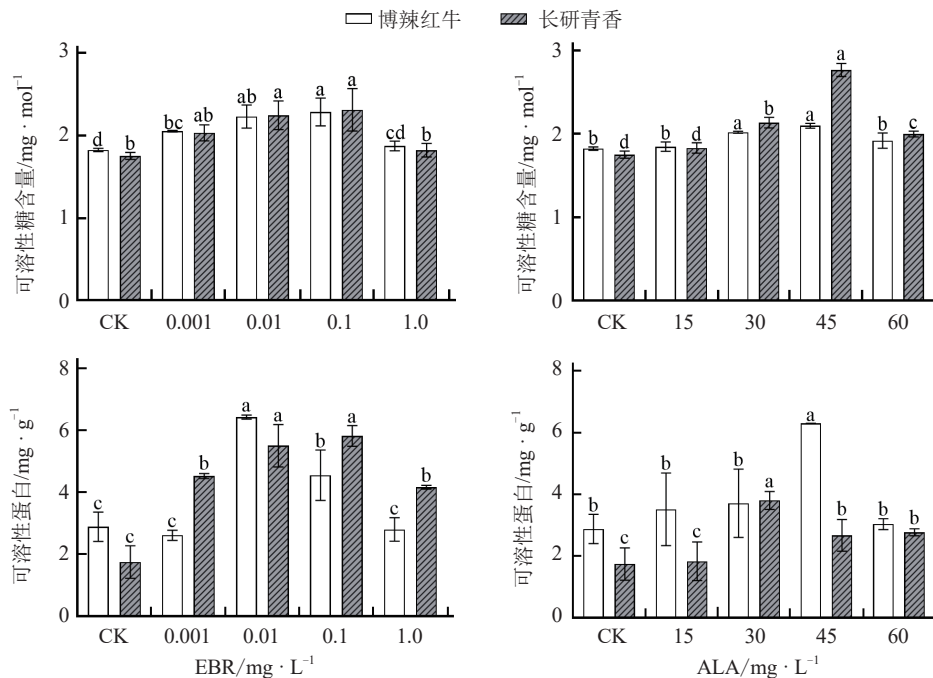


图2 外源 EBR 与 ALA 对越夏辣椒幼苗可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响



处理下的可溶性糖和可溶性蛋白含量均最高,且与CK差异显著;长研青香辣椒幼苗在 $45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ALA处理下的可溶性糖含量显著高于CK与其他处理,可溶性蛋白含量以 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ALA处理最高,显著高于CK和其他处理,其次为 $60$ 、 $45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ALA处理,显著高于CK和 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ALA处理。

#### 2.4 外源EBR与ALA对越夏辣椒幼苗氮代谢关键酶的影响

由表3可以看出,外源喷施不同浓度的EBR和ALA后,除长研青香辣椒在 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ EBR和

$60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ALA处理下的NR活性略低于CK外,两个越夏辣椒幼苗NR、NiR与GS活性均高于CK,且随着处理浓度的增加,氮代谢关键酶活性均呈先升高后降低的趋势。

博辣红牛辣椒幼苗在 $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ EBR处理下,NR、NiR与GS活性均显著高于CK与其他处理,长研青香辣椒幼苗在 $0.1$ 、 $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ EBR处理下的NR活性均显著高于CK与其他处理,但两个浓度处理之间差异不显著;同时,长研青香在 $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ EBR处理下,NiR、GS活性均显著高

