

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.2025.0514

# 外源 $\text{Ca}^{2+}$ 通过提高抗氧化和渗透调节能力增强黄瓜幼苗耐热性

郑栋文, 李 旋, 胡欣蕊, 席世博, 肖怀娟, 王吉庆, 汪 虎

(河南农业大学园艺学院 郑州 450046)

**摘要:**为了探究外源  $\text{Ca}^{2+}$  调控黄瓜幼苗耐热性的作用机制,以津优 35 号黄瓜为试验对象,设置 5 个外源  $\text{Ca}^{2+}$  处理水平,即  $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (T1)、 $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (T2)、 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (T3)、 $30 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (T4) 和  $40 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (T5),以清水为对照(CK),筛选缓解黄瓜幼苗高温胁迫的适宜  $\text{Ca}^{2+}$  浓度和探索  $\text{Ca}^{2+}$  缓解高温胁迫的生理机制。结果表明,T2 处理可有效降低黄瓜叶片细胞损伤,显著提高高温胁迫下黄瓜幼苗过氧化物酶和抗坏血酸过氧化物酶活性,相较于 CK 分别显著提高 34.33% 和 22.71%,可溶性蛋白和脯氨酸含量相较于 CK 分别显著提高 22.65% 和 20.04%,增强了黄瓜幼苗抗氧化和渗透调节能力。此外,T2 处理显著缓解了高温胁迫对黄瓜幼苗最大光化学效率  $F_v/F_m$  和根系活力的抑制作用,相较于 CK 分别提高 21.57% 和 30.77%,从而维持高温胁迫下黄瓜幼苗地上和地下部的正常代谢活动。综上,10  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$  溶液为增强黄瓜幼苗耐热性的合适浓度,可在高温环境下的黄瓜生产中推广应用。

**关键词:**黄瓜;耐热性; $\text{Ca}^{2+}$ ;活性氧;渗透调节物质

中图分类号:S642.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)02-095-06

## Exogenous $\text{Ca}^{2+}$ enhances the heat tolerance of cucumber seedlings by improving their antioxidant and osmotic regulation capability

ZHENG Dongwen, LI Xuan, HU Xinrui, XI Shibo, XIAO Huaijuan, WANG Jiqing, WANG Hu

(College of Horticulture, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, Henan, China)

**Abstract:** To explore the mechanism of exogenous  $\text{Ca}^{2+}$  in regulating the heat tolerance of cucumber seedlings, the cucumber variety Jinyou 35 was used as the experimental subject. Five levels of exogenous  $\text{Ca}^{2+}$  treatments were set, namely  $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (T1),  $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (T2),  $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (T3),  $30 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (T4), and  $40 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (T5), with distilled water as the control(CK). The aim was to screen the appropriate  $\text{Ca}^{2+}$  concentration for alleviating the high-temperature stress on cucumber seedlings and to explore the physiological mechanism of  $\text{Ca}^{2+}$  in mitigating high-temperature stress. The results showed that the T2 treatment could effectively reduce cell damage in cucumber leaves, significantly increase the enzyme activity of POD and APX in cucumber seedlings under high-temperature stress, by 34.33% and 22.71%, respectively, compared to CK. The content of soluble protein and proline were significantly increased by 22.65% and 20.04%, respectively, compared to CK, enhancing the antioxidant and osmotic adjustment capabilities of cucumber seedlings. Additionally, the T2 treatment significantly alleviated the inhibitory effects of high-temperature stress on the maximum photochemical efficiency  $F_v/F_m$  and root activity of cucumber seedlings, increasing them by 21.57% and 30.77%, respectively, compared to CK, thereby maintaining the normal metabolic activity of the aboveground and underground parts of cucumber seedlings under high-temperature stress. In conclusion, 10  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$  solution is the appropriate concentration for enhancing the heat tolerance of cucumber seedlings and can be applied in cucumber production under high-temperature conditions.

**Key words:** Cucumber; Heat tolerance;  $\text{Ca}^{2+}$ ; Reactive oxygen species; Osmotic regulation substances

黄瓜(*Cucumis sativus* L.)是葫芦科一年生攀援草本植物,起源于印度北部,现在全球分布<sup>[1]</sup>。我国作为全球黄瓜生产面积最大的国家,据联合国粮食

及农业组织(FAO)数据,2020 年中国的黄瓜种植面积达到 126.7 万  $\text{hm}^2$ ,占全球的 56.4%,其中设施黄瓜种植面积约占到总面积的 50%。黄瓜在生长过

收稿日期:2025-07-18;修回日期:2025-08-26

基金项目:河南省科技攻关计划(242102110176);中国博士后科学基金面上资助项目(2023M741062)

