

引用格式:

廖铭宇, 徐欢, 张俊华, 曹超政, 程纬韬, 周书栋, 杨博智. 外源 GA₃ 处理对辣椒半矮秆突变体表型和生理特征的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(3): 41–46.

LIAO M Y, XU H, ZHANG J H, CAO C Z, CHENG W T, ZHOU S D, YANG B Z. Effects of exogenous GA₃ treatment on phenotype and physiological characteristics of a semi-dwarf mutant of pepper[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2024, 50(3): 41–46.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



外源 GA₃ 处理对辣椒半矮秆突变体表型和生理特征的影响

廖铭宇¹, 徐欢¹, 张俊华¹, 曹超政¹, 程纬韬¹, 周书栋², 杨博智^{1*}

(1.湖南农业大学园艺学院, 湖南 长沙 410128; 2.湖南省蔬菜研究所, 湖南 长沙 410125)

摘 要: 分别用 1.0、2.0、4.0、8.0 mg/L 的 GA₃ 处理辣椒半矮秆突变体 *E483* 的种子, 分别用 2.0、4.0、6.0、8.0、10.0、12.0 mg/L 的 GA₃ 喷施 *E483* 幼苗, 以 0.0 mg/L 的 GA₃ 处理的野生型 6421(CK1)和 *E483*(CK2)为对照, 调查 GA₃ 处理下 *E483* 种子萌发情况和植株表型, 并测定幼苗叶片内源 GA、可溶性糖、可溶性蛋白、MDA 含量以及 SOD、CAT、POD、GR 活性。结果表明: *E483* 种子萌发速度低于野生型 6421 的, GA₃ 处理可提高 *E483* 种子发芽势, 且在 2.0、4.0、8.0 mg/L GA₃ 处理下, *E483* 种子发芽能力可恢复至野生型 6421 种子的发芽能力; *E483* 植株较 6421 矮, 叶片较 6421 小, 喷施 GA₃ 处理可促使 *E483* 幼苗茎秆节间伸长、茎增粗、叶面积增大, 但不会改变其节位数; 8.0 mg/L GA₃ 处理的 *E483* 的株高与 6421 的株高无显著差异; 2.0 mg/L GA₃ 处理的 *E483* 茎粗与 6421 茎粗无显著差异; 6.0 mg/L GA₃ 处理的 *E483* 的叶宽、叶面积与 6421 幼苗的叶面积无显著差异; *E483* 幼苗中 GA₁、GA₃、GA₂₀、GA₂₉、GA₃₄ 含量显著低于 6421 相应的值, 推测该突变体属于 GA 合成缺陷突变体; *E483* 叶片中可溶性糖、可溶性蛋白含量及 SOD、CAT、POD、GR 活性均显著高于 6421 的, MDA 含量显著低于 6421 的; 10.0 mg/L GA₃ 处理的 *E483* 叶片中可溶性糖、可溶性蛋白含量和 SOD、CAT、POD 活性达到最大值。

关 键 词: 辣椒; 半矮秆突变体; GA₃; 表型; 生理指标

中图分类号: S641.3

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2024)03-0041-06

Effects of exogenous GA₃ treatment on phenotype and physiological characteristics of a semi-dwarf mutant of pepper

LIAO Mingyu¹, XU Huan¹, ZHANG Junhua¹, CAO Chaozheng¹, CHENG Weitao¹, ZHOU Shudong², YANG Bozhi^{1*}

(1.College of Horticulture, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.Hunan Vegetable Research Institute, Changsha, Hunan 410125, China)

Abstract: In this study, four concentrations(1.0, 2.0, 4.0, 8.0 mg/L) of GA₃ solution were used to treat the seeds of the semi-dwarf mutant *E483*, respectively, and the seedlings of *E483* were sprayed with 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 12.0 mg/L GA₃ solution, respectively, and wild-type 6421(CK1) and 0.0 mg/L GA₃-treated *E483*(CK2) was taken as the control. The seed germination and plant phenotype of *E483* were investigated under GA₃ solution treatment, and the soluble sugar, soluble protein and MDA contents, as well as the activities of SOD, CAT, POD and GR were determined in the leaves of the seedlings. The results showed that the germination potential of *E483* seeds was significantly lower than that of 6421 seeds, and the germination potential of *E483* seeds treated with 2.0, 4.0, 8.0 mg/L GA₃ solution could be restored to that of 6421 seeds. The height and leaf area of *E483* plants were smaller than those of 6421, and the GA₃ solution treatment could induce the elongation of the internodes of the stalks, stem thickening, and the increase of the leaf area of *E483* but

