

## PEG模拟干旱胁迫对高油酸花生品种幼苗形态和生理特性的影响

刘瑞琦<sup>1</sup>, 宿宛玉<sup>1</sup>, 王恒斌<sup>2</sup>, 刘凤珍<sup>1</sup>, 骆璐<sup>1</sup>, 谷明轩<sup>1</sup>, 万勇善<sup>1</sup>, 张昆<sup>1\*</sup>

1. 山东农业大学农学院, 山东 泰安 271018

2. 临沭县种子技术推广服务中心, 山东 临沂 276700

**摘要:** 为鉴定干旱胁迫对高油酸花生品种幼苗生长的影响, 选用8个高油酸花生品种为试验材料, 采用室内水培法, 在花生苗期进行PEG模拟干旱胁迫, 研究不同高油酸花生品种根系和叶片形态及生理特性的变化。结果表明, PEG模拟干旱胁迫下, 高油酸花生根系形态参数相对值和根系活力相对值提高, 从而提高了生物量抗旱系数。干旱胁迫会降低花生的根长、根表面积、根体积、根尖数、根系活力、地上部干重、根系干重和总干重, 提高根冠比, 高油酸小花生品种根系活力下降程度大于普通油酸含量花生品种, 高油酸大花生品种根系指标下降程度小于普通花生。高油酸花生品种花育9113、山花21号、开农308、冀花11具有较好的抗旱性。

**关键词:** 高油酸花生; PEG胁迫; 根系形态; 生理特性

中图分类号: S565.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2026)01-0046-10

## Effect of PEG-simulated Drought Stress on Morphological and Physiological Characteristics of High Oleic Acid Peanut Seedlings

LIU Rui-qi<sup>1</sup>, SU Wan-yu<sup>1</sup>, WANG Heng-bin<sup>2</sup>, LIU Feng-zhen<sup>1</sup>, LUO Lu<sup>1</sup>, GU Ming-xuan<sup>1</sup>, WAN Yong-shan<sup>1</sup>, ZHANG Kun<sup>1\*</sup>

1. College of Agronomy/Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

2. Seed Technology Extension Service Center of Linshu County, Linyi 276700, China

**Abstract:** To identify the effects of drought stress on the seedling growth of high-oleic acid peanut varieties, this research selects eight high-oleic acid peanut cultivars as experimental materials, uses a hydroponic system in a laboratory and applies PEG-simulated drought stress during the seedling stage to analyze changes in root and leaf morphological and physiological characteristics across different high-oleic acid peanut cultivars. The results show that under PEG-simulated drought stress, the relative values of root morphological parameters and root activity in high-oleic acid peanuts increase, thereby enhancing the drought resistance coefficient of biomass. Drought stress significantly reduces root length, root surface area, root volume, root tip number, root activity, shoot dry weight, root dry weight, and total dry weight, while increasing the root-to-shoot ratio. Notably, small high-oleic acid peanut cultivars show a more pronounced decline in root activity than conventional oleic acid peanut cultivars, whereas large high-oleic acid peanut cultivars exhibit less reduction in root-related indices compared to conventional peanuts cultivars. Among the tested cultivars, Huayu 9113, Shanhua 21, Kainong 308, and Jihua 11 exhibit relatively strong drought resistance.

**Keywords:** High-oleic peanuts; PEG stress; root morphology; physiological characteristics

花生(*Arachis hypogaea* L.)是我国重要的油料作物,在国家粮油安全战略中具有重要作用。2023年我国花生种植面积达479.78万hm<sup>2</sup>,总产量1923.07万t(国家统计局),总产油量和单位面积产量均位居油料作物第一位。近年来,高油酸花生因其耐储性好、营养价值高等突出优点受到加工企业和消费者的喜爱<sup>[1]</sup>。高油酸花生是指油酸含量大于75%的花生品种,与普通花生(油酸含量约40%)相比,高油酸花生的油酸含量

显著提高,大幅提升了花生油和花生制品的货架期<sup>[2-5]</sup>。因此,高油酸花生目前已逐渐成为当前我国重点推广的品种类型。

水分是作物生长最关键的环境因子。虽然花生是比较抗旱的作物,但花生主要分布在丘陵旱薄地和河流冲击的沙土地,干旱一直以来都是限制花生产量提高的重要因素之一。近年来,阶段性干旱天气频发,更是严重影响花生的产量。而现有高油酸花生品种普遍存在抗逆性不足、专

收稿日期: 2025-03-25

修回日期: 2025-12-28

基金项目: 山东省重点研发计划(2023TZXD007); 国家现代农业产业技术体系资助(CARS-13)