作者简介:郑栋文,男,在读硕士研究生,研究方向为设施蔬菜栽培生理。E-mail: zyxhk@foxmail.com

通信作者:汪虎,男,讲师,研究方向为设施蔬菜栽培生理。E-mail: wanghu@henau.edu.cn

程中喜温但不耐高温,最适生长温度为25~30℃,超过35℃植株就会受到伤害<sup>[2]</sup>。随着全球极端天气频繁发生和温室效应加剧,高温越来越成为黄瓜夏季栽培和设施生产的限制因素。在黄瓜生产中,高温胁迫会导致植株徒长、叶片干枯和果实畸形,从而对黄瓜的品质和产量产生不利影响<sup>[3]</sup>。另外,高温会干扰黄瓜的正常生理代谢,使光合色素积累减少,酶活性被抑制,光合速率降低;并降低细胞分裂速度,从而影响高温下黄瓜的生长速率<sup>[4]</sup>。高温高湿的环境条件有利于病虫害的滋生、蔓延,白粉病、霜霉病及蚜虫等黄瓜病虫害在高温条件下较易发生,不但增加防治费用,而且严重影响黄瓜的产量和品质<sup>[4]</sup>。因此,探索缓解黄瓜幼苗高温伤害的方法,保障高温条件下黄瓜幼苗的正常生长,对黄瓜产业的可持续发展具有重要意义。

钙离子( $\text{Ca}^{2+}$ )作为植物生长发育不可或缺的矿质营养元素,不仅在维持细胞壁结构完整性、膜系统稳定性等基础生理功能中发挥结构性作用,更通过构建胞外环境信号与胞内生理响应的信号转导网络,在植物逆境适应机制中占据核心地位<sup>[5]</sup>。 $\text{Ca}^{2+}$ 独特的双价阳离子特性使其成为植物响应非生物胁迫过程中最关键的次级信使分子,通过精密的钙信号转导系统,显著增强植物对渗透压失衡、离子毒害、氧化损伤等多种胁迫的耐受能力,是连接外界环境变化与细胞内生理反应的桥梁<sup>[6]</sup>。当植物遭受高温胁迫时,细胞内 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度会迅速上升;当 $\text{Ca}^{2+}$ 与受体蛋白-钙调素(CaM)结合后,便触发一系列复杂的分子级联反应,激活耐热相关基因的表达,增强植株对高温的防御能力<sup>[7]</sup>。研究表明,15 mmol·L<sup>-1</sup>  $\text{Ca}^{2+}$ 处理能够减缓高温胁迫下百合植株膜透性的增加、叶绿素的降解和丙二醛的积累,提高脯氨酸和可溶性蛋白含量及超氧化物歧化酶活性,从而提高植株的耐热性,降低热害指数<sup>[7]</sup>。10 mmol·L<sup>-1</sup>  $\text{Ca}^{2+}$ 处理能够有效缓解高温强光对西葫芦光合系统的伤害<sup>[8]</sup>。10 mmol·L<sup>-1</sup>  $\text{Ca}^{2+}$ 处理能提高滨梅幼苗对高温的耐受性, $\text{Ca}^{2+}$ 信号系统参与了胁迫过程中渗透物质和 $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase活性的调节<sup>[9]</sup>。虽然外源 $\text{Ca}^{2+}$ 调控植株耐热性的研究已在多种作物中取得一定进展,但外源 $\text{Ca}^{2+}$ 对黄瓜幼苗耐热性的调控作用机制研究还鲜见报道。

良种和良法是解决农业生产问题的两个重要路径。在目前黄瓜耐高温生产过程中,耐热品种的选育仍依赖于传统育种,存在效率低、品质和产量难以兼顾、耐热性遗传规律不明确等难题<sup>[4]</sup>。因此,

探索施用外源物质等栽培手段对黄瓜植株耐热性的调控作用研究至关重要。鉴于此,笔者通过对黄瓜幼苗外源喷施不同浓度氯化钙( $\text{CaCl}_2$ ),研究高温胁迫环境下其对幼苗氧化应激、渗透调节物质和叶绿素荧光等指标的影响,探究外源 $\text{Ca}^{2+}$ 缓解高温对黄瓜幼苗危害的作用机制,以期为高温环境下黄瓜的优质高效生产奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

试验于2024年6—9月在河南农业大学园艺学院设施蔬菜栽培实验室进行。本研究所用黄瓜材料为津优35,由天津科润农业股份有限公司黄瓜研究所选育。黄瓜种子温汤浸种后播种于50孔育苗盘中,并在光照培养箱中(昼25℃/夜20℃,光照16 h/黑暗8 h)进行培养。待黄瓜幼苗生长至3叶1心时进行试验处理。