表3 外源EBR与ALA对越夏辣椒幼苗氮代谢关键酶的影响

| 品种   | 处理     | 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | NR/ $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$ | NiR/ $\mu\text{mol}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ | GS/ $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$ |                           |
|------|--------|-----------------------------------|----------------------------------|--|----------------------------------|---------------------------|
| 博辣红牛 | 清水(CK) | 0                                 | $0.222\pm 0.01\text{ d}$         | $248.288\pm 13.87\text{ c}$                              | $17.503\pm 0.46\text{ c}$        |                           |
|      |        | EBR                               | 0.001                            | $0.476\pm 0.10\text{ c}$                                 | $250.379\pm 30.51\text{ c}$      | $18.757\pm 0.44\text{ c}$ |
|      |        | 0.01                              | $1.464\pm 0.06\text{ a}$         | $499.967\pm 77.11\text{ a}$                              | $39.535\pm 2.04\text{ a}$        |                           |
|      |        | 0.1                               | $0.663\pm 0.18\text{ b}$         | $280.627\pm 18.28\text{ bc}$                             | $26.025\pm 5.91\text{ b}$        |                           |
|      |        | 1.0                               | $0.695\pm 0.04\text{ b}$         | $342.098\pm 13.52\text{ b}$                              | $19.566\pm 0.97\text{ c}$        |                           |
|      | ALA    | 0                                 | $0.222\pm 0.01\text{ c}$         | $248.288\pm 13.87\text{ c}$                              | $17.503\pm 0.46\text{ c}$        |                           |
|      |        | 15                                | $0.342\pm 0.05\text{ bc}$        | $271.999\pm 14.60\text{ b}$                              | $20.708\pm 1.59\text{ c}$        |                           |
|      |        | 30                                | $0.443\pm 0.16\text{ b}$         | $296.881\pm 8.84\text{ a}$                               | $31.385\pm 4.51\text{ b}$        |                           |
|      |        | 45                                | $0.631\pm 0.02\text{ a}$         | $311.962\pm 9.40\text{ a}$                               | $40.324\pm 1.05\text{ a}$        |                           |
|      |        | 60                                | $0.264\pm 0.02\text{ c}$         | $276.180\pm 4.24\text{ b}$                               | $20.495\pm 1.59\text{ c}$        |                           |
| 长研青香 | 清水(CK) | 0                                 | $0.250\pm 0.001\text{ b}$        | $242.144\pm 4.22\text{ d}$                               | $20.610\pm 1.16\text{ c}$        |                           |
|      |        | EBR                               | 0.001                            | $0.198\pm 0.040\text{ b}$                                | $260.214\pm 11.76\text{ c}$      | $21.678\pm 2.46\text{ c}$ |
|      |        | 0.01                              | $0.551\pm 0.040\text{ a}$        | $334.920\pm 10.54\text{ a}$                              | $57.842\pm 2.44\text{ a}$        |                           |
|      |        | 0.1                               | $0.568\pm 0.140\text{ a}$        | $293.881\pm 2.34\text{ b}$                               | $36.550\pm 11.46\text{ b}$       |                           |
|      |        | 1.0                               | $0.240\pm 0.090\text{ b}$        | $268.493\pm 7.79\text{ c}$                               | $38.435\pm 10.47\text{ b}$       |                           |
|      | ALA    | 0                                 | $0.250\pm 0.001\text{ b}$        | $242.144\pm 4.22\text{ c}$                               | $20.610\pm 1.16\text{ e}$        |                           |
|      |        | 15                                | $0.250\pm 0.060\text{ b}$        | $270.113\pm 26.23\text{ c}$                              | $32.235\pm 1.55\text{ c}$        |                           |
|      |        | 30                                | $0.580\pm 0.070\text{ a}$        | $367.386\pm 41.84\text{ a}$                              | $37.203\pm 1.07\text{ b}$        |                           |
|      |        | 45                                | $0.605\pm 0.030\text{ a}$        | $324.588\pm 27.33\text{ ab}$                             | $46.455\pm 1.49\text{ a}$        |                           |
|      |        | 60                                | $0.206\pm 0.050\text{ b}$        | $291.827\pm 19.02\text{ bc}$                             | $28.640\pm 1.88\text{ d}$        |                           |

于CK与其他处理。

博辣红牛辣椒幼苗在 $45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ALA处理下,NR、NiR与GS活性最高,且显高于CK;长研青香辣椒幼苗在 $45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ALA与 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ALA处理下NR、NiR活性显高于CK,但两个浓度处理之间差异不显著;同时,长研青香辣椒幼苗在 $45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ALA处理下GS活性显著高于CK和其他处理。

由图3-A主成分分析结果可知,主成分1(PC1, 73.7%)和主成分2(PC2, 14.8%)可表征EBR处理对辣椒幼苗的影响。喷施不同浓度外源EBR后,幼苗在形态指标、抗氧化酶、渗透调

节物质、氮代谢关键酶等指标趋向于区域( $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ EBR处理),而膜脂过氧化指标MDA趋向于CK区域。因此,认为 $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ EBR处理能最大程度地促进越夏辣椒幼苗的生长。

由图3-B主成分分析结果可知,主成分1(PC1, 82.2%)和主成分2(PC2, 6.61%)可表征ALA处理对两个品种辣椒幼苗的影响。不同浓度外源ALA处理后,两个品种的幼苗形态指标及抗氧化酶、渗透调节物质、氮代谢关键酶等指标趋向于区域( $45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ALA),MDA趋向于CK区域。因此,认为 $45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ALA处理能最大程度地促进越夏辣椒幼苗的生长。