收稿日期: 2023-08-17

修回日期: 2024-04-02

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2022JJ30301)

作者简介: 廖铭宇(1999—), 女, 重庆人, 硕士研究生, 主要从事辣椒生物技术研究, liaomingyu369@163.com; *通信作者, 杨博智, 博士, 副教授, 主要从事辣椒生物技术研究, yangy_1223@163.com

GA₃ solution treatment could not change the number of nodes of *E483*. The plant height of *E483* treated with 8.0 mg/L GA₃ solution showed no significant difference from that of the 6421. The stem diameter of *E483* treated with 2.0 mg/L GA₃ solution also showed no significant difference from that of the 6421. Additionally, the leaf width and leaf area of *E483* treated with 6.0 mg/L GA₃ solution did not significantly differ from 6421. The contents of GA₁, GA₃, GA₂₀, GA₂₉ and GA₃₄ in *E483* seedlings were significantly lower than those in 6421, suggesting that the mutant was a GA synthesis defective mutant. The contents of soluble sugar and soluble protein, as well as the activities of SOD, CAT, POD and GR in *E483* leaves, were significantly higher than those of 6421, while the MDA content was significantly lower than that of 6421. The soluble sugar, soluble protein contents and SOD, CAT, and POD activities in *E483* leaves treated with 10.0 mg/L GA₃ were all the highest.

Keywords: pepper; semi-dwarf mutant; GA₃; phenotype; physiological index

近年来,中国辣椒设施栽培面积不断扩大,约占辣椒总栽培面积的 26%^[1]。随着生产力水平的进一步提高,未来设施栽培将成为推进辣椒产业现代化的重要标志。半矮秆辣椒不易徒长、抗倒伏性强、可密植,适用于设施栽培。矮化变异与激素调控密切相关,GA(赤霉素)、BR(油菜素内酯)和 IAA(生长素)是调控植株高度的三大重要激素,三者中任何一种合成途径变异受阻或信号转导途径出现障碍均可导致植株株高变矮^[2-3]。

前期通过 EMS 诱变辣椒自交系 6421 获得了 1 个半矮秆突变体 *E483*^[4]。为探究其突变性状是否与 GA 相关,本研究拟采用不同质量浓度的外源 GA₃ 处理半矮秆突变体 *E483* 的种子和幼苗,分析 GA₃ 处理对 *E483* 种子萌发、幼苗表型及生理特性的影响,旨在了解辣椒半矮秆突变体 *E483* 株高变异的机理。

1 材料与方法

1.1 材料

辣椒高代自交系 6421、半矮秆突变体 *E483*(已连续自交 3 代,突变性状能稳定遗传)由湖南省农业科学院蔬菜研究所提供。

1.2 方法

1.2.1 辣椒种子的处理

取 *E483* 的饱满种子,用 5% 的次氯酸钠消毒 15 min 后用无菌水冲洗 3 次,接种至添加不同质量浓度(1.0、2.0、4.0、8.0 mg/L) GA₃ 的 1/2MS 培养基中,每瓶接种 30 粒,以在不添加 GA₃ 的 1/2MS

培养基中接种的野生型 6421 种子(CK1)和 *E483* 种子(CK2)为对照,(26±2)℃ 暗培养至种子萌发。第 5 天和第 7 天分别统计种子萌芽数,计算各处理下辣椒种子的发芽势和发芽率。

1.2.2 辣椒幼苗的处理

取 6421、*E483* 饱满种子播种至营养块中,培养至植株 4 叶期时,选取长势一致的植株,种植于人工气候室,室内温度为(24±2)℃/(18±2)℃(光照/黑暗),光照时间为 16 h/d,光照度为 4 000 lx。每个处理选择 15 株长势一致的 *E483* 幼苗,分别喷施不同质量浓度(2.0、4.0、6.0、8.0、10.0、12.0 mg/L)的 GA₃ 溶液,6421 植株(CK1)和 *E483* 对照处理植株(CK2)喷施相等体积的蒸馏水。连续喷施 8 d 后观察辣椒幼苗的形态特征,测定株高、茎粗、节位数,以及植株顶端生长点向下第 4 片完全展开叶的叶长、叶宽、叶面积,计算叶片长宽比。