第1作者简介: 刘瑞琦(2003-),女,本科生,研究方向:花生栽培生理研究。E-mail: 2983168746@qq.com

\*通讯作者: Author for correspondence. E-mail: kunzh@sdau.edu.cn

用型种质缺乏等问题<sup>[6]</sup>。干旱胁迫会影响花生的生长发育,使植株地上部和根系形态发生明显变化,如抗旱性强的花生品种经过轻度或中度干旱胁迫后根系形态参数基本不变或有所增加,抗旱性弱的花生品种其指标则会下降<sup>[7]</sup>。干旱胁迫下,大豆根长、根尖数等形态指标则是呈下降趋势,抗旱大豆根系形态指标下降程度小于不抗旱大豆<sup>[8]</sup>。干旱胁迫导致的根系形态变化和根系活力下降与花生的耐旱性呈显著负相关<sup>[9]</sup>。目前,关于花生抗旱机制的研究多集中于普通花生品种,已证实干旱胁迫通过触发氧化应激反应,导致活性氧(ROS)代谢失衡与过量积累,引发膜脂过氧化及细胞器损伤,从而抑制细胞分裂并最终引发生长受限与产量损失<sup>[10]</sup>。植物通过激活抗氧化防御系统响应此过程,其中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)构成核心酶促清除体系<sup>[11]</sup>。研究表明,三类酶活性呈现时空特异性响应:胁迫初期SOD-POD-CAT协同调控ROS稳态,而持续胁迫下H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>的清除主要依赖于POD-CAT级联反应<sup>[12]</sup>。但对于高油酸花生品种的抗旱性的生理机制研究仍存在不足,高油酸性状可能通过改变膜脂组

成影响细胞稳定性<sup>[13]</sup>。另外,现有研究多聚焦于单一生理指标,缺乏多维度综合评价体系。这些研究缺口导致高油酸花生品种的适生区规划缺乏科学依据,并制约其应用。因此,本研究以普通油酸含量花生品种为对照,研究不同高油酸花生品种在PEG模拟干旱条件下幼苗形态和生理指标等的变化,旨在为高油酸花生高产优质高效生产提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

试验在山东省泰安市山东农业大学科技创新大楼生长室进行,采取室内培养方式。培养环境温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,每天光照时间16 h,黑暗时间8 h,光暗交替,光照时光强为11.4 klux。

### 1.2 试验材料

选用8个高油酸花生品种,分别为冀花19号、山花21号、花育9111、花育9113、冀花11号、开农1760、开农308、冀花18号,并以每种花生的百仁重为划分标准将其划分为大粒组花生和小粒组花生(国家花生数据中心),以普通油酸含量花生品种山花9号、山花20号为对照。

表1 试验材料  
Table 1 Materials

品种编号 Number	品种名称 Genotype	类型 Botanical type	油酸含量/% Oleic acid content	百仁重/g 100-seed weight
1	山花9号	普通大花生	46.50	104.0
2	冀花19号	高油酸大花生	75.35	111.2
3	山花21号	高油酸大花生	75.52	105.0
4	花育9111	高油酸大花生	80.40	91.1
5	花育9113	高油酸大花生	50.50	93.3
6	山花20号	普通小花生	38.80	78.0
7	冀花11号	高油酸小花生	80.70	64.5
8	开农1760	高油酸小花生	76.40	68.9
9	开农308	高油酸小花生	79.60	81.8
10	冀花18号	高油酸小花生	77.50	71.5

### 1.3 试验设计

试验采用水培方式,用10%的PEG-6000胁迫处理模拟干旱,以无胁迫处理为对照。每个处理设置3次重复,每个重复定植2盒水培花生幼苗,共计120盒,每盒6株。

挑选种皮完整、籽粒饱满的花生种子200粒,

酒精消毒后在0.3% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>溶液中浸种6 h,去离子水清洗,种子均匀摆放发芽盘内,保鲜膜封好四周后,置于黑暗中萌发3 d,光照萌发2 d。然后选择长势一致、胚根大小一致的12株花生幼苗移至水培盒平衡3 d,Hoagland营养液培养7 d,期间每3 d更换一次营养液,培养7 d后进行间

苗,每盒保留 6 株长势均匀花生幼苗,然后进行 PEG 胁迫处理 3 d。胁迫处理结束时取样测定各项指标。

### 1.4 测定项目与方法

#### (1)根系形态指标

每个重复取 3 株花生,将地上部与根系分开,根系用去离子水洗净后使用万深根系扫描仪扫描并用 LA-S 系统统计总根长、根表面积、根体积、平均根直径和根尖数等根系形态参数。

#### (2)地上部干重、地下部干重

根系扫描完成后,把根系装进牛皮纸内与地上部一起置于温度为 105 °C 烘箱中杀青 30 min,之后把温度调至 80 °C 继续烘干至恒重,称重,计算抗旱系数。抗旱系数=干旱条件下植株总干重/正常状态下植株总干重

#### (3)抗氧化酶活性及丙二醛含量

每个重复取 3 株花生的主茎倒三叶用液氮速冻后于 -80 °C 保存,测定抗氧化酶活性和丙二醛含量。SOD 活性的测定采用氮蓝四唑法、POD 活性的测定采用愈创木酚法、CAT 活性的测定采用紫外吸收法。丙二醛含量的测定采用硫代巴比妥酸法。

#### (4)根系活力

每个重复取 3 株花生的根系,采用 TTC 法测

定根系活力。

### 1.5 数据统计与分析

用 Microsoft Excel 2016 进行数据的计算与统计,用 IBM SPSS Statistics 26.0 软件进行差异显著性分析。抗旱系数(Drought Resistance Factor, DRF):通过胁迫处理下某一指标值与对照处理下的比值计算,公式为:抗旱系数=干旱条件下总干重/正常状态下总干重,该系数反映了品种在干旱胁迫下维持特定指标的相对稳定的能力,DRF 值越接近 1,表明该指标受干旱影响越小,品种抗旱性越强。