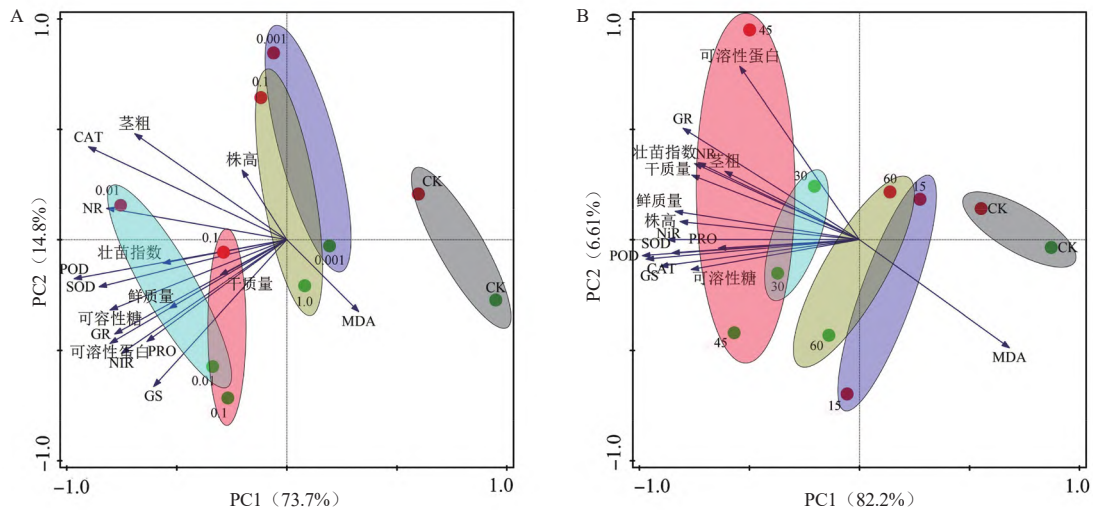


图3 外源 EBR 与 ALA 对越夏辣椒幼苗影响的主成分分析

A-EBR, B-ALA, ●代表博辣红牛辣椒, ●代表长研青香辣椒, 灰色区域代表 CK 处理, 紫色区域代表  $0.001 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  EBR 与  $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  ALA 处理, 蓝色区域代表  $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  EBR 与  $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  ALA 处理, 粉色区域代表  $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  EBR 与  $45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  ALA 处理, 黄色区域代表  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  EBR 与  $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  ALA 处理。

### 3 讨论

温度是影响植物生长发育的重要生态因子之一, 高温胁迫会伤害植物营养器官与生殖器官, 导致植物生长被抑制、生物量积累下降 (张正勇和 杨雪, 2020; 毕银丽和 薛子可, 2021), 而喷施外源 EBR 能够缓解高温伤害、提高作物的生物量及产量 (El-Bassiony et al., 2012); 喷施外源 ALA 激素能提升幼苗的生长发育指标和产量 (Korkmaz et al., 2009; 徐刚 等, 2011)。本试验结果表明, 高温逆境下辣椒幼苗叶片喷施适宜浓度的外源 EBR 和 ALA 后, 其株高、茎粗、干鲜质量、壮苗指数均出现不同程度的提高。综合分析, 辣椒幼苗外源喷施 EBR 的浓度为  $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  或 ALA 浓度为  $45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 能更好地缓解高温胁迫影响, 减轻高温逆境对辣椒幼苗生长发育的抑制。

高温胁迫后植物抗氧化系统激活, 以减轻高温对植物的伤害 (梁宝萍 等, 2022), MDA 含量的高低代表膜脂被氧化的程度, 为维持植物的氧化还原平衡, SOD、POD、CAT 清除植物组织内过量的  $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{O}_2^-$ 。张永平等 (2012) 研究表明, 高温胁迫下施用外源 EBR 能提高甜瓜幼苗的抗氧化酶活性。Asish 和 Bhavanath (2010) 研究发现, 高温胁迫下施加外源 EBR 降低了茄子幼苗的 MDA 含量、 $\text{O}_2^-$  的产生速率及  $\text{H}_2\text{O}_2$  浓度。有研究表明 BRs