1.2.3 辣椒幼苗生理指标的测定

分别取 6421(CK1)、*E483*(CK2)和各 GA₃ 处理的 *E483* 幼苗顶端生长点向下第 4 ~ 6 片完全展开叶,采用北京索莱宝生物科技有限公司生产的试剂盒测定可溶性糖、可溶性蛋白、MDA 含量,以及 CAT、POD、SOD、GR 活性。分析不同质量浓度 GA₃ 处理对 *E483* 植株生理指标的影响。

1.2.4 辣椒幼苗 GA 含量的测定

分别取未经 GA₃ 处理的 6421 和 *E483* 幼苗(4 叶期)叶片,加入液氮,研磨成粉末,采用 HPLC-MS/MS 测定 18 种 GA(GA₁、GA₃、GA₄、GA₅、GA₆、GA₇、GA₈、GA₉、GA₁₃、GA₁₄、GA₁₅、GA₁₉、

GA₂₀、GA₂₄、GA₂₉、GA₄₄、GA₅₁、GA₅₃)含量。

1.2.5 数据处理与分析

除 GA 含量检测重复 3 次外,其他试验均重复 5 次,结果用平均值±标准差表示。采用 WPS Office 进行数据分析并绘图;采用 SPSS 23.0 对数据进行方差分析,选用最小显著差数法(LSD 法)进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 GA₃ 处理对 E483 种子萌发的影响

由表 1 可知,0.0 mg/L GA₃ 处理下,E483 种子的发芽势显著低于 6421 种子的发芽势。GA₃ 处理可

表 1 不同质量浓度 GA₃ 处理的 E483 种子的发芽势与发芽率

Table 1 Germination potentials and germination rates of E483 seeds treated with different mass concentrations of GA₃ solution

材料	GA ₃ 质量浓度/ (mg L ⁻¹)	发芽势/%	发芽率/%
6421	0.0(CK1)	(91.11±1.42)a	100.00±0.00
E483	0.0(CK2)	(78.89±4.17)b	100.00±0.00
	1.0	(81.11±4.89)b	100.00±0.00
	2.0	(92.22±1.92)a	100.00±0.00
	4.0	(93.33±3.33)a	100.00±0.00
	8.0	(95.56±3.85)a	100.00±0.00

同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

表 2 不同质量浓度 GA₃ 处理的 E483 株高、茎粗和节位数

Table 2 Plant heights, stem diameters and numbers of stem nodes of E483 treated with different mass concentrations of GA₃ solution

材料	GA ₃ 质量浓度/(mg L ⁻¹)	株高/cm	茎粗/mm	节位数
6421	0.0(CK1)	(10.25±0.21)a	(4.05±0.22)cd	7.00±0.00
E483	0.0(CK2)	(5.45±0.07)f	(3.95±0.06)d	7.00±0.00
	2.0	(8.00±0.14)e	(4.35±0.20)bc	7.00±0.00
	4.0	(8.44±0.08)d	(4.40±0.15)ab	7.00±0.00
	6.0	(9.65±0.21)b	(4.50±0.26)ab	7.33±0.58
	8.0	(10.13±0.04)a	(4.60±0.13)ab	7.00±0.00
	10.0	(9.35±0.21)c	(4.65±0.10)ab	7.00±0.00
	12.0	(9.45±0.07)bc	(4.70±0.23)a	7.67±0.58

同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

2.2.2 叶的形态指标

由表 3 可知,0.0 mg/L GA₃ 处理下,CK2 幼苗的叶长、叶宽、叶面积均显著小于 CK1 幼苗的。GA₃ 处理可促进 E483 叶片变长、变宽,叶面积及叶片长宽比增大。4.0、6.0、8.0 mg/L GA₃ 处理的 E483 叶宽与 6421 的无显著差异,6.0 mg/L GA₃ 处理的