## 2 结果与分析

### 2.1 PEG 模拟干旱胁迫对高油酸花生生物量和根冠比的影响

由表 2 可知,10%PEG 模拟干旱胁迫下,高油酸花生(除冀花 19 号外)总干重抗旱系数大于普通花生。在高油酸花生品种中,花育 9113 和开农 308 抗旱系数最大。干旱胁迫会使花生的总干重下降,且普通花生总干重的下降幅度大于高油酸花生。干旱胁迫会使大部分花生品种地上部干重、根系干重下降。品种间根冠比变化规律不同,可能是干旱胁迫对花生地上部和根系抑制的程度不同导致。

表 2 干旱胁迫下不同花生品种的生物量和根冠比

Table 2 Biomass and root-to-shoot ratio of different peanut cultivars under drought stress

类型 Type	品种 Cultivars	地上部干重/(g/plant) Shoot dry weight		根系干重/(g/plant) Root dry weight		根冠比 Root-shoot ratio		总干重/(g/plant) Dry weight		抗旱系数 Drought resistance factor
		0%	10%	0%	10%	0%	10%	0%	10%	
		PEG	PEG	PEG	PEG	PEG	PEG	PEG	PEG	
大粒组花生	山花 9 号	0.41b	0.39 c	0.24ab	0.23ab	0.59a	0.59a	0.65c	0.62bc	0.95ab
	冀花 19 号	0.55a	0.51 a	0.25b	0.24ab	0.45b	0.47b	0.80a	0.75a	0.94b
	山花 21 号	0.45b	0.44 b	0.27a	0.25a	0.60a	0.57a	0.72b	0.69ab	0.96a
	花育 9111	0.44b	0.43bc	0.19c	0.17c	0.43b	0.40b	0.63c	0.60c	0.95ab
	花育 9113	0.45b	0.45b	0.21bc	0.20bc	0.47b	0.44b	0.66c	0.65bc	0.98a
小粒组花生	山花 20 号	0.38b	0.33b	0.18b	0.15b	0.47a	0.45a	0.56b	0.48b	0.86bc
	冀花 11 号	0.26c	0.25c	0.12c	0.11c	0.46a	0.44a	0.38c	0.36c	0.95ab
	开农 1760	0.37b	0.32b	0.17b	0.15b	0.46a	0.47a	0.54b	0.47b	0.87b
	开农 308	0.50a	0.49a	0.23a	0.22a	0.46a	0.45a	0.73a	0.71a	0.97a
	冀花 18 号	0.39b	0.32b	0.18b	0.17b	0.46a	0.53a	0.57b	0.49b	0.86bc

注:每组品种每列中字母相同表示差异不显著( $P>0.05$ ),字母不同者表示差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: The same letter in each column of the same group indicates that the difference is not significant ( $P>0.05$ ). Different letters indicate significant differences ( $P<0.05$ ). The same below.

## 2.2 PEG模拟干旱胁迫对高油酸花生根系形态特征的影响

由表3~4可知,在大粒组花生中,高油酸花生根长、根表面积、根体积、根尖数相对值普遍高于普通花生。干旱胁迫下山花9号、冀花19号、山花21号、花育9111、花育9113根系长度比对照分别下降了21.0%、12.0%、4.7%、5.5%、26.1%。山花21号在对照和干旱胁迫下根系长度都保持在较高水平。干旱胁迫下,山花9号根系长度与

高油酸花生各品种差异显著。干旱胁迫下各花生根系表面积比对照分别下降了17.8%、16.1%、9.3%、10.3%、19.4%,山花21号在对照和干旱胁迫下根系表面积都保持在较高水平。干旱胁迫下各花生根系体积比对照分别下降了13.2%、24.6%、14.1%、10.4%、6.0%。干旱胁迫下各花生根尖数比对照分别下降了8.5%、18.1%、8.2%、4.0%、5.7%,山花21号在对照和干旱胁迫下根尖数都保持在最高水平。

表3 干旱胁迫下不同花生品种的根长度和根表面积  
Table 3 Root length and root surface area of different peanut cultivars under drought stress

类型 Type	品种 Cultivars	根长度/(cm/plant) Total root length			根表面积/(cm <sup>2</sup> /plant) Root surface area		
		0%PEG	10%PEG	相对值 RV	0%PEG	10%PEG	相对值 RV
大粒组花生	山花9号	997.79abc	787.98d	0.79c	236.68a	194.51b	0.82a
	冀花19号	1023.54ab	900.95c	0.88b	234.02a	196.31b	0.83a
	山花21号	1069.02a	1018.52a	0.95a	236.21a	214.15a	0.90a
	花育9111	991.72bc	937.18b	0.94ab	210.57b	188.96b	0.90a
	花育9113	947.52c	700.31e	0.74d	222.59ab	179.42c	0.81a
小粒组花生	山花20号	971.43a	756.31a	0.78abc	215.63b	156.70b	0.73b
	冀花11号	794.91b	642.52c	0.81ab	146.09e	117.19c	0.80b
	开农1760	771.14b	513.27d	0.66bc	161.77d	120.07c	0.74b
	开农308	1074.82a	696.47bc	0.65c	244.82a	183.19a	0.74b
	冀花18号	833.74b	711.02ab	0.85a	172.31c	154.77b	0.90a

表4 干旱胁迫下不同花生品种的根体积和根尖数  
Table 4 Root volume and root tip number of different peanut cultivars under drought stress