### 1.2 试验设计

当黄瓜幼苗长至3叶1心期时,以清水为对照(CK),用5、10、20、30、40 mmol·L<sup>-1</sup>(依次记作T1、T2、T3、T4、T5处理)的 $\text{CaCl}_2$ (购自北京索莱宝科技有限公司)溶液均匀喷施黄瓜叶片。试验采用随机区组设计,各处理分别喷施长势一致的黄瓜幼苗10株,设置3次重复。每株喷施5 mL,确保叶片正反两面均匀覆盖。然后,将黄瓜幼苗转移至光照培养箱(GXZ-500,宁波江南仪器厂)(昼45℃/夜30℃,光照16 h/黑暗8 h)进行高温处理,处理48 h后取样测定生理生化指标。

### 1.3 测定方法

1.3.1 丙二醛(MDA)含量和相对电导率测定 采用硫代巴比妥酸法测定MDA含量<sup>[10]</sup>,参照Yin等<sup>[11]</sup>的方法测定相对电导率。

1.3.2 抗氧化酶活性测定 采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性<sup>[12]</sup>,采用氮蓝四唑法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性<sup>[12]</sup>,采用过氧化氢还原法测定过氧化氢酶(CAT)活性<sup>[12]</sup>,参考Nakano等<sup>[13]</sup>的方法测定抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性。

1.3.3 渗透调节物质含量测定 参考李合生<sup>[14]</sup>的方法测定渗透调节物质含量,采用酸性茚三酮比色法测定游离脯氨酸(Pro)含量,采用考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白含量,采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量。

1.3.4 超氧阴离子 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 产生速率和 $\text{H}_2\text{O}_2$ 含量测定 通过羟胺盐酸盐法测定 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 产生速率<sup>[15]</sup>,采用二甲酚橙法测定 $\text{H}_2\text{O}_2$ 含量<sup>[16]</sup>。

1.3.5 最大光化学效率和根系活力测定 使用FluorCam7 荧光成像系统(易科泰,中国)测定最大光化学效率  $F/F_m$ ;采用三苯基氯化四氮唑(TTC)法检测根系活力<sup>[17]</sup>。

#### 1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2021 对数据进行统计和作图,采用 DPS 9.01(Duncan 新复极差法)对数据进行差异显著性分析( $P<0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 外源Ca<sup>2+</sup>对高温胁迫下黄瓜幼苗相对电导率和MDA含量的影响

对喷施不同浓度外源Ca<sup>2+</sup>的黄瓜幼苗进行高温处理后,为检测不同处理下细胞膜的破坏程度和细胞质渗漏情况,对各处理下叶片的相对电导率进行检测。由表1可以看出,外源Ca<sup>2+</sup>喷施后的各处理叶片的相对电导率相比CK均呈显著下降趋势,且T2处理的相对电导率最低;而随着Ca<sup>2+</sup>浓度的增加,相对电导率的下降趋势有所减弱。

对各处理下黄瓜幼苗叶片的MDA含量进行检测,由表1可知,外源Ca<sup>2+</sup>喷施降低了叶片高温处理后的MDA含量。随着Ca<sup>2+</sup>处理浓度升高,高温胁迫下叶片MDA含量呈先降低后升高的变化趋势,T2和T3处理较CK分别显著降低18.53%和14.48%。综合来看,T2和T3处理对高温胁迫下叶片中MDA积累的缓解作用效果最显著。

表1 不同处理对高温胁迫下黄瓜叶片膜系统伤害相关指标的影响

Table 1 Effects of different treatments on membrane system injury-related indicators of cucumber leaves under high temperature stress

| 处理 | 相对电导率<br>Treatment | b(丙二醛)<br>Relative electric conductivity/% | MDA含量/(nmol·g <sup>-1</sup> ) |
|----|--------------------|--|-------------------------------|
| CK | 42.10±3.73 a       | 10.36±0.57 a                               |                               |
| T1 | 32.69±1.91 b       | 9.25±1.09 ab                               |                               |
| T2 | 25.33±0.72 d       | 8.44±0.29 b                                |                               |
| T3 | 27.17±0.80 cd      | 8.86±0.33 b                                |                               |
| T4 | 29.85±2.27 bc      | 9.62±0.39 ab                               |                               |
| T5 | 33.86±2.18 b       | 10.13±1.00 a                               |                               |

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference between different treatments( $P<0.05$ ). The same below.