提高 E483 种子的发芽势,2.0、4.0、8.0 mg/L GA₃ 处理的 E483 种子发芽势均显著高于 E483 对照(CK2),且在该质量浓度的 GA₃ 处理下,E483 种子的发芽势与 6421 的无显著差异;GA₃ 处理的 E483 发芽率与 CK1、CK2 的发芽率无差异,均为 100%。说明 E483 种子能正常萌发,只是其萌发时间较长,而适宜质量浓度的 GA₃ 处理可提高 E483 种子萌芽速度,使其与 6421 的发芽势一致。

2.2 GA₃ 处理对 E483 幼苗表型的影响

2.2.1 茎的形态指标

由表 2 可知,0.0 mg/L GA₃ 处理下,E483 植株株高显著低于 6421 的,茎粗略小于 6421 的,茎粗、节位数与 6421 的无显著性差异。GA₃ 处理可促进 E483 植株增高、茎秆变粗。各质量浓度 GA₃ 处理下的 E483 株高、茎粗均显著高于 CK2 的。8.0 mg/L GA₃ 处理的 E483 株高与 CK1 的株高无显著性差异,2.0 mg/L GA₃ 处理的 E483 茎粗与 CK1 的茎粗无显著差异。不同质量浓度 GA₃ 处理的 E483 节位数与 CK1 的节位数也无显著性差异。说明喷施适宜质量浓度的 GA₃ 可使 E483 的茎形态恢复至 6421(CK1)的茎形态,但不会改变 E483 的节位数。

E483 叶面积与 6421 的无显著差异,2.0 mg/L GA₃ 处理的 E483 叶片长宽比与 CK1、CK2 的无显著差异,但各质量浓度 GA₃ 处理下的 E483 叶长均显著低于 6421 的。说明除叶长外,喷施适宜质量浓度的 GA₃ 可使 E483 的叶片基本恢复至 6421 的形态。

表 3 不同质量浓度 GA₃ 处理的 E483 叶长、叶宽、叶面积及叶片长宽比

Table 3 Leaf lengths, leaf widths, leaf areas and leaf length-width ratios of E483 treated with different mass concentrations of GA ₃ solution					
材料	GA ₃ 质量浓度/(mg L ⁻¹)	叶长/cm	叶宽/cm	叶面积/cm ²	叶片长宽比
6421	0.0 (CK1)	(7.25±0.35)a	(3.15±0.21)a	(14.69±1.08)a	(2.31±0.18)a
E483	0.0 (CK2)	(4.40±0.34)d	(2.45±0.35)d	(9.02±0.90)e	(1.94±0.18)ab
	2.0	(5.15±0.20)bc	(2.65±0.21)cd	(11.01±1.25)cd	(1.95±0.19)ab
	4.0	(5.40±0.25)b	(3.00±0.13)ab	(13.31±1.10)b	(1.80±0.27)b
	6.0	(5.53±0.12)b	(3.28±0.04)a	(14.70±0.28)a	(1.69±0.28)b
	8.0	(5.41±0.10)b	(3.01±0.05)ab	(13.31±0.08)b	(1.80±0.24)b
	10.0	(5.30±0.24)b	(2.76±0.14)bc	(11.85±0.12)c	(1.93±0.12)b
	12.0	(4.88±0.20)c	(2.58±0.07)cd	(10.23±0.10)de	(1.90±0.24)b

同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

2.3 GA₃ 处理对 E483 叶片的可溶性糖、可溶性蛋白和 MDA 含量的影响

由表 4 可知, 0.0 mg/L GA₃ 处理下, CK2 叶片的可溶性糖、可溶性蛋白含量均显著高于 CK1 的, MDA 含量显著低于 CK1 的。各质量浓度 GA₃ 处理的 E483 叶片中的可溶性糖、可溶性蛋白含量显著

高于 CK1、CK2 的, MDA 含量显著低于 CK1、CK2 的。说明 GA₃ 处理可促进 E483 叶片可溶性糖、可溶性蛋白的产生, 抑制 MDA 的生成。GA₃ 处理浓度为 10.0 mg/L 时, E483 叶片的可溶性糖含量达到最大值; GA₃ 处理浓度为 10.0 mg/L 时, E483 叶片可溶性蛋白含量较高、MDA 含量较低, 说明 10.0 mg/L GA₃ 处理为提高 E483 植株抗逆性的最适浓度。