可能是通过激活植物体内的抗氧化酶系统从而使植株具有抵御逆境的能力 (Manghwar et al., 2022)。徐晓洁等 (2008) 研究发现在高温胁迫下施加外源 ALA, 能提高番茄叶片的 POD、SOD、CAT 活性, 降低 MDA 含量。王传凯和 郭淼 (2017) 研究指出喷施外源 ALA 提升了高温胁迫下裸燕麦 SOD、POD 等的活性, 降低了膜脂过氧化程度。

本试验中, 高温逆境下喷施适宜浓度的外源 EBR 或 ALA 后, 辣椒幼苗 MDA 含量显著降低, SOD、POD、CAT 活性提高, 缓解了高温逆境对辣椒幼苗造成的伤害, 其中  $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  EBR 和  $45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  ALA 处理效果最好。

高温胁迫条件下, 植物通过积累脯氨酸及可溶性糖等渗透调节物质含量, 抵抗热胁迫对植物的危害 (何晓明 等, 2002)。陆兵等 (2014) 发现, 外源 EBR 能提高浙贝母叶片中的可溶性蛋白含量, 达到降低体内活性氧水平, 提升耐热性的目的。Merga (2020) 研究发现, 增加植物体内渗透调节物质的含量能提高植物的抗逆性。在干旱胁迫与盐胁迫下, 外源 ALA 能增加植物的渗透调节物质浓度, 提高植株的耐受性 (Daneshmand & Oloumi, 2015; Song et al., 2017)。而目前关于高温胁迫与植物幼苗渗透调节物质相关的报道较少。本试验结果表明, 高温逆境下喷施外源 EBR 和 ALA 均能提高辣椒幼苗的脯氨酸、可溶性糖及可溶性蛋白含

量, 其中  $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  EBR 和  $45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  ALA 处理对这 3 类渗透调节物质含量的提升效果较好。

植物氮元素来源于根系对营养液或土壤中  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$  的吸收, 氮素营养是多种氨基酸、蛋白质、核苷酸、酶、次生代谢物和生长激素等物质的重要组成部分, 是植物生长发育所必需的 (Xia et al., 2022; Chen et al., 2023)。前人研究中, 施用外源 EBR 与 ALA 通过氮代谢调控进而提高植物的耐旱性与耐寒性 (Shu, et al., 2016)。外源 EBR 与 ALA 在紫外辐射与低温胁迫下可通过提高植物氮代谢来维持植株的碳、氮状况, 从而降低紫外辐射与低温对植株的伤害 (王焱, 2019; Gupta & Prasad, 2021), 然而在高温胁迫下外源 EBR 与 ALA 对植物氮代谢的影响报道较少。

本试验结果表明, 高温胁迫下对辣椒幼苗喷施外源 EBR 和 ALA 后, 其氮代谢关键酶如 NR、NiR、GS 活性得到提高, 缓解了高温逆境对植物造成的伤害。 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  EBR 和  $45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  ALA 处理均对氮代谢关键酶提升明显, 能最大程度地维持高温逆境下幼苗氮代谢的平衡。

## 4 结论

综上所述, 喷施  $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  EBR 和  $45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  ALA 都最大程度的提升了越夏辣椒幼苗的株高、茎粗、干鲜质量、壮苗指数等指标, 缓解了高温逆境对幼苗生长的抑制作用; 提升了辣椒幼苗 POD、SOD、CAT 等抗氧化酶的活性, MDA 含量明显降低; 充分清除了 ROS、 $\text{H}_2\text{O}_2$  和  $\text{O}_2^-$  等有毒物质, 减轻了膜脂过氧化造成的危害; 提高了辣椒幼苗叶片中的脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白等渗透调节物质的含量, 有效降低了细胞水势, 缓解了高温逆境对幼苗造成的渗透伤害; 有效增强了辣椒幼苗叶片中的 NR、GS、NiR 等氮代谢关键酶的活性, 减少了蛋白的降解, 维持了逆境下的氮代谢平衡。

### 参考文献

毕银丽, 薛子可. 2021. 从枝菌根真菌提高植物高温胁迫抗逆性及在矿区生态修复应用展望. 中国科学基金, 35 (6):933-939.  
戴雄泽. 2021. 湖南辣椒主要栽培模式介绍. 湖南农业, (8): 9.  
何晓明, 林毓娥, 陈清华, 邓江明. 2002. 高温对黄瓜幼苗生长、脯氨酸含量及 SOD 酶活性的影响. 上海交通大学学报 (农业科学版), (1): 30-33.