### 2.2 外源Ca<sup>2+</sup>对高温胁迫下黄瓜幼苗抗氧化酶活性的影响

对各处理黄瓜幼苗在高温胁迫后的抗氧化酶活性进行检测,由表2可知,高温处理下,随着外源

Ca<sup>2+</sup>浓度升高,SOD活性呈先升后降的变化趋势,T2处理的活性最高,但各处理间差异均不显著。不同浓度外源Ca<sup>2+</sup>处理增强了POD活性,其中T2处理较CK显著提高34.33%,其他处理与CK差异不显著。不同浓度外源Ca<sup>2+</sup>处理增强了CAT活性,其中T2处理活性最高,但各处理与CK相比差异均不显著。不同浓度外源Ca<sup>2+</sup>处理增强了APX活性,除T5处理与CK差异不显著外,其他处理(T1~T4)较CK分别显著提高了12.03%、22.71%、16.96%和10.68%。

表2 不同处理对高温下黄瓜幼苗抗氧化酶活性的影响

Table 2 Effects of different treatments on antioxidant enzyme activity of cucumber seedlings under high temperature stress

| 处理 | SOD活性<br>Treatment | POD活性<br>SOD activity/<br>(U·g <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | CAT活性<br>POD activity/<br>(U·g <sup>-1</sup> ·min <sup>-1</sup> ) | APX活性<br>CAT activity/<br>(U·g <sup>-1</sup> ·min <sup>-1</sup> ) | APX活性<br>APX activity/<br>(U·g <sup>-1</sup> ·min <sup>-1</sup> ) |
|----|--------------------|---|---|---|---|
| CK | 129.88±4.90 a      | 124.98±5.43 b   | 30.04±3.54 a  | 11.14±0.45 c  |   |
| T1 | 133.07±7.03 a      | 146.02±16.89 ab   | 33.08±3.84 a  | 12.48±0.50 b  |   |
| T2 | 142.04±15.33 a     | 167.89±28.38 a  | 36.97±5.87 a  | 13.67±0.55 a  |   |
| T3 | 139.99±18.44 a     | 142.90±18.57 ab   | 32.16±3.77 a  | 13.03±0.89 ab   |   |
| T4 | 133.09±17.01 a     | 147.81±22.04 ab   | 34.15±5.28 a  | 12.33±0.14 b  |   |
| T5 | 129.06±12.29 a     | 149.85±26.61 ab   | 34.78±4.59 a  | 12.06±0.71 bc   |   |

### 2.3 外源Ca<sup>2+</sup>对高温胁迫下黄瓜幼苗渗透调节物质含量的影响

进一步分析外源Ca<sup>2+</sup>对高温胁迫下黄瓜幼苗渗透调节物质含量的影响,由表3可知,在高温条件下,各试验处理组的可溶性蛋白含量均高于CK,其中T1~T4处理相对于CK均呈显著差异,且T2处理的可溶性蛋白含量最高,较CK显著提高22.65%。外源Ca<sup>2+</sup>处理后黄瓜幼苗叶片中可溶性

表3 不同处理对高温下黄瓜幼苗渗透调节物质含量的影响

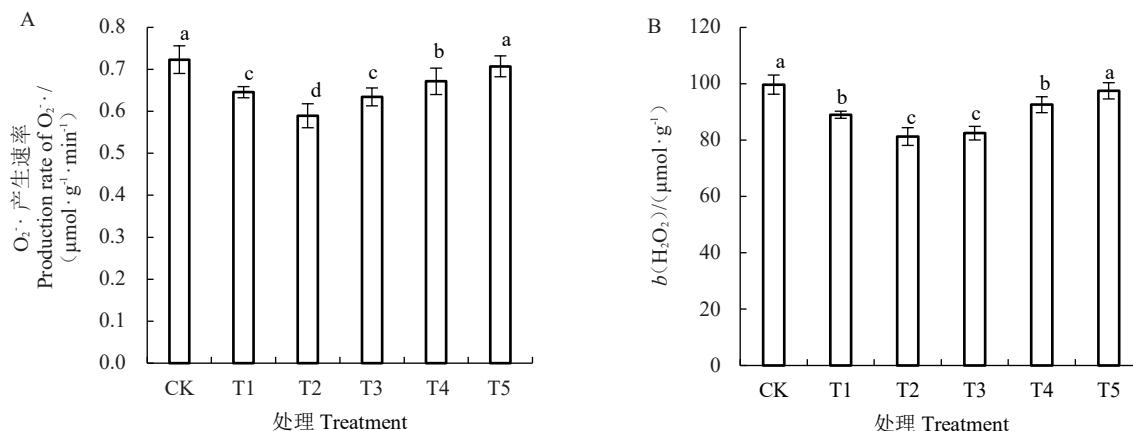
Table 3 Effects of different treatments on the content of osmotic regulation substances of cucumber seedlings under high temperature stress

