

# PEG-6000 模拟干旱胁迫对黄秋葵种子萌发和幼苗生理特性的影响

王继玥<sup>1\*</sup>, 石登红<sup>1\*</sup>, 白禹<sup>2</sup>, 杨丹<sup>1</sup>, 张婷<sup>2</sup>, 刘燕<sup>1</sup>

(1. 贵阳学院生物与环境工程学院, 贵阳 550005; 2. 贵州省山地珍稀动物与经济昆虫重点实验室, 贵阳 550005)

**摘要:** 为了解黄秋葵(*Abelmoschus esculentus*)对干旱胁迫的应答机制, 采用 PEG-6000 溶液模拟干旱胁迫, 对‘纤指’和‘红秋葵’品种的种子萌发和幼苗的生理特性进行研究。结果表明, 两品种的种子吸水率、发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数、简易活力指数, 幼苗下胚轴长、根长、苗鲜重和苗干重均随 PEG-6000 浓度的增加呈下降的趋势, 旱害率则不断增加。PEG-6000 浓度为 20% 时, 两品种的种子均未能发芽。幼苗的 SOD、POD 和 CAT 活性和可溶性蛋白、可溶性糖、游离脯氨酸、丙二醛含量随 PEG-6000 浓度的增加而增加, 且均 PEG-6000 浓度为 15% 时最高。因此, 干旱胁迫会抑制黄秋葵种子的萌发, 提高细胞内含物的含量, 同时引发其抗氧化系统的响应。

**关键词:** 黄秋葵; 干旱胁迫; 种子; 生理特性

doi: 10.11926/jtsb.3907

## Effect of Drought Stress with PEG-6000 on Seed Germination and Physiological Properties in *Abelmoschus esculentus*

WANG Ji-yue<sup>1\*</sup>, SHI Deng-hong<sup>1\*</sup>, BAI Yu<sup>2</sup>, YANG Dan<sup>1</sup>, ZHANG Ting<sup>2</sup>, LIU Yan<sup>1</sup>

(1. School of Biological and Environmental Engineering, Guiyang University, Guiyang 550005, China; 2. Guizhou Provincial Key Laboratory for Rare Animal and Economic Insect of the Mountainous Region, Guiyang 550005, China)

**Abstract:** To understand the response mechanism of okra (*Abelmoschus esculentus*) under drought stress, PEG-6000 solution was used to simulate drought stress, the seed germination and physiological traits of seedlings in ‘Qianzhi’ and ‘Red okra’ varieties were studied. The results showed that the water absorption, germination energy, germination rate, germination index, vigor index, simple vigor index of seeds, and hypocotyl length, root length, fresh weight and dry weight of seedlings in two varieties decreased with the concentration of PEG-6000 solution increased, while the drought-injury rate of okra increased. The seeds of two varieties failed to germinate with 20% PEG-6000. The activities of SOD, POD and CAT, and the contents of proline (Pro), soluble protein, soluble sugar and malonaldehyde (MDA) of okra seedlings increased with the concentration of PEG-6000 solution increased, and they reached up to maximum under 15% PEG-6000. So, it was suggested that under drought stress, seed germination of *A. esculentus* was inhibited, the contents of cell inclusion enhanced, and the antioxidant system was stimulated.

收稿日期: 2018-03-19

接受日期: 2018-05-31

**基金项目:** 国家自然科学基金青年项目(31600442); 国家级大学生创新创业训练项目(2018109760007, 2018109760008); 贵州省区域内一流培育建设学科项目(黔教科研发[2017]85 号); 贵州省科技计划项目(黔科合基础[2017]1004); 贵州省教育厅创新群体重大项目(黔教合 KY 字[2018]027); 生态学省级重点学科项目(黔学位合字 ZDXK[2013]08); 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(12)5071]资助

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 31600442), the Project for National Undergraduate Innovation and Entrepreneurship training (Grant No. 2018109760007, 2018109760008), the project for Regional First-class Cultivation and Construction Discipline in Guizhou Province (Grant No. QJKYF[2017]85); the Project for Science and Technology in Guizhou Province (Grant No. QKHJC[2017]1004), the Project for Major Research by Innovation Group in Guizhou Education Department (Grant No. QJHKY[2018]027); the Project for Ecology Provincial Key Discipline (Grant No. ZDXK[2013]08), and the Project for Agricultural Science and Technology Independent Innovation in Jiangsu [Grant No. CX(12)5071].