表 4 不同质量浓度 GA₃ 处理 E483 的可溶性糖、可溶性蛋白和 MDA 含量

Table 4 Soluble sugar, soluble protein and MDA contents of E483 treated with different mass concentrations of GA ₃ solution				
材料	GA ₃ 质量浓度/(mg L ⁻¹)	可溶性糖含量/(mg g ⁻¹)	可溶性蛋白含量/(mg g ⁻¹)	MDA 含量/(nmol g ⁻¹)
6421	0.0 (CK1)	(6.83±0.76)e	(19.00±2.65)e	(37.65±4.52)a
E483	0.0 (CK2)	(11.88±2.14)d	(31.00±3.61)d	(10.18±0.48)b
	2.0	(13.98±0.08)c	(37.33±1.15)c	(7.32±0.14)c
	4.0	(15.07±0.18)bc	(39.67±0.58)bc	(5.83±0.08)cd
	6.0	(15.65±0.20)ab	(41.00±1.00)ab	(5.07±0.05)cd
	8.0	(16.31±0.08)ab	(43.00±1.00)a	(4.84±0.03)cd
	10.0	(16.71±0.20)a	(42.33±0.58)ab	(4.55±0.06)cd
	12.0	(16.60±0.32)a	(41.68±0.68)ab	(4.42±0.13)d

同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

2.4 GA₃ 处理对 E483 叶片的 CAT、SOD、POD 与 GR 活性的影响

由表 5 可以看出, 0.0 mg/L GA₃ 处理下, E483 叶片的 CAT、SOD、POD 及 GR 活性均显著高于 6421 的。GA₃ 处理下, E483 中的 CAT、SOD、POD 及

GR 活性均显著高于 CK1、CK2 的。可见, GA₃ 处理可提高 E483 叶片中 4 种抗氧化酶的活性。GA₃ 处理浓度为 10.0 mg/L 时, CAT、SOD、POD 活性达到最大值, 说明 10.0 mg/L GA₃ 处理可有效提高 E483 植株的抗逆性。

表 5 不同质量浓度 GA₃ 处理的 E483 CAT、SOD、POD 和 GR 活性

Table 5 CAT, SOD, MDA and GR activities of E483 treated with different mass concentrations of GA ₃ solution						U/g
材料	质量浓度/(mg L ⁻¹)	CAT 活性	SOD 活性	POD 活性	GR 活性	
6421	0.0 (CK1)	(114.67±11.24)d	(359.67±36.69)e	(406.67±20.11)e	(1.05±0.09)g	
E483	0.0 (CK2)	(232.67±18.72)c	(491.00±13.45)d	(803.33±17.50)d	(1.48±0.06)f	
	2.0	(268.33±6.11)b	(543.33±10.02)c	(906.00±6.00)c	(2.46±0.08)e	
	4.0	(286.00±5.29)a	(573.33±6.11)b	(965.00±7.00)b	(2.79±0.02)d	
	6.0	(292.00±4.58)a	(596.33±3.51)ab	(979.33±4.04)ab	(3.13±0.14)c	
	8.0	(300.00±5.29)a	(620.33±3.06)a	(989.33±6.43)a	(3.55±0.09)b	
	10.0	(301.67±9.07)a	(621.67±10.60)a	(991.33±9.29)a	(3.74±0.16)a	
	12.0	(301.00±2.65)a	(615.00±6.00)a	(988.00±3.61)a	(3.85±0.06)a	

同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

2.5 6421 和 E483 幼苗的内源 GA 含量比较

从 6421、E483 叶片共检测出来了 5 种 GA，分别为 GA₁、GA₃、GA₂₀、GA₂₉ 和 GA₃₄。由表 6 可知，E483 叶片中 GA₁、GA₃、GA₂₉、GA₃₄ 含量均

显著低于 6421 的，分别为 6421 的 83.75%、9.34%、75.00%、20.83%。6421 叶片中 GA₂₀ 含量较高，为 1.63 ng/mg，而 E483 叶片中未检出 GA₂₀。

表 6 6421 和 E483 幼苗叶片中 GA 含量

Table 6 Gibberellins content of the leaves between 6421 and E483 seedlings					ng/mg
材料	GA ₁ 含量	GA ₃ 含量	GA ₂₀ 含量	GA ₂₉ 含量	GA ₃₄ 含量
6421	(0.80±0.06)a	(1.82±0.08)a	(1.63±0.02)a	(1.60±0.13)a	(0.24±0.02)a
E483	(0.67±0.04)b	(0.17±0.07)b	(0.00±0.00)b	(1.20±0.10)b	(0.05±0.02)b