| 处理 | w(可溶性蛋白)<br>Treatment | w(可溶性糖)<br>Soluble protein<br>content/(mg·g <sup>-1</sup> ) | w(脯氨酸)<br>Soluble sugar<br>content/(mg·g <sup>-1</sup> ) | w(脯氨酸)<br>Proline content/<br>(μg·g <sup>-1</sup> ) |
|----|-----------------------|---|--|---|
| CK | 23.62±0.52 d          | 49.43±2.16 a  | 126.47±5.85 c  |   |
| T1 | 26.45±0.36 bc         | 50.37±2.64 a  | 138.32±2.87 b  |   |
| T2 | 28.97±1.22 a          | 53.97±3.44 a  | 151.81±3.22 a  |   |
| T3 | 26.92±0.37 b          | 53.01±4.16 a  | 147.49±3.74 a  |   |
| T4 | 25.43±1.23 c          | 51.23±2.21 a  | 136.20±6.30 b  |   |
| T5 | 24.15±0.33 d          | 49.54±1.39 a  | 129.32±5.98 c  |   |

糖含量均有所增加,其中T2处理最高,但各处理与CK相比差异均不显著。外源Ca<sup>2+</sup>处理促进了高温胁迫下黄瓜幼苗中脯氨酸的积累,随着处理浓度的增加,脯氨酸含量呈先上升后下降的趋势,除T5处理与CK差异不显著外,其他处理均显著高于CK,其中T2处理较CK显著提高20.04%。

## 2.4 外源Ca<sup>2+</sup>对高温胁迫下黄瓜幼苗活性氧产生的影响

对高温处理后的黄瓜幼苗O<sub>2</sub><sup>•</sup>和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量进行检测,从图1可以看出,除T5处理外,其他各处理植株在受到高温胁迫后的O<sub>2</sub><sup>•</sup>产生速率和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量均显著低于CK,均随外源Ca<sup>2+</sup>处理浓度的增



注:不同小写字母代表差异显著( $P<0.05$ )。下同。

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

图1 外源Ca<sup>2+</sup>对高温胁迫下黄瓜幼苗超氧阴离子产生速率(A)和过氧化氢含量(B)的影响

Fig. 1 Effects of exogenous Ca<sup>2+</sup> on the production rate of O<sub>2</sub><sup>•</sup>(A) and the content of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (B) of cucumber seedlings under high temperature stress

加呈先降后升的变化趋势。其中,T2处理的O<sub>2</sub><sup>•</sup>产生速率和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量最低,较CK分别显著降低18.06%和18.48%。

## 2.5 外源Ca<sup>2+</sup>对高温胁迫下黄瓜幼苗最大光化学效率和根系活力的影响

对高温处理后的黄瓜幼苗叶片最大光化学效率 $F_v/F_m$ 进行检测,由图2-A可知,各处理植株高温胁迫下的 $F_v/F_m$ 随着外源Ca<sup>2+</sup>处理浓度的增加,

呈现出先升后降的变化趋势。除T5处理外,其他各处理植株的 $F_v/F_m$ 相较于CK显著升高,其中T2处理最大,较CK显著提高21.57%。此外,对根系活力的检测结果(图2-B)显示,同 $F_v/F_m$ 检测结果类似,外源Ca<sup>2+</sup>处理增强了高温胁迫下的根系活力,尤其是T2处理的增强效果最显著,较CK显著提高30.77%。T4和T5处理与CK相比差异不显著。