作者简介: 王继玥(1984~), 男, 博士, 副教授, 研究方向为植物栽培育种。E-mail: acute2803764@163.com

\* 共同第一作者

**Key words:** *Abelmoschus esculentus*; Drought stress; Seed; Physiological property

黄秋葵 (*Abelmoschus esculentus*) 为锦葵科 (Malvaceae) 秋葵属一年生草本植物, 是一种药食兼用型保健蔬菜<sup>[1-2]</sup>。该物种起源于非洲, 西非地区的野生资源最为丰富<sup>[3]</sup>。黄秋葵富含各种维生素和矿物质, 其根、茎、叶和花皆可入药<sup>[4]</sup>。基于重要的食用和药用价值, 近年来黄秋葵成为国内外研究的热点。

干旱是当前农业生产中面临的严峻问题, 缺水会抑制植物的生长、代谢, 进而降低产量, 造成巨大的经济损失<sup>[5]</sup>。Clavel 等<sup>[6]</sup>研究表明, 干旱对作物生长的影响取决于作物的生长时期和水分胁迫的程度。Wang 等<sup>[7]</sup>的研究表明, 干旱胁迫会抑制水稻 (*Oryza sativa*) 幼苗的生长, 显著降低茎和叶的干重。Lemoine 等<sup>[8]</sup>的研究表明, 干旱胁迫对植物地上部分的影响要高于地下部分。黄秋葵为热带作物, 虽具有一定的耐旱性, 但水分对黄秋葵种子萌发仍至关重要, 缺水同样也会影响幼苗的生长和发育。韦吉等<sup>[9]</sup>研究表明, 干旱胁迫下结荚期黄秋葵叶片的相对含水量和叶绿素含量下降, 离体失水率、相对电导率、游离脯氨酸和可溶性蛋白质含量升高。Haq 等<sup>[10]</sup>研究表明, 黄秋葵苗期和整个生育期的耐盐特性无差异, 说明苗期耐盐材料的筛选可作为种质资源抗性鉴定的重要基础, 从而缩短育种进程。目前, 关于黄秋葵抗干旱胁迫的研究较少, 尚不明确其生理和分子机制。本研究采用不同浓度 PEG-6000 模拟干旱胁迫, 探讨干旱胁迫对杂交黄秋葵‘纤指’和‘红秋葵’种子萌发和幼苗生理特性的影响, 为揭示黄秋葵对干旱胁迫的应答机制提供参考依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

黄秋葵 (*Abelmoschus esculentus*) 杂交品种‘纤指’种子由浙江省农业科学院提供, ‘红秋葵’种子由湖南省农业科学院提供。PEG-6000 溶液为模拟干旱胁迫处理剂, 购自于贵州恒英试剂公司。

### 1.2 干旱胁迫

PEG-6000 浓度分别设为 5%、10%、15% 和 20%, 共 4 个干旱胁迫处理。以清水浸种为对照, 每处理 5 次重复。

### 1.3 种子萌发

2 个黄秋葵品种各随机选取 500 粒大小一致、饱满种子, 用 5% 次氯酸溶液消毒后, 再用蒸馏水冲洗 3 次, 摆放在铺有两层滤纸的培养皿内, 每个培养皿 20 粒种子, 种子的 3/4 浸没于处理溶液中。培养皿在光照培养箱 (25℃) 中发芽, 光照 12 h d<sup>-1</sup>, 相对湿度为 (70±1)%。每隔 3 d 换 1 次液体, 从种子置床至第 6 天, 每天测定种子吸水量, 并记录发芽种子数。

在种子萌发期测定种子的吸水量、发芽率、发芽势、根长、下胚轴长、苗鲜重和干重, 并计算发芽指数、活力指数、简易活力指数和旱害率。每处理随机选取 10 粒种子或幼苗进行测量, 取平均值。