同列不同字母表示材料间的差异有统计学意义(P<0.05)。

3 结论与讨论

肖佳林等^[4]研究表明，辣椒半矮秆突变体 E483 与野生型 6421 相比，表现出植株半矮化、叶面积变小、果实变短、抗性生理指标增加等特征。本研究中，E483 种子能正常萌发，但其萌发能力弱于 6421。前人研究表明，对于部分 GAs 缺陷型突变体，如拟南芥突变体 *gal*^[5]、*gal-3*^[6]，种子不能正常萌发，需通过外源 GA 处理才能正常萌发；但也存在一些 GA 缺陷型突变体种子不需要 GA 处理也能正常萌发，只是种子休眠期延长，如水稻半矮秆突变体 *sdwrky*^[7]、大麦 *ga3ox1* 突变体^[8]等。本试验对 6421、E483 种子进行 GA₃ 敏感性响应分析，发现 2.0、4.0、8.0 mg/L 外源 GA₃ 处理可提高 E483 种子的发芽势，且可以使萌芽能力较差的 E483 种子发芽势提高至 6421 种子的萌芽水平。

GA 合成缺陷型突变体表现为株高较矮、节间距短、叶片小、叶色深绿等特征，外施 GA₃ 可使其表型恢复或部分恢复至野生型表型^[9-11]。本试验发现，喷施 GA₃ 可显著促进 E483 幼苗植株生长，表现为株高、茎粗、叶长、叶宽增加，叶面积增大。8.0 mg/L GA₃ 处理下，E483 的株高与 6421 的株高无显著性差异，2.0 mg/L GA₃ 处理的 E483 茎粗与 6421 的茎粗无显著差异。6.0 mg/L GA₃ 处理的 E483 叶宽、叶面积与 6421 的无显著差异，说明适宜质量浓度 GA₃ 处理可使 E483 幼苗茎形态和部分叶形态恢复至 6421 的表型。由此初步推断 E483 半矮化突变体与植株体内 GA 合成缺陷有关。

对于激素合成缺陷型突变体，其内源激素含量通常显著低于野生型的^[12-13]。本研究中，检测了 6421、E483 幼苗叶片中 18 种内源 GA 含量，仅检测到了 5 种 GA，E483 中的 GA₁、GA₃、GA₂₀、GA₂₉

和 GA₃₄ 含量显著低于 6421 相应的值，可进一步推断该突变体属于 GA 合成缺陷突变体。

研究^[14-15]表明，GA 广泛参与调控植物胁迫适应性生长。GA₃ 可通过调节植株渗透压、启动保护酶系统、改变膜结构等来提高其抗逆能力^[16-17]。彭亮等^[18]研究表明，添加 GA₃ 的霍兰格溶液培养茜草实生苗，可提高其叶片中游离脯氨酸和总蛋白含量；用 GA₃ 溶液喷施茶树叶片，可提高茶叶中抗坏血酸氧化酶和 PPO、CAT、POD、SOD 活性，降低 ATP 酶活性^[19]；GA₃ 处理 NaCl 胁迫下的泡桐种子，可增强其幼苗中脯氨酸含量和 SOD、POD、CAT 活性，降低 MDA 含量^[20]；GA₃ 预处理干旱胁迫下的大麻种子可显著提高幼苗中渗透调节物质(可溶性糖和可溶性蛋白)含量和抗氧化酶(SOD、POD)活性，显著降低 MDA 含量^[21]。本研究中，2.0~12.0 mg/L GA₃ 处理均可促进 E483 中可溶性糖、可溶性蛋白的积累，提高 CAT、SOD、POD、GR 活性，抑制 MDA 的生成，以 10.0 mg/L GA₃ 处理的抗逆效果最佳。

参考文献：

[1] 邹学校, 马艳青, 戴雄泽, 等. 辣椒在中国的传播与产业发展[J]. 园艺学报, 2020, 47(9): 1715-1726.

[2] 许智宏, 薛红卫. 植物激素作用的分子机理[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2012.