类型 Type	品种 Cultivars	根体积/(cm <sup>3</sup> /plant) Root volume			根尖数/(/plant) Apical number		
		0%PEG	10%PEG	相对值 RV	0%PEG	10%PEG	相对值 RV
大粒组花生	山花9号	6.69a	5.81ab	0.86ab	530.55bc	485.52c	0.92a
	冀花19号	6.84a	5.16b	0.75b	566.78abc	464.11c	0.82b
	山花21号	6.44a	5.53ab	0.86ab	618.33a	567.66a	0.91a
	花育9111	5.96a	5.34ab	0.90ab	522.55c	501.89bc	0.96a
	花育9113	6.31a	5.93a	0.94a	579.55ab	546.77ab	0.94a
小粒组花生	山花20号	5.42b	3.87b	0.71b	684.25b	515.25b	0.75b
	冀花11号	3.25d	2.70c	0.83ab	496.33d	488.66c	0.98a
	开农1760	4.53c	3.19c	0.71b	646.33bc	461.66d	0.71bc
	开农308	6.69a	5.57a	0.83ab	733.11a	488.44c	0.67c
	冀花18号	4.36c	3.96b	0.90a	614.83c	572.00a	0.93a

在小粒组花生中,高油酸花生根表面积、根体积相对值高于普通花生。干旱胁迫下山花20号、冀花11号、开农1760、开农308、冀花18号根系长度比对照分别显著下降了22.1%、19.2%、

33.4%、35.2%、14.7%。干旱胁迫下各花生品种根系的表面积分别比对照下降了27.3%、19.8%、25.8%、25.2%、10.2%,山花20号在对照条件下与高油酸花生各品种差异显著,开农308在对照和

干旱胁迫条件下根系表面积最大,且根系表面积下降幅度大。干旱胁迫下各花生品种根系体积比对照分别下降了28.6%、16.9%、29.6%、16.7%、9.2%,开农308在对照和干旱胁迫下根系体积都高于其他花生品种,山花20号在对照条件下根系体积与高油酸花生品种根系体积差异显著。干旱胁迫下各花生根尖数比对照分别下降了24.7%、1.5%、28.6%、33.4%、7.0%,在干旱胁迫下,山花20号根尖数与高油酸花生品种差异显著。

### 2.3 PEG 模拟干旱胁迫对高油酸花生根系活力的影响

由表5可知,大粒组中高油酸花生品种根系活力相对值高于普通花生,且差异显著。干旱胁迫下山花9号、冀花19号、山花21号、花育9111、花育9113根系活力比对照分别下降了33.0%、17.2%、3.3%、1.3%、7.5%。在高油酸花生品种中,山花21号在对照和干旱胁迫下根系活力都保持较好水平,花育9113在干旱胁迫下根系活力下降幅度最小。

表5 干旱胁迫下不同花生品种的根系活力  
Table 5 Root activity of different peanut cultivars under drought stress

类型 Type	品种 Cultivars	根系活力/( $\mu\text{g}/\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$ ) Root activity		相对值 RV
		0%PEG	10%PEG	
大粒组花生	山花9号	880.95a	590.47b	0.67c
	冀花19号	709.42a	587.67b	0.83b
	山花21号	776.67a	751.20a	0.97a
	花育9111	759.27a	749.04a	0.99a
	花育9113	763.06a	705.81ab	0.93a
小粒组花生	山花20号	629.90c	542.46bc	0.86b
	冀花11号	717.56b	604.03b	0.84b
	开农1760	844.33a	795.83a	0.94a
	开农308	634.93c	428.51c	0.68c
	冀花18号	835.48a	459.30bc	0.55d

小粒组中,高油酸花生(除开农1760外)根系活力相对值小于普通花生。干旱胁迫下山花20号、冀花11号、开农1760、开农308、冀花18号根系活力比对照分别下降了13.9%、15.8%、5.7%、32.5%、45.0%。开农1760在对照和干旱胁迫条件下其根系活力都较高,且下降幅度最小。

### 2.4 PEG 模拟干旱胁迫对高油酸花生叶片抗氧化酶活性影响

2.4.1 SOD 活性 由图1可知,与对照相比,干旱胁迫下所有花生品种的叶片SOD活性均增加。在大粒组中,干旱胁迫条件下山花9号、冀花19号、山花21号、花育9111、花育9113叶片SOD活性与对照相比分别增加了44.7%、11.2%、30.1%、15.6%、20.0%。普通油酸含量花生品种山花9号的叶片SOD活性上升幅度要大于高油酸花生各品种。山花21号SOD活性上升幅度要大于其他高油酸花生品种。

在小粒组中,干旱胁迫下山花20号、冀花

11号、开农1760、开农308、冀花18号叶片的SOD活性与对照相比分别增加了31.8%、23.4%、8.0%、10.9%、16.4%。冀花18号在对照和干旱胁迫条件下SOD活性都较高,但SOD活性上升幅度小。山花20号的SOD活性增长幅度大于其他高油酸花生。在高油酸花生品种中,冀花11号SOD活性上升幅度要大于其他花生品种。