吸水量 (%) =  $(W_i - W) / W$ , 发芽率 (%) = 第 7 天发芽的种子数 / 供试种子数 × 100%, 发芽指数 =  $\sum G_t / D_t$ , 发芽势 (%) = 3 d 内发芽种子数 / 供试种子数 × 100%, 活力指数 =  $S \times \sum G_t / D_t$ , 简易活力指数 =  $S \times$  发芽率, 旱害率 (%) = (对照值 - 处理值) / 对照值 × 100%, 式中,  $W_i$  为第  $i$  天的种子质量 (g),  $W$  为种子的干质重 (g);  $G_t$  为置床后  $t$  日的发芽数,  $D_t$  为相应的发芽天数;  $S$  为苗鲜重。

### 1.4 幼苗生理生化指标测定

种子萌发第 6 天取幼苗叶片测量生理生化指标。采用考马斯亮蓝法<sup>[11]</sup>测定可溶性蛋白含量, 采用蒽酮比色法<sup>[12]</sup>测定可溶性糖含量, 采用茚三酮法<sup>[9]</sup>测定游离脯氨酸含量。参照石芸<sup>[13]</sup>的方法测定 MAD 含量和 POD 活性, 参照 Hwang 等<sup>[14]</sup>的方法稍改进测定 SOD 活性, KMnO<sub>4</sub> 滴定法<sup>[13]</sup>测定 CAT 活性。每处理均 5 次重复。

### 1.5 统计分析

试验数据采用 Excel 2010 进行统计整理, 采用 SPASS 10.0 进行分析, 以  $P < 0.05$  和  $P < 0.01$  分别表示处理间差异显著和极显著。

## 2 结果和分析

### 2.1 对种子吸水量的影响

由图 1 可看出, 干旱胁迫下, 黄秋葵两品种的

种子吸水率总体上均明显低于其对照,且种子的吸水率随 PEG-6000 浓度的增加而降低。20% PEG-6000 处理‘红秋葵’种子吸水率持续降低,其余处理的吸水率均呈先上升后下降再升高的变化趋势;‘纤指’的种子吸水率均呈先上升后下降再上升的变化趋势,这说明干旱胁迫会抑制黄秋葵种子对水分的吸收,降低其吸水率。

### 2.2 对萌发性状的影响

由表 1 可知,‘纤指’和‘红秋葵’种子的发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数、简易活力指数和幼苗的下胚轴长、根长、苗鲜重和苗干重均随着 PEG-6000 浓度的增加而降低。在 PEG-6000 浓度为 20% 时,‘纤指’和‘红秋葵’种子均未发芽,当 PEG-6000 浓度为 15% 时,‘红秋葵’种子的发芽势为 0。‘纤指’

种子的发芽率和活力指数和‘红秋葵’种子的发芽率、发芽指数和活力指数在不同处理间均差异显著 ( $P < 0.05$ );与对照相比,在 PEG-6000 浓度为 5% 和 10% 时,‘纤指’种子的发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数、简易活力指数和苗下胚轴长的下降幅度明显高于‘红秋葵’;而在 PEG-6000 浓度为 20% 时则是‘纤指’的明显低于‘红秋葵’。在 PEG-6000 浓度低于 15% 时,‘纤指’幼苗根长和鲜重的下降幅度均高于‘红秋葵’。这说明干旱胁迫抑制了黄秋葵种子的萌发和幼苗的生长,重度胁迫(20% 的 PEG-6000)下黄秋葵种子不能萌发。