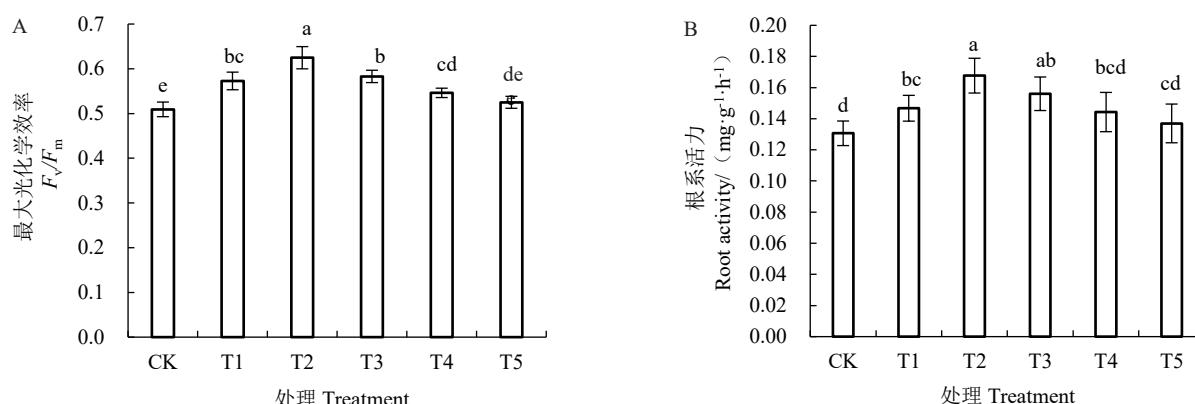


图2 不同处理对高温胁迫下黄瓜幼苗最大光化学效率(A)和根系活力(B)的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on the maximum photochemical efficiency(A) and root activity(B) of cucumber seedlings under high-temperature stress

### 3 讨论与结论

在蔬菜生产中,高温使植株整体生长势变弱,生理代谢受到抑制,光合色素积累减少,酶活性受到抑制,光合速率下降,影响生长发育<sup>[18]</sup>。高温条件下的氧化胁迫损伤是对植株造成危害的重要原因,植物细胞中大量氧自由基的产生造成细胞质膜系统的过氧化和细胞膜被破坏,导致了细胞质中电解质的渗漏及膜脂过氧化产物MDA的积累<sup>[19,20]</sup>。此外,活性氧对光合器官及许多生物功能分子均有破坏作用。在正常条件下,植株借助体内活性氧清除系统来清除不断产生的活性氧,保护光合器官、膜系统及生物功能分子等<sup>[21]</sup>。植物体内的抗氧化酶系统,包括超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)等,能够清除细胞内累积的活性氧自由基,进而抑制脂质过氧化反应,从源头抑制细胞质的泄露和减缓MDA的生成<sup>[4,22]</sup>。本试验表明,叶面喷施10 mmol·L<sup>-1</sup>的Ca<sup>2+</sup>处理后,高温环境下黄瓜幼苗叶片的POD和APX活性均显著高于CK,而SOD和CAT活性虽有所增强但未达到显著效果,表明POD和APX这两种抗氧化酶在Ca<sup>2+</sup>诱导的黄瓜幼苗活性氧清除过程中扮演关键角色,这可能是黄瓜植株细胞内钙信号转导网络在高温响应中的选择性调控的结果。同时,O<sub>2</sub>·<sup>-</sup>产生速率和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量测定显示,外源Ca<sup>2+</sup>显著降低了高温胁迫下活性氧的积累。这与外源Ca<sup>2+</sup>处理后的黄瓜幼苗在高温胁迫下的POD和APX活性增强相互印证,表明外源Ca<sup>2+</sup>主要通过增强POD和APX活性以减少高温下黄瓜叶片活性氧的产生。因此,外源Ca<sup>2+</sup>处理通过有效降低活性氧水平,从而从源头上遏制了膜脂过氧化的进程,抑制高温胁迫下黄瓜幼苗MDA积累及膜系统损伤,从而减少电解质渗漏,有助于维持黄瓜植株正常的细胞结构和生理功能。

可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸等作为植物重要的渗透调节物质,在逆境条件下能够维持细胞的渗透压,增强细胞吸水和保水能力<sup>[23]</sup>。因此,提高植物细胞在逆境条件下的渗透调节物质积累能力,可在缓解逆境对植物体造成的伤害过程中发挥重要作用<sup>[21,23]</sup>。在本研究中,叶面喷施Ca<sup>2+</sup>后,高温处理下的黄瓜叶片可溶性蛋白和脯氨酸含量均高于CK,表明叶面喷施氯化钙主要通过提高可溶性蛋白和脯氨酸含量来发挥渗透调节作用。且在不同处理中,T1~T4处理均显著提高了可溶性蛋白和脯氨酸含量,随外源Ca<sup>2+</sup>浓度的增加呈现出先升高后降