2.4.2 POD 活性 由图2可知,大粒组和小粒组高油酸花生(除花育9113外)POD相对值小于普通花生。在大粒组中,干旱胁迫下山花9号、冀花19号、山花21号、花育9111、花育9113叶片的POD活性与对照相比分别增加了104.1%、1.5%、29.1%、18.2%、120.2%。花育9113的POD活性上升幅度最大,其次为山花9号,二者均显著高于其他花生品种。

在小粒组中,干旱胁迫条件下山花20号、冀花11号、开农1760、开农308、冀花18号POD活性与对照相比分别增加了92.8%、24.8%、3.5%、

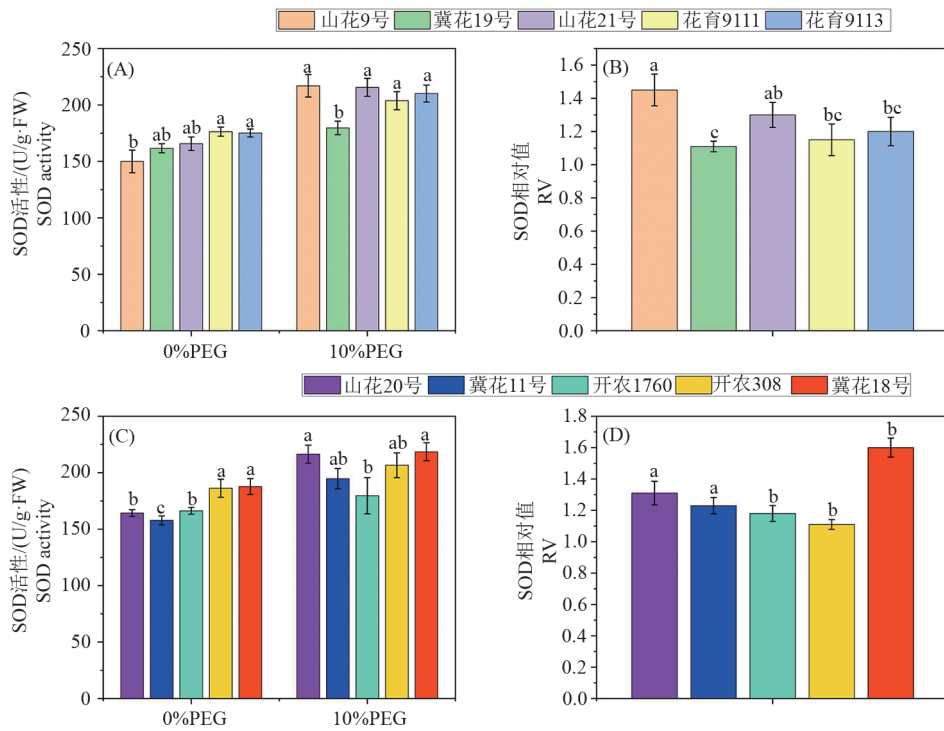


图 1 干旱胁迫下不同花生品种的叶片 SOD 活性((A)、(B)为大粒花生组,(C)、(D)为小粒花生组)  
 Fig.1 Superoxide Dismutase (SOD) activity in leaves of different peanut cultivars under drought stress conditions (Varieties (A) and (B): large-seeded type; Varieties (C) and (D): small-seeded type)