### 2.3 对旱害率的影响

由表 2 可以看出,‘纤指’和‘红秋葵’各性状的旱害率随 PEG-6000 浓度的增加而增加。PEG-6000 浓

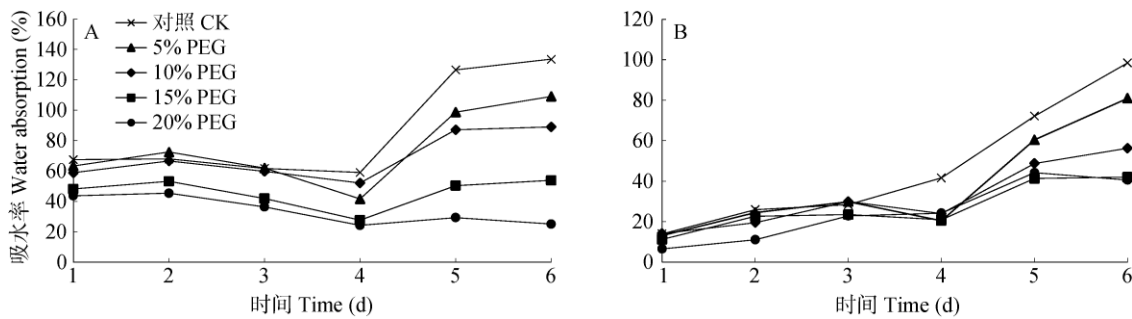


图 1 ‘红秋葵’(A)和‘纤指’(B)种子在 PEG-6000 处理下的吸水率  
Fig. 1 Water absorbing rate of ‘Red okra’ (A) and ‘Qianzhi’ (B) seeds treated by PEG-6000

表 1 干旱胁迫下黄秋葵种子萌发性状的变化

Table 1 Changes in seed germination of two okra varieties under drought stress

品种 Variety	PEG-6000 /%	GE /%	GR /%	GI	VI	GS	HL (cm)	RL (cm)	SFW (g)	SDW (g)
‘纤指’ ‘Qianzhi’	0	15.11a	40.00a	1.64a	0.59a	14.40a	0.57a	1.35a	0.36a	0.05a
	5	13.33b	17.78b	1.33a	0.31a	4.27b	0.47b	1.07a	0.24a	0.05a
	10	2.22c	11.11c	0.38b	0.05b	1.33c	0.47b	0.58b	0.12b	0.04a
	15	2.22c	2.22d	0.17b	0.04b	0.22d	0.32c	0.43b	0.10b	0.04a
	20	0.00d	0.00e	0.00c	0.00c	0.00e	0.00d	0.00c	0.00c	0.00b
‘红秋葵’ ‘Red okra’	0	91.11a	91.11a	10.44a	1.36a	11.84a	0.66a	1.22a	0.13a	0.06a
	5	84.44b	84.44b	9.00b	1.08b	10.13a	0.56a	1.11a	0.12a	0.06a
	10	62.22c	64.44c	6.23c	0.87a	7.73b	0.47a	1.18a	0.12a	0.05a
	15	0.00d	2.22d	0.07d	0.43d	0.24c	0.41a	0.51b	0.11a	0.04a
	20	0.00d	0.00e	0.00e	0.00e	0.00d	0.00b	0.00c	0.00b	0.00b

GR: 萌发率; GE: 萌发势; GI: 萌发指数; VI: 活力指数; GS: 简易活力指数; HL: 下胚轴长; RL: 根长; SFW: 幼苗鲜重; SDW: 幼苗干重。同一品种同列数据后不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

GR: Germination rate; GE: Germination energy; GI: Germination index; VI: Vigor index; GS: Simple vigor index; HL: Hypocotyl length; RL: Root length; SFW: Seedling fresh weight; SDW: Seedling dry weight. Data followed different letters within column of the same variety indicate significant differences at 0.05 levels. The same is following Table.

表 2 干旱胁迫下黄秋葵性状的旱害率(%)

Table 2 Drought-injury rate (%) of traits of two okra varieties under drought stress

品种 Variety	PEG-6000 /%	GE	GR	GI	VI	GS	HL	RL	SFW	SDW
‘纤指’ ‘Qianzhi’	5	11.78c	55.55d	18.90d	47.46c	70.37c	17.54c	20.74d	33.33d	0.00c
	10	85.31b	72.23c	76.83c	91.53b	90.74b	17.54c	57.04c	66.67c	20.00b
	15	85.31b	94.45b	89.63b	93.22b	98.46b	43.86b	68.15b	72.22b	20.00b
	20	100.00a	100.00a	100.00a	100.00a	100.00a	100.00a	100.00a	100.00a	100.00a
‘红秋葵’ ‘Red okra’	5	7.32c	7.32d	13.79c	20.59d	14.45d	15.15d	9.02d	7.69c	0.00d
	10	31.71b	29.27c	40.33b	36.03c	34.71c	28.79c	3.28c	7.69c	16.67c
	15	100.00a	97.56b	99.33a	68.38b	97.94b	37.88b	58.20b	15.38b	33.33b
	20	100.00a	100.00a	100.00a	100.00a	100.00a	100.00a	100.00a	100.00a	100.00a