梁宝萍, 段莹, 姜俊, 姬宇飞, 陈杰, 董帅厅, 杨瑞晗. 2022. 高温胁迫对辣椒果实活性氧代谢的影响. 陕西农业科学, 68 (8): 93-96, 102.  
刘宏运, 林威柱, 王健, 孙锦, 束胜, 郭世荣, 王玉. 2023. 叶面喷施不同浓度腐胺复配剂对黄瓜幼苗高温抗性的影响. 中国蔬菜, (1): 34-41.  
陆兵, 张彦南, 王康才, 张晓倩, 吴雯雯. 2014. 高温胁迫下 2, 4-表油菜素内酯对浙贝母花期耐热性及光合特性的影响. 湖北农业科学, 53 (16): 3845-3848.  
王传凯, 郭淼. 2017. 外源 ALA 对常温和高温条件下裸燕麦生长发育及抗氧化酶活性的影响. 河南农业科学, 46 (7):30-34.  
王立浩, 张宝玺, 张正海, 曹亚从, 于海龙, 冯锡刚. 2021. “十三五”我国辣椒育种研究进展、产业现状及展望. 中国蔬菜, (2): 21-29.  
王焱. 2019. 5-氨基乙酰丙酸 (ALA) 缓解玉米早春低温胁迫生理机制 (博士论文). 哈尔滨: 东北农业大学.  
徐刚, 刘涛, 高文瑞, 郭世荣, 李德翠, 孙艳军. 2011. ALA 对低温胁迫下辣椒植株生长及光合特性的影响. 江苏农业学报, 27 (3): 612-616.  
徐晓洁, 邹志荣, 乔飞, 王魏, 张丙凯, 祁向玲. 2008. ALA 对 NaCl 胁迫下不同品种番茄植株光合作用、保护酶活性及果实产量的影响. 干旱地区农业研究, (4): 131-135.  
叶巧玲, 董向阳, 颜丹红, 屈雨晨, 刘永立, 胡海涛. 2022. 2, 4-表油菜素内酯对高温胁迫下金线莲的影响. 浙江农业科学, 63 (1): 63-68.  
张永平, 陈幼源, 杨少军. 2012. 高温胁迫下 2, 4-表油菜素内酯对甜瓜幼苗生理及光合特性的影响. 植物生理学报, 48 (7): 683-688.  
张正勇, 杨雪. 2020. 植物对高温干旱复合胁迫的响应机理. 农技服务, 37 (8): 34-36.  
赵书恒, 欧立军, 缪武, 林萱, 刘仪龙, 邹高峰. 2022. 高品质辣椒软皮早秀的选育. 长江蔬菜, (14): 40-43.  
周利杰. 2018. 夏季高山番茄育苗温度适宜度与限制因子定量评价 (硕士论文). 郑州: 河南农业大学.  
邹学校, 胡博文, 熊程, 戴雄泽, 刘峰, 欧立军, 杨博智, 刘周斌, 索欢, 徐昊, 朱凡, 远方. 2022. 中国辣椒育种 60 年回顾与展望. 园艺学报, 49 (10): 2099-2118.  
Asish K P, Bhavanath J. 2010. Antioxidative defense potential to salinity in the euhalophyte *salicornia brachiata*. Journal of Plant Growth Regulation, 29 (2): 137-148.  
Chen H, Hu W, Wang Y, Zhang P, Zhou Y, Yang L, Li Y, Chen L, Guo J. 2023. Declined photosynthetic nitrogen use efficiency under ammonium nutrition is related to photosynthetic electron transport chain disruption in citrus plants. Scientia Horticulturae, 308: 111594. doi: 10.1016/j.scienta.2022.111594.  
Daneshmand F, Oloumi H. 2015. The exogenously applied 5-aminolevulinic acid (ALA) mitigates salt stress in tomato plants. Journal of Crop Production and Processing, 5 (17): 135-148.