[3] 杨博智, 周书栋, 杨莉颖, 等. 辣椒矮秆突变体的表型及其对外源激素的响应[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2017, 43(5): 518-523.

[4] 肖佳林, 李丽缘, 黄湖荣, 等. 辣椒半矮秆突变体 E483 的表型鉴定和生理分析[J]. 中国蔬菜, 2022(7): 62-68.

[5] NORTH H, BAUD S, DEBEAUJON I, et al. *Arabidopsis* seed secrets unravelled after a decade of genetic and omics-driven research[J]. The Plant Journal, 2010, 61(6): 971-981.

[6] GALLARDO K, JOB C, GROOT S P C, et al.

- Proteomics of *Arabidopsis* seed germination. A comparative study of wild-type and gibberellin-deficient seeds[J]. *Plant Physiology*, 2002, 129(2): 823–837.
- [7] 张永华. 一株水稻 Ds 插入半矮秆突变体(*sdwrky*)的表型和分子鉴定研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2010.
- [8] CHENG J Y, HILL C, HAN Y, et al. New semi-dwarfing alleles with increased coleoptile length by gene editing of *gibberellin 3-oxidase 1* using CRISPR-Cas9 in barley (*Hordeum vulgare* L.)[J]. *Plant Biotechnology Journal*, 2023, 21(4): 806–818.
- [9] ZHANG C, SUN J L, JIA Y H, et al. Morphological characters, inheritance and response to exogenous hormones of a cotton super-dwarf mutant of *Gossypium hirsutum*[J]. *Plant Breeding*, 2011, 130(1): 67–72.
- [10] CHEN S, WANG X J, ZHANG L Y, et al. Identification and characterization of tomato gibberellin 2-oxidases (GA2oxs) and effects of fruit-specific *SIGA2ox1* overexpression on fruit and seed growth and development[J]. *Horticulture Research*, 2016, 3: 16059.
- [11] 刘磊, 詹为民, 丁武思, 等. 玉米矮化突变体 *gad39* 的遗传分析与分子鉴定[J]. *作物学报*, 2022, 48(4): 886–895.
- [12] 李欢倪, 仇静静, 马俊杰, 等. 花生半矮化突变体 *sdm1* 的表型分析与赤霉素响应研究[J]. *山东农业科学*, 2017, 49(12): 1–5.
- [13] 张肖逢. 玉米 *ga20ox5* 矮化突变体和转 *ZmGRF1* 基因玉米的鉴定及氮素利用率研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
- [14] GAO X H, XIAO S L, YAO Q F, et al. An updated GA signaling ‘relief of repression’ regulatory model[J]. *Molecular Plant*, 2011, 4(4): 601–606.
- [15] MURCIA G, FONTANA A, PONTIN M, et al. ABA and GA₃ regulate the synthesis of primary and secondary metabolites related to alleviation from biotic and abiotic stresses in grapevine[J]. *Phytochemistry*, 2017, 135: 34–52.
- [16] 高文于, 杨红, 邢震, 等. 外源赤霉素对须弥红豆杉生长生理指标的影响[J]. *四川林业科技*, 2024, 45(1): 8–14.
- [17] 胡国富, 李韦瑶, 肖汇川, 等. ABA 和 GA₃ 对山韭种子萌发、生理特性及内源激素含量的影响[J]. *草地学报*, 2022, 30(9): 2399–2406.
- [18] 彭亮, 罗瑶, 李翡, 等. 外源茉莉酸甲酯和赤霉素对茜草生长、相关酶活性及主要活性成分含量的影响研究[J]. *中草药*, 2022, 53(11): 3463–3471.
- [19] 郭素枝, 张育松, 陈洪德. 赤霉素及矿质元素对茶树活性氧代谢、质膜功能和化学品质的效应[J]. *福建农业大学学报*, 1994, 23(3): 275–279.
- [20] 朱秀红, 任方方, 茹广欣, 等. 赤霉素对盐胁迫下泡桐种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. *种子*, 2021, 40(6): 31–37.
- [21] DU G H, ZHANG H X, YANG Y, et al. Effects of gibberellin pre-treatment on seed germination and seedling physiology characteristics in industrial hemp under drought stress condition[J]. *Life*, 2022, 12(11): 1907.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 柳 正