度为 5% 和 10% 时, ‘纤指’ 各性状的旱害率明显高于 ‘红秋葵’; PEG-6000 浓度为 20% 时, ‘纤指’ 种子的发芽势、发芽率、发芽指数、苗干重的旱害率却低于 ‘红秋葵’。PEG-6000 浓度为 5%~10% 时, ‘纤指’ 各性状旱害率的增加幅度明显高于 ‘红秋葵’, PEG-6000 浓度为 10.00%~15.00% 时, ‘纤指’ 的增加幅度明显低于 ‘红秋葵’。这说明干旱胁迫越严重, 对黄秋葵种子萌发的抑制作用也越强。总体而言, 干旱胁迫对 ‘纤指’ 种子萌发的抑制作用要低于 ‘红秋葵’。

## 2.4 对幼苗生理特性影响

结果表明(表 3), ‘纤指’ 和 ‘红秋葵’ 幼苗叶片的可溶性糖、可溶性蛋白、游离脯氨酸、丙二醛含量均随着 PEG-6000 浓度的增加而增加。5%、10% 和 15% PEG-6000 处理的 ‘纤指’ 幼苗叶片可溶性糖含量与对照差异显著, 但处理间差异不显著。PEG-6000 浓度为 10% 和 15% 时, ‘纤指’ 幼苗叶片的可溶性蛋白含量与对照差异显著, 但 PEG-6000 浓度为

5% 的与对照差异不显著。在 PEG-6000 浓度为 5% 时, ‘纤指’ 幼苗叶片的游离脯氨酸含量与对照差异不显著, 但 PEG-6000 浓度为 10% 和 15% 时则与对照差异极显著。PEG-6000 处理的 ‘纤指’ 幼苗叶片丙二醛含量均差异显著, 且 PEG-6000 浓度为 10% 和 15% 的与 5% 和对照的均差异极显著。这说明干旱胁迫会提高黄秋葵幼苗细胞内含物的含量, 但轻度胁迫时(PEG-6000 浓度为 5%) 时增加不明显。

在 PEG-6000 浓度为 5% 时, ‘红秋葵’ 幼苗叶片的可溶性糖含量与对照差异不显著, 但 PEG-6000 浓度为 10% 和 15% 时与对照和 5% 的均差异极显著。PEG-6000 处理的 ‘红秋葵’ 幼苗叶片可溶性蛋白含量均差异显著, 且 PEG-6000 浓度为 10% 和 15% 的与对照和 5% 的均差异极显著。在 PEG-6000 浓度为 5% 时, ‘红秋葵’ 幼苗叶片的游离脯氨酸含量与对照差异不显著, 但 PEG-6000 浓度为 10% 和 15% 时与对照和 5% 的均差异极显著。PEG-6000 处理的 ‘红秋葵’ 幼苗叶片丙二醛含量与对照均差异极显著。与对

表 3 干旱胁迫下黄秋葵幼苗叶片的可溶性蛋白、游离脯氨酸、可溶性糖和丙二醛含量

Table 3 Soluble protein, proline, soluble sugar and malondialdehyde contents in seedling leaves of two okra varieties under drought stress

品种 Variety	PEG-6000 /%	可溶性蛋白 Soluble protein ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	游离脯氨酸 Proline ( $\text{mg g}^{-1}$ )	可溶性糖 Soluble sugar ( $\text{mg g}^{-1}$ )	丙二醛 MAD ( $\text{nmol g}^{-1}$ )
‘纤指’ ‘Qianzhi’	0	152.76bA	0.07cB	0.05bA	110.64dB
	5	160.34abA	0.12cB	0.09aA	251.93cB
	10	189.64aA	0.23bA	0.12aA	474.38bA
	15	205.56aA	0.42aA	0.13aA	584.17aA
‘红秋葵’ ‘Red okra’	0	130.15dB	0.08cB	0.04bB	140.44C
	5	162.22cB	0.11cB	0.7bB	204.32cB
	10	204.44bA	0.25bB	0.15aA	506.23bA
	15	234.04aA	0.50aA	0.15aA	670.12aA

同一品种同列数据后不同大、小写字母分别表示差异极显著( $P < 0.01$ )和显著( $P < 0.05$ )。下同。

Data followed different capital and small letters within column of the same variety indicate significant differences at 0.01 and 0.05 levels, respectively. The same is following Table.