低的变化趋势,表明Ca<sup>2+</sup>对可溶性蛋白和脯氨酸含量的调控存在剂量效应,而10 mmol·L<sup>-1</sup>Ca<sup>2+</sup>对可溶性蛋白和脯氨酸含量的增加效果最显著,与10 mmol·L<sup>-1</sup>Ca<sup>2+</sup>处理通过促进滨梅幼苗在高温下可溶性蛋白和脯氨酸等渗透调节物质的积累来提高高温耐受性的研究结论一致<sup>[9]</sup>。本研究结果表明,通过喷施Ca<sup>2+</sup>能够促进高温下黄瓜叶片可溶性蛋白和脯氨酸的积累,缓解高温胁迫导致的植物萎蔫和渗透胁迫伤害。前人研究中,可溶性蛋白的增加有助于提高细胞质浓度,降低渗透势,增强吸水和保水能力;脯氨酸作为高效的渗透调节剂,具备强大的羟基自由基清除能力、对酶和膜蛋白的稳定作用以及作为碳源和氮源储备的功能<sup>[21,23]</sup>。因此,黄瓜中Ca<sup>2+</sup>信号触发的渗透调节物质积累与抗氧化酶提供的氧化防御能力之间可能存在协同效应。

在逆境条件下,活性氧的过度积累对光合器官及许多生物功能分子均有破坏作用<sup>[24]</sup>。最大光化学效率F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>表示植物光合作用的整体效率以及光能利用效率,能够反映逆境条件下光合系统II(PSII)的受损伤程度和植株逆境下的受胁迫程度<sup>[25]</sup>。本试验中,不同浓度Ca<sup>2+</sup>处理后的黄瓜植株在高温处理下的F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>相对于CK均呈上升趋势,随外源Ca<sup>2+</sup>浓度的增加呈先升后降的趋势,在10 mmol·L<sup>-1</sup>处理浓度时的效果最为显著,与10 mmol·L<sup>-1</sup>Ca<sup>2+</sup>处理能够有效缓解高温对西葫芦光合系统损伤的研究结果一致<sup>[8]</sup>。逆境导致的F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>下降通常源于活性氧对光合系统的攻击<sup>[25]</sup>。外源Ca<sup>2+</sup>处理显著提升了高温胁迫下的F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>,表明它有效缓解了高温对PSII反应中心的损伤。这种保护作用很可能源于外源Ca<sup>2+</sup>对高温下黄瓜幼苗中抗氧化酶活性增强和渗透调节物质的积累,降低了黄瓜幼苗在高温条件下的过氧化水平。另外,10 mmol·L<sup>-1</sup>浓度的外源Ca<sup>2+</sup>处理后的黄瓜幼苗在高温下的根系活力显著高于CK,表明外源Ca<sup>2+</sup>在缓解高温胁迫对黄瓜幼苗根生长的抑制中也发挥了积极作用。根系是植株吸取水分及养分的重要器官<sup>[26]</sup>,高温下幼苗根系活力的维持可为黄瓜幼苗的正常生理需求提供保障。综上,外源Ca<sup>2+</sup>处理改善了黄瓜幼苗在高温环境下的最大光化学效率,可为根系提供更充足的光合产物;植株增强的根系活力也可为地上部供给充足的水分和养分,从而可能在黄瓜植株中形成一个由外源Ca<sup>2+</sup>诱导的地上-地下协调响应的正反馈循环,加强植株的高温抗性。

综上所述,通过不同浓度外源Ca<sup>2+</sup>喷施黄瓜幼

苗及高温处理后的指标检测,结果表明,叶面喷施外源  $\text{Ca}^{2+}$  可有效缓解细胞损伤,增强黄瓜幼苗对高温胁迫的抵抗能力。外源  $\text{Ca}^{2+}$  可能通过提高高温胁迫下黄瓜幼苗抗氧化酶活性和渗透调节物质含量,增强作物抗氧化水平和维持最大光化学效率及根系活力,从而有效缓解高温对幼苗的伤害。综合分析不同处理高温胁迫下的生理生化指标,10  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$  为提高黄瓜幼苗耐热性的适宜浓度。本研究结果为喷施外源  $\text{Ca}^{2+}$  缓解高温胁迫下黄瓜植株伤害提供了理论依据,能够为黄瓜产业的可持续发展起到促进作用。