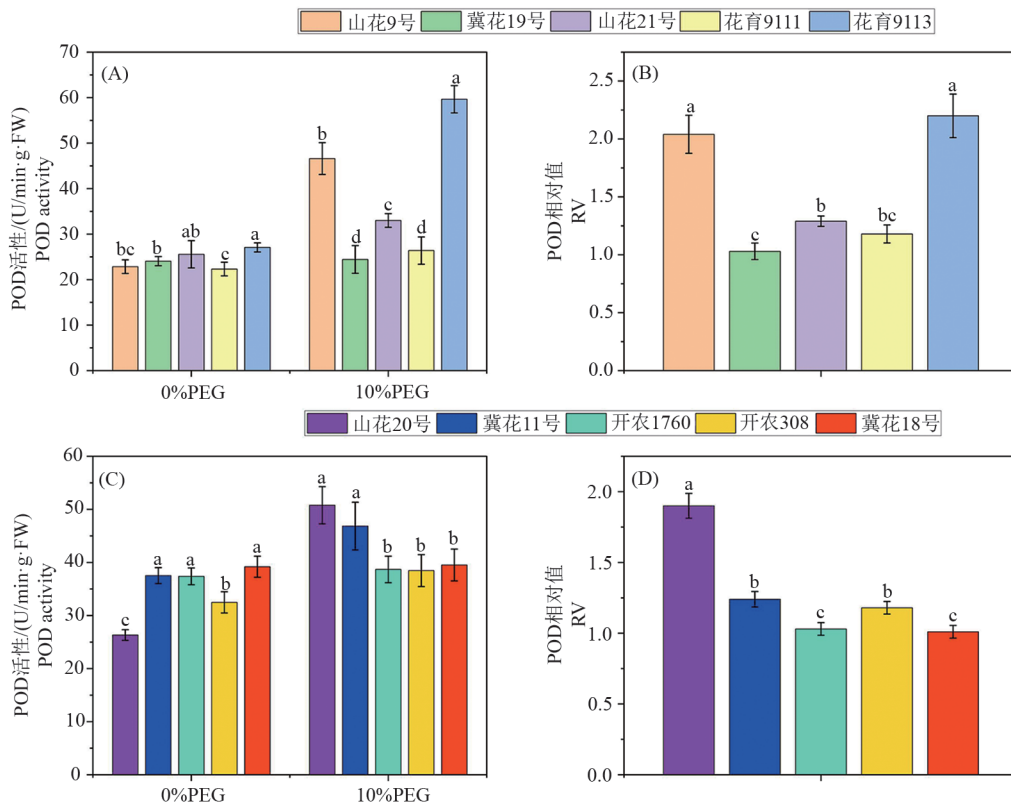


图 2 干旱胁迫下不同花生品种的叶片 POD 活性((A)、(B)为大粒花生组,(C)、(D)为小粒花生组)  
 Fig.2 Peroxidase (POD) activity in leaves of different peanut cultivars under drought stress conditions (Varieties (A) and (B): large-seeded type; Varieties (C) and (D): small-seeded type)

18.4%、0.8%。山花 20 号的 POD 活性干旱胁迫条件下较高,且与对照比的增长幅度显著高于其他高油酸花生。在高油酸花生品种中,冀花 11 号 POD 活性上升幅度要大于其他花生品种。

2.4.3 CAT 活性 由表 6 可知,大粒组中,高油酸花生 CAT 活性相对值小于普通花生,小粒组中,高油酸花生 CAT 活性相对值高于普通花生。

在大粒组中,干旱胁迫条件下山花 9 号、冀花 19 号、山花 21 号、花育 9111、花育 9113 CAT 活性分别比对照相增加了 4.6%、2.4%、1.9%、5.0%、10.1%。在高油酸花生品种中,花育 9113 的 CAT 活性上升幅度要大于其他高油酸花生品种,且在对照和干旱胁迫下花育 9113 叶片 CAT 活性都保持在最高水平。

表 6 干旱胁迫下不同花生品种的叶片 CAT 活性  
Table 6 CAT activity in leaves of different peanut cultivars under drought stress

类型 Type	品种 Varieties	CAT 活性/(U/min·g·FW) CAT activity		相对值 RV
		0%PEG	10%PEG	
大粒组花生	山花 9 号	57.73c	60.39bc	1.05ab
	冀花 19 号	55.05d	56.37c	1.02b
	山花 21 号	61.95b	63.11b	1.02b
	花育 9111	62.23bc	65.34b	1.05ab
	花育 9113	74.54a	82.06a	1.10a
小粒组花生	山花 20 号	64.33ab	65.84bc	1.02a
	冀花 11 号	63.49b	68.04b	1.07a
	开农 1760	59.08b	65.66bc	1.11a
	开农 308	69.10a	73.85a	1.07a
	冀花 18 号	60.71b	62.57c	1.03a

在小粒组花生中,干旱胁迫条件下山花 20 号、冀花 11 号、开农 1760、开农 308、冀花 18 号 CAT 活性分别比对照增加了 2.4%、7.2%、11.1%、6.5%、3.1%。在高油酸花生品种中,开农 308 在对照和干旱胁迫条件下 CAT 活性都保持在最高水平,开农 1760 CAT 活性上升幅度最大。

2.4.4 MDA 含量 由表 7 可知,大粒组和小粒组

高油酸花生和普通花生 MDA 含量相对值均没有明显差异。在大粒组花生中,干旱胁迫条件下山花 9 号、冀花 19 号、山花 21 号、花育 9111、花育 9113 MDA 含量与对照相比分别增加了 15.8%、10.1%、12.3%、20.2%、19.0%。在高油酸花生品种中,花育 9113 MDA 含量在对照和胁迫条件下都保持较高水平,上升幅度要大于其他高油酸花生品种。

表 7 干旱胁迫下不同花生品种的叶片 MDA 含量  
Table 7 MDA content in leaves of different peanut cultivars under drought stress

类型 Type	品种 Varieties	MDA 含量/( $\mu\text{mol/g}\cdot\text{FW}$ ) MDA content		相对值 RV
		0%PEG	10%PEG	
大粒组花生	山花 9 号	3.93bc	4.55b	1.15b
	冀花 19 号	3.96b	4.36b	1.10b
	山花 21 号	4.06b	4.56b	1.13b
	花育 9111	3.77c	4.53b	1.20a
	花育 9113	4.26a	5.07a	1.19a
小粒组花生	山花 20 号	4.82a	5.91a	1.23ab
	冀花 11 号	4.27bc	5.72a	1.34a
	开农 1760	4.20bc	4.86b	1.16b
	开农 308	4.13c	5.19b	1.26ab
	冀花 18 号	4.33b	5.12b	1.18b

在小粒组花生中,干旱胁迫条件下山花20号、冀花11号、开农1760、开农308、冀花18号MDA含量分别比对照增加了22.6%、34.0%、15.7%、25.7%、18.2%。山花20号MDA含量在对照和胁迫水平下都保持较高水平。在对照条件下,山花20号MDA含量和高油酸花生各品种MDA含量差异显著。在高油酸花生品种中,冀花11号含量上升幅度要大于其他花生品种。