照相比,在 PEG-6000 浓度为 5% 时,‘纤指’幼苗叶片的可溶性糖、可溶性蛋白、游离脯氨酸和丙二醛含量增加幅度明显高于‘红秋葵’。与对照相比,在 PEG-6000 浓度为 10% 和 15% 时,‘纤指’幼苗叶片的可溶性糖、可溶性蛋白、游离脯氨酸和丙二醛含量增加的幅度明显低于‘红秋葵’。这说明干旱胁迫下,‘纤指’幼苗叶片的细胞内含物的含量高于‘红秋葵’,表现出较强的耐旱性。

## 2.5 对 SOD、POD 和 CAT 活性的影响

从表 4 可见,‘纤指’和‘红秋葵’幼苗叶片的 SOD、POD 和 CAT 活性均随 PEG-6000 浓度的增加而显著增加。‘纤指’幼苗叶片的 SOD、POD 和 CAT 活性在处理间均差异极显著。‘红秋葵’幼苗叶片的 SOD 活性在处理间均差异极显著。PEG-6000 浓度为 5% 时,‘红秋葵’幼苗叶片 POD 和 CAT 活性与对照差异不显著,但其余处理间均差异极显著。与对照相比,在 PEG-6000 浓度为 5% 时,‘纤指’幼苗叶片的 SOD、POD 和 CAT 活性的增加幅度明显高于‘红秋葵’。与对照相比,在 PEG-6000 浓度为 10% 和 15% 时,‘纤指’幼苗叶片的 SOD、POD 和 CAT 活性的增加幅度明显低于‘红秋葵’。这说明干旱胁迫会影响黄秋葵幼苗叶片的抗氧化酶活性,但对不同品种黄秋葵幼苗叶片的影响程度有所不同。

表 4 干旱胁迫下黄秋葵的 SOD、POD 和 CAT 活性

Table 4 Activities of SOD, POD and CAT in seedling leaves of two okra varieties under drought stress

品种 Variety	PEG-6000 /%	SOD (U g <sup>-1</sup> )	POD (U g <sup>-1</sup> )	CAT (U g <sup>-1</sup> )
‘纤指’ ‘Qianzhi’	0	315.11dD	48.30dD	140.00dD
	5	513.33cC	117.78cC	217.78cC
	10	1 002.22bB	211.11bB	411.11bB
	15	1 562.22aA	690.22aA	722.22aA
‘红秋葵’ ‘Red okra’	0	91.11dD	197.41dC	191.01cC
	5	384.44cC	284.34cC	284.94cC
	10	1 624.27bB	564.49bB	664.87bB
	15	2 010.07aA	1 432.22aA	1 102.62aA

## 3 讨论

本研究结果表明,用不同浓度(5%、10%、15% 和 20%)的 PEG-6000 溶液模拟干旱胁迫,黄秋葵 2 品种种子的吸水率、发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数、简易活力指数和幼苗的下胚轴长、根长、

鲜重和干重均随干旱胁迫程度增加呈降低的趋势,其旱害率随着胁迫程度增加而增加。这说明干旱胁迫明显抑制黄秋葵种子的萌发,且影响程度与干旱程度相关,这与 Altaf 等<sup>[15]</sup>的研究结果相同。由于影响植物生长发育的细胞因子、生理生化作用等与干旱胁迫因子间的互作十分复杂,因此,造成植物对干旱胁迫的响应也十分复杂<sup>[16]</sup>。干旱胁迫会使植物叶片气孔关闭,抑制细胞延展和生长,破坏细胞结构,中断酶的合成反应,严重的干旱胁迫会终止光合作用,最终导致植物死亡。本研究结果表明,重度干旱胁迫会导致黄秋葵种子不能萌发或者幼苗死亡,但黄秋葵两品种对轻度干旱胁迫均具有一定的耐性,PEG-6000 浓度为 5% 和 10% 时,‘红秋葵’幼苗对干旱胁迫的抗性强于‘纤指’,而 PEG-6000 浓度 15% 时则弱于‘纤指’,提示不同品种黄秋葵对干旱胁迫的响应可能不同,导致其适应的胁迫程度不同。