### 参考文献

- [1] 王志远. *CsHsfA2 调控黄瓜耐热性分子机理研究*[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2024.
- [2] YU B W, YAN S S, ZHOU H Y, et al. Overexpression of *CsCaM3* improves high temperature tolerance in cucumber[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 797.
- [3] 杨寅桂, 李为观, 娄群峰, 等. 黄瓜耐热性研究进展[J]. 中国瓜菜, 2007, 18(5): 30-34.
- [4] 孙亚玲, 臧传江, 姚甜甜, 等. 我国黄瓜耐热性研究进展[J]. 中国果菜, 2018, 38(10): 57-62.
- [5] 张政委, 索琳格, 吴佩, 等.  $\text{Ca}^{2+}$  参与外源 NO 增强低温胁迫下黄瓜幼苗叶片抗氧化能力[J]. 核农学报, 2018, 32(3): 600-608.
- [6] 赵文麟, 张新梅, 梁飞飞, 等. 钙离子及其抑制剂对盐胁迫下黄瓜幼苗形态建成的影响[J]. 北方园艺, 2024(16): 1-8.
- [7] 张铭顺, 吕福堂, 褚鹏飞, 等. 外源  $\text{Ca}^{2+}$  提高百合耐热性的生理机制初探[J]. 河南农业科学, 2019, 54(2): 120-125.
- [8] 秦舒浩, 李玲玲, 陈娜娜, 等. 外源  $\text{Ca}^{2+}$  对高温强光下西葫芦幼苗形态特征、光合特性及荧光参数的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2830-2835.
- [9] 宰学明, 夏连全, 闫道良, 等. 外源  $\text{Ca}^{2+}$  对高温强光胁迫下滨梅幼苗的保护效应[J]. 西北植物学报, 2011, 31(3): 558-563.
- [10] 高宝云, 石思彤, 姚江涛, 等. 外源褪黑素对铅胁迫下小麦幼苗生长和生理特性的影响[J]. 作物研究, 2025, 39(1): 11-15.
- [11] YIN Y X, GUO W L, ZHANG Y L, et al. Cloning and characterization of a pepper aquaporin, *CaAQP*, which reduces chilling stress in transgenic tobacco plants[J]. *Plant Cell Tissue and Organ Culture*, 2014, 118(3): 431-444.
- [12] 沈亚鑫, 周鹏羽, 倪照君, 等. 外源水杨酸和褪黑素提高桃树连作障碍抗性的研究[J]. 中国果树, 2023(9): 21-26.
- [13] NAKANO Y, ASADA K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts[J]. *Plant and Cell Physiology*, 1981, 22(5): 867-880.
- [14] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [15] WU J, ZHAI Y J, MONIKH F A, et al. The differences between the effects of a nanoformulation and a conventional form of atrazine to lettuce: Physiological responses, defense mechanisms, and nutrient displacement[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(42): 12527-12540.
- [16] GAY C, GEBICKI J M. A critical evaluation of the effect of sorbitol on the ferric-xylenol orange hydroperoxide assay[J]. *Analytical Biochemistry*, 2000, 284(2): 217-220.
- [17] GONG X Q, SHI S T, DOU F F, et al. Exogenous melatonin alleviates alkaline stress in *Malus hupehensis* Rehd. by regulating the biosynthesis of polyamines[J]. *Molecules*, 2017, 22(9): 1542.
- [18] 王博伟, 陈艳丽, 朱国鹏, 等. 叶面喷施氯化钙对海南高温季节水培生菜生长生理的影响[J]. 中国瓜菜, 2021, 34(4): 94-98.
- [19] 陈露露, 王秀峰, 刘美, 等. 钙与脱落酸对干旱胁迫下黄瓜幼苗光合及相关酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3996-4002.
- [20] GAO Y, YANG J, DUAN W, et al. NtRAV4 negatively regulates drought tolerance in *Nicotiana tabacum* by enhancing antioxidant capacity and defence system[J]. *Plant Cell Reports*, 2022, 41(8): 1775-1788.
- [21] WANG H, ZHANG W H, ZHENG D W, et al. Transcription factor CITCP4 maintains watermelon resilience to drought by stabilizing antioxidant and photosynthetic systems[J]. *Plant Cell Reports*, 2025, 44(7): 168.
- [22] CRUZ D, CARVALHO M H. Drought stress and reactive oxygen species: Production, scavenging and signaling[J]. *Plant Signaling and Behavior*, 2008, 3(3): 156-165.
- [23] 何晓明, 林毓娥, 陈清华, 等. 高温对黄瓜幼苗生长、脯氨酸含量及 SOD 酶活性的影响[J]. 上海交通大学学报(农业版), 2002, 20(1): 30-33.
- [24] KAR R K. Plant responses to water stress: Role of reactive oxygen species[J]. *Plant Signaling and Behavior*, 2011, 6(11): 1741-1745.
- [25] ZHUANG J, WANG Y L, CHI Y G, et al. Drought stress strengthens the link between chlorophyll fluorescence parameters and photosynthetic traits[J]. *PeerJ*, 2020, 8: e10046.
- [26] 王隆金, 宋世佳, 苗童童, 等. 褪黑素对渗透胁迫下植物根系形态建成影响及调控机理研究进展[J]. 中国生态农业学报, 1-11[2025-07-28]. <https://link.cnki.net/urlid/13.1432.S.20250728.1259.001>.