- El-Bassiony A M, Ghoname A A, El-Awadi M E, Fawzy Z F, Gruda N. 2012. Die positive wirkung von brassinosteroiden auf das wachstum und die produktivität von grünen bohnen, gewachsen unter hohen temperaturen. *Gesunde Pflanzen*, 64 (4): 175-182.
- Gupta D, Prasad S M. 2021. 5-aminolevulinic acid (ALA) regulates photosynthetic performance and nitrogen metabolism status in UV-B challenged *Cajanus cajan* L. seedlings. *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*, (prepublish): 1-21.
- Korkmaz A, Korkmaz Y, Demirkıran A R. 2009. Enhancing chilling stress tolerance of pepper seedlings by exogenous application of 5-aminolevulinic acid. *Environmental and Experimental Botany*, 67 (3): 495-501.
- Krishna B K, Somerville R, David J. 2020. The use of 5-aminolevulinic acid to reduce heat-stress-related damages in tall fescue. *Crop Science of America*. 61 (5): 3206-3218.
- Manghwar H, Hussain A, Ali Q, Liu F. 2022. Brassinosteroids (BRs) role in plant development and coping with different stresses. *International Journal of Molecular Sciences*, 23 (3): 1012. doi: 10.3390/ijms23031012.
- Merga D. 2020. Review on role of abscisic acid for adaptation and performance of crop under drought condition. *Journal of Natural Sciences Research*, 10 (5): 28-35.
- Pereyda-González J M, DelaPeña C, Tezara W, ZamoraBustillos R, AnduezaNoh R H, NohKú J G, CarreraMarín M, Garruña R. 2022. High temperature and elevated CO<sub>2</sub> modify phenology and growth in pepper plants. *Agronomy*, 12 (8): 1836.
- Preet T, Ghai N, Jindal S K. 2022. Mitigating the effects of elevated temperature through the use of growth regulators in bell pepper. *Agricultural Research Journal*, 59 (3): 400-406.
- Shu S, Tang Y, Yuan Y, Sun J, Zhong M, Guo S. 2016. The role of 24-epibrassinolide in the regulation of photosynthetic characteristics and nitrogen metabolism of tomato seedlings under a combined low temperature and weak light stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 107: 344-353.
- Song J, Anjum S A, Zong X, Yan R, Wang L, Yang A, Ashraf U, Zohaib A, Lv J, Zhang Y, Dong Y, Wang S. 2017. Combined foliar application of nutrients and 5-aminolevulinic acid (ALA) improved drought tolerance in *Leymus chinensis* by modulating its morpho-physiological characteristics. *Crop and Pasture Science*, 68 (5): 474-482.
- Xia H, Liu X, Wang Y, Lin Z, Deng H, Wang J, Lin L, Deng Q, Lv X, Xu K, Liang D. 2022. 24-Epibrassinolide and nitric oxide combined to improve the drought tolerance in kiwifruit seedlings by proline pathway and nitrogen metabolism. *Scientia Horticulturae*, 297: 110929. doi:10.1016/j.scienta.2022.110929.

## Effect of Exogenous EBR and ALA on Chilli Seedling Growth under High-Temperature Stress

ZHANG Wenxia, CHEN Han, HU Jiawei, HUANG Ke, WANG Junwei\*

(College of Horticulture, Hunan Agricultural University, Key Laboratory for Vegetable Biology of Hunan Province, Engineering Research Center for Horticultural Crop Germplasm Creation and New Variety Breeding, Ministry of Education, Key Laboratory for Evaluation and Utilization of Gene Resources of Horticultural Crops (vegetables, tea, etc.), Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China, Huangpu Innovation Research Institute of Hunan Agricultural University, Changsha 410128, Hunan, China)

**Abstract:** In order to investigate the effects of exogenous EBR and ALA on over-summer growth of chilli seedlings under high-temperature stress, this experiment took 2 chilli varieties ‘Bolahongniu’ and ‘Changyanqingxiang’, as test material, and sprayed different concentrations EBR (0.001, 0.01, 0.1, and 1.0 mg · L<sup>-1</sup>) and ALA (15, 30, 45, and 60 mg · L<sup>-1</sup>). The results showed that exogenous EBR and ALA all could enhance seedling ability of resisting high-temperature adversity to different extent. After spraying different concentrations of EBR and ALA, the growth indexes of chilli seedlings including plant height, stem thickness, dry and fresh mass, and sound seedling index, etc. all showed an upward trend. The activities of antioxidant enzymes as SOD, POD, and CAT were strengthened. The content of MDA was reduced. The contents of proline, soluble sugar, and soluble protein were increased. The activities of key nitrogen metabolism enzymes like NR, NiR, GS, etc. were significantly enhanced. The treatment of 0.01 mg · L<sup>-1</sup> EBR and 45 mg · L<sup>-1</sup> ALA had the best effect on relieving high-temperature stress.

**Keywords:** high-temperature stress; chilli seedling; 2, 4-epibrassinolide (EBR); 5-aminolevulinic acid (ALA); plant growth regulator