本研究结果表明,‘纤指’和‘红秋葵’幼苗叶片的 SOD、POD 和 CAT 活性和可溶性蛋白、可溶性糖、游离脯氨酸、丙二醛含量随 PEG-6000 浓度的增加而增加,这与 Rabert 等<sup>[17]</sup>的研究结果一致,同时也与水稻<sup>[18]</sup>、玉米(*Zea mays*)<sup>[19]</sup>等作物的研究结果相似。Manivannan 等<sup>[20]</sup>研究表明,SOD 可增强植物对水分胁迫的耐受力,同时 SOD 和 CAT 的协同作用可将 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 转换成水和分子态氧,从而避免细胞因缺水而破损。植物细胞内游离脯氨酸和可溶性蛋白的积累可能起渗透调节作用,是对干旱胁迫引起伤害的反映。丙二醛含量反映植物细胞膜质的过氧化程度<sup>[21]</sup>,干旱胁迫条件下,黄秋葵丙二醛含量增加,说明其细胞膜质过氧化程度较高,细胞膜受损。干旱胁迫会引起细胞内活性氧的爆发,从而引起细胞内的代谢紊乱,因此,植物可能通过提高其抗氧化能力来抵御干旱胁迫对植物细胞的伤害。本研究仅初步研究了干旱胁迫对黄秋葵种子萌发、幼苗细胞内含物含量和抗氧化酶活性的影响,后续将研究抗旱相关基因的表达模式,以进一步揭示黄秋葵对干旱胁迫的应答机制。

## 参考文献

- [1] ADELA KUN O E, OYELADE O J, ADE-OMOWAYE B I O, et al. Chemical composition and the antioxidative properties of Nigerian okra seed (*Abelmoschus esculentus* Moench) flour [J]. Food Chem Toxicol, 2009, 47(6): 1123–1126. doi: 10.1016/j.fct.2009.01.036.