### 3 讨论

作物在遭遇干旱胁迫时,会使抑制作物生长,生物量减少,根冠比提高<sup>[14,15]</sup>,作物在干旱情况下的生物量抗旱系数是作物抗旱性的直接体现,生物量抗旱系数越大作物抗旱性越好<sup>[16,17]</sup>。研究发现,在干旱情况下,花生抗旱品种比非抗旱品种干物质抗旱系数提高了14.0%。本研究与前人的研究结果一致,干旱处理显著降低了花生的生物量,其中大花生品种的抗旱系数在0.94~0.98,小花生品种0.86~0.97,其中大花生品种(花育9113、山花21号),小花生品种(开农308、冀花11)表现出了更高的抗旱性。且本实验采用10%的PEG-6000胁迫处理模拟干旱,10%的PEG-6000浓度既能有效诱导花生幼苗的渗透调节反应,又未达到极端干旱水平,避免了细胞膜严重损伤,未造成不可逆的生理损伤,而且此浓度下的PEG-6000为中等强度下的干旱胁迫更接近花生实际生长环境中可能遭受的干旱程度,有助于揭示植物在自然条件下的适应性策略<sup>[18]</sup>。

研究认为,干旱胁迫条件下根系形态结构与品种的抗旱性紧密相关,能够体现作物在遭遇干旱胁迫适应环境条件能力<sup>[19-21]</sup>。干旱胁迫下水稻、小麦、苜蓿根长、根表面积等指标下降<sup>[22-24]</sup>。在本研究中,在大粒组花生中,大部分高油酸花生根长、根表面积、根体积、根尖数相对值大于普通花生。在小粒组花生中,高油酸花生根表面积、根体积相对值大于普通花生。研究发现<sup>[25]</sup>,干旱时田间土层每深20 cm,土壤含水量提高3.75%,更高的根系形态参数可以提高根系与水分养分的接触面积,一定程度上缓解花生干旱情况。根系活力是作物对养分水分吸收能力的表现,研究发现<sup>[26]</sup>,根系活力更高的品种表现出更高的抗旱性,这与本实验的研究结果一致。

作物在遭遇干旱胁迫时,不仅外部形态和生育进程会受到影响,还会发生一系列生理生化反应,导致酶的活性发生变化<sup>[27]</sup>。ROS(活性氧)是植物体内重要的信号分子,参与作物的生长发育、胁迫应答及部分生理过程。但在逆境条件下ROS的产生和清除会处于失衡的状态,活性氧的积累会对细胞膜、蛋白质和核酸等造成氧化,导致细胞器降解甚至细胞死亡,影响作物正常生命活动<sup>[28,29]</sup>。作物体内的抗氧化酶系统可有效清除ROS,降低因ROS过量积累产生的逆境伤害。在抗氧化酶系统中,SOD是清除ROS的第一道防线,能够催化游离氧基生成 $H_2O_2$ 和 $O_2$ ,POD和CAT可以进一步清除 $H_2O_2$ ,从而使作物体内的ROS处于动态平衡<sup>[30]</sup>。研究表明,干旱胁迫下叶片的CAT、POD、SOD活性和MDA含量均增加,且抗旱性强的品种抗氧化酶活性上升幅度要大于抗旱性弱的品种,表明干旱胁迫对抗旱性强的品种伤害程度比较轻,活性氧积累较少,抗旱性品种能快速清除多余活性氧,抗氧化能力强<sup>[31-33]</sup>。本研究结果与前人基本一致,PEG处理使各处理花生幼苗的抗氧化酶活性上升,高油酸花生SOD活性、POD活性上升幅度小于普通花生。对于CAT活性,大粒组花生中高油酸花生上升幅度小于普通花生,小粒组花生中高油酸花生上升幅度大于普通花生。尽管干旱条件下所有品种的SOD、POD、CAT活性均显著升高,但高油酸花生品种的抗氧化酶活性增幅普遍低于普通花生品种,且DRF与抗氧化酶活性无显著相关性。这一现象与“抗旱性强品种酶活增幅更大”的结论<sup>[31,33]</sup>形成矛盾,可能由以下原因导致:本试验采用短期PEG干旱胁迫,而抗氧化酶响应存在时间依赖性<sup>[34]</sup>,产生时间阈值效应,高油酸花生品种可能通过快速启动根系适应性缓解水分亏缺,减少ROS爆发,从而降低对抗氧化酶系统的依赖;高油酸花生品种还可能通过脂质代谢重编的潜在贡献,高油酸性状伴随FAD2基因沉默<sup>[35]</sup>,可能通过提高膜脂不饱和强度增强细胞膜稳定性<sup>[36]</sup>,减少ROS泄漏对细胞的氧化损伤。试验中,小粒组花生中的高油酸品种CAT活性上升幅度显著高于大粒组,说明油酸代谢与抗氧化途径的互作可能存在基因型差异,为以后研究高油酸花生品种的抗旱性提供思路。

## 4 结论

PEG 模拟干旱胁迫下,高油酸花生通过提高根系形态参数相对值和根系活力相对值提高了生物量抗旱系数。高油酸花生品种中,山花 21 号与冀花 11 号 SOD 活性增幅显著,花育 9113 与冀花 11 号 POD 活性显著增强,花育 9113 及开农 1760 CAT 活性提升最为明显。高油酸花生品种花育 9113、山农 21 号、开农 308、冀花 11 号具有较好的抗旱性。