- [2] AHMADI A, EMAM Y, PESSARAKLI M, et al. Response of various cultivars of wheat and maize to salinity stress [J]. *J Food Agric Environ*, 2009, 7(1): 123–128.
- [3] AMOATEY H M, AHIKPA J K, QUARTEY E K. Agromorphological characterisation of 29 accessions of okra (*Abelmoschus* spp. L.) [J]. *J Biol Agric Heal*, 2015, 5(4): 6–16. doi: 10.09183/JBAH/19384.39.
- [4] JARRET R, WANG M L, LEVY I J. Seed oil and fatty acid content in okra (*Abelmoschus esculentus*) and related species [J]. *J Agric Food Chem*, 2011, 59(8): 4019–4024. doi: 10.1021/jf104590u.
- [5] TAS S, TAS B. Some physiological responses of drought stress in wheat genotypes with different ploidity in Turkiye [J]. *World J Agric Sci*, 2007, 3(2): 178–183.
- [6] CLAVEL D, DRAME N K, ROY-MACAULEY H, et al. Analysis of early responses to drought associated with field drought adaptation in four Sahelian groundnut (*Arachis hypogaea* L.) cultivars [J]. *Environ Exp Bot*, 2005, 54(3): 219–230. doi: 10.1016/j.envexpbot.2004.07.008.
- [7] ZHENG M M, TAO Y, HUSSAIN S, et al. Seed priming in dry direct-seeded rice: Consequences for emergence, seedling growth and associated metabolic events under drought stress [J]. *Plant Growth Regul*, 2016, 78(2): 167–178. doi: org/10.1007/s10725-015-0083-5.
- [8] LEMOINE R, LA CAMERA S, ATANASSOVA R, et al. Source-to-sink transport of sugar and regulation by environmental factors [J]. *Front Plant Sci*, 2013, 4: 272. doi: 10.3389/fpls.2013.00272.
- [9] WEI J, LI J P, LUO Y C, et al. The physiological and biochemical reaction of different accessions of okra under drought condition [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2008, 24(6): 452–455.  
韦吉, 黎军平, 罗燕春, 等. 不同黄秋葵种质对干旱的生理生化反应 [J]. *中国农学通报*, 2008, 24(6): 452–455.
- [10] HAQ I U, KHAN A A, KHAN I A. Comprehensive screening and selection of okra (*Abelmoschus esculentus*) germplasm for salinity tolerance at the seedling stage and during plant ontogeny [J]. *J Zhejiang Univ Sci B*, 2012, 13(7): 533–544. doi: 10.1631/jzus.B1200027.
- [11] GEORGIU C D, GRINTZALIS K, ZERVOUDAKIS G et al. Mechanism of Coomassie brilliant blue G-250 binding to proteins: A hydrophobic assay for nanogram quantities of proteins [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2008, 391(1): 391–403. doi: 10.1007/s00216-008-1996-x.
- [12] DAVIES D R, MERRY R J, WILLIAMS A P, et al. Proteolysis during ensilage of forages varying in soluble sugar content [J]. *J Dairy Sci*, 1998, 81(2): 444–453. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(98)75596-1.
- [13] SHI Y, TAN X H, CHI Y M, et al. Study on IR fingerprint spectra of *Abelmoschus corolla* [J]. *Chin Wild Plant Res*, 2012, 31(2): 29–32. doi: 10.3969/j.issn.1006-9690.2012.02.008.  
石芸, 谈献和, 池玉梅, 等. 黄蜀葵花红外指纹图谱研究 [J]. *中国野生植物资源*, 2012, 31(2): 29–32. doi: 10.3969/j.issn.1006-9690.2012.02.008.
- [14] JAJEEL C A, MANIVANNAN P, LAKSHNANAN G M, et al. Alterations in morphological parameters and photosynthetic pigment responses of *Catharanthus roseus* under soil water deficits [J]. *Colloids Surf B Biointerfaces*, 2008, 61(4): 298–303.
- [15] ALTAF R, HUSSAIN K, MARYAM U, et al. Effect of different levels of drought on growth, morphology and photosynthetic pigments of lady finger (*Abelmoschus esculentus*) [J]. *World J Agric Sci*, 2015, 11(4): 198–201. doi: 10.5829/idosi.wjas.2015.11.4.1856.
- [16] RAZMJOO K, HEYDARIZADEH P, SABZALIAN M R. Effect of salinity and drought stresses on growth parameters and essential oil content of *Matricaria chamomila* [J]. *Int J Agric Biol*, 2008, 10(4): 1560–8530.
- [17] RABERT G A, RAJASEKAR M, MANIVANNAN P, et al. Effect of triazole fungicide on biochemical and antioxidant enzymes activity in okra (*Abelmoschus esculentus* L.) plant under drought stress [J]. *Int J Agric Food Sci*, 2013, 3(3): 100–107.
- [18] CHANDRASHEKAR R P, VAJRANABHAINAN S N, UDAYAKUMAR M. Lipid peroxidation as a mechanism of stress tolerance in upland rice (*Oryza sativa* L.) calli [J]. *Ind J Plant Physiol*, 1998, 3(1): 68–70. doi: 10.1021/la903815t.
- [19] JIANG M, ZHANG J. Water stress-induced abscisic acid accumulation triggers the increased generation of reactive oxygen species and up-regulates the activities of antioxidant enzymes in maize leaves [J]. *J Exp Bot*, 2002, 53(379): 2401–2410. doi: 10.1093/jxb/erf090.
- [20] MANIVANNAN P, JALEELL C A, KISHOREKUMAR A, et al. Changes in antioxidant metabolism under drought stress in *Vigna unguiculata* (L.) Walp [J]. *Ind J Plant Physiol*, 2007, 12(2): 133–137.
- [21] CONRAD A C, MATHABATHA M F. Characterization and expression analyses of chalcone synthase (CHS) and anthocyanidin synthase (ANS) genes in *Clivia miniata* [J]. *Transcriptomics*, 2016, 4(2): 136. doi: 10.4172/2329-8936.1000136