## 参考文献

- [1] 刘芳,张哲,王积军.我国高油酸花生种植及应用技术研究进展[J].中国油料作物学报,2020,42(06):956-959.
- [2] 王传堂,王秀贞,唐月异,等.中国高油酸花生种质创制、品种选育进展与建议[J].花生学报,2015,44(02):49-53.
- [3] 李拴柱,宋江春,王建玉,等.高油酸花生遗传育种研究进展[J].作物杂志,2017(03):6-12.
- [4] 臧秀旺,张新友,汤丰收.河南省高油酸花生生产存在问题及发展对策[J].河南农业,2020(03):14-15.
- [5] 孔祥彬,付春,姜官恒,等.高油酸花生发展态势分析[J].安徽农业科学,2021,49(02):233-237.
- [6] 王凯悦,陈芳泉,黄五星.植物干旱胁迫响应机制研究进展[J].中国农业科技导报,2019,21(02):19-25.
- [7] 刘博宽,赵楠楠,崔顺立,等.不同花生品种抗旱性鉴定及抗旱指标评价[J].中国农学通报,2021,37(19):27-35.
- [8] 魏曼娜.干旱胁迫下不同大豆品种根系性状和光合生理研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2016:41-42.
- [9] 于洋,雷婧娜,马鑫磊,等.低温干旱复合胁迫对花生幼苗生长及生理特性的影响[J].中国油料作物学报,2025,47(05):1232-1243.
- [10] 木潞,齐绍武,李跃,等.干旱胁迫对烤烟的影响机理研究进展[J].作物研究,2012,26(02):193-196.
- [11] 齐琪,马书荣,徐维东.盐胁迫对植物生长的影响及耐盐生理机制研究进展[J].分子植物育种,2020,18(08):2741-2746.
- [12] 项雯慧.甘草幼苗响应干旱胁迫生理生化特征研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2018:18-19.
- [13] Bian S, Jiang Y. Reactive oxygen species antioxidant enzyme activities and gene expression patterns in leaves and roots of Kentucky bluegrass in response to drought stress and recovery[J]. Scientia Horticulturae, 2009,120(02):264-270.
- [14] 刘元军.花生品种抗旱性与根系形态、分布及生理特性关系的研究[D].泰安:山东农业大学,2014:29-36.
- [15] Tang D, Wei F, Qin S. Polyethylene glycol induced drought stress strongly influences seed germination, root morphology and cytoplasm of different kenaf genotypes[J]. Ind Crops Prod,2019,137(01):180-186.
- [16] 厉广辉,万勇善,刘凤珍,等.不同抗旱性花生品种根系形态及生理特性[J].作物学报,2014,40(03):531-541.
- [17] 王彩,万勇善,刘凤珍,等.苗期 PEG 渗透胁迫条件下花生品种抗旱性的研究[J].山东农业科学,2018,50(06):65-71.
- [18] 贺鸿雁,孙存华,杜伟,等.PEG6000 胁迫对花生幼苗渗透调节物质的影响[J].中国油料作物学报,2006(01):76-78+82.
- [19] 胡承伟,张学昆,邹锡玲,等.PEG 模拟干旱胁迫下甘蓝型油菜的根系特性与抗旱性[J].中国油料作物学报,2013,35(01):48-53.
- [20] 厉广辉,张昆,刘凤珍,等.不同抗旱性花生品种的叶片形态及生理特性[J].中国农业科学,2014,47(04):654-664.
- [21] 潘晓迪,张颖,邵萌,等.作物根系结构对干旱胁迫的适应性研究进展[J].中国农业科技导报,2017,19(02):51-58.
- [22] 杜云峰.不同根系类型水稻对干旱胁迫的响应差异及其生理基础研究[D].武汉:华中农业大学,2022.
- [23] 马富举,李丹丹,蔡剑,等.干旱胁迫对小麦幼苗根系生长和叶片光合作用的影响[J].应用生态学报,2012,23(03):724-730.
- [24] 汪堃,南丽丽,郭全恩,等.干旱胁迫对不同根型苜蓿根系构型的影响[J].生态学报,2022,42(20):8365-8373.
- [25] 李玲芬,延军平,刘冬梅,等.干旱一半干旱地区不同植被条件下土壤含水量变化及植被建设途径分析[J].水土保持通报,2009,29(01):18-22+27.
- [26] 任婧瑶,王婧,艾鑫,等.干旱胁迫下花生苗期耐旱生理应答特性分析[J].中国油料作物学报,2022,44(01):138-146.
- [27] I S Z, Yosef F, R A D, et al. Systemic signaling during abiotic stress combination in plants. [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(24):13810-13820.
- [28] Jing W Z, Lai Z H, Qiang W, et al. Effects of low temperature on leaf anatomy and photosynthetic performance in different genotypes of wheat following a rice crop[J]. International Journal of Agriculture

- and Biology,2015,17(06):1165-1171.
- [29] Ravi B, Foyer C H, Pandey G K. The integration of reactive oxygen species (ROS) and calcium signalling in abiotic stress responses. [J]. Plant, Cell & Environment, 2023,46(7):1985-2006.
- [30] 魏婧,徐畅,李可欣,等.超氧化物歧化酶的研究进展与植物抗逆性[J].植物生理学报,2020,56(12):2571-2584.
- [31] 秦斐斐,慈敦伟.花生幼苗对重复干旱胁迫的生理响应[J].生态学报,2017,37(24):8486-8498.
- [32] 郭艳阳,刘佳,朱亚利,等.玉米叶片光合和抗氧化酶活性对干旱胁迫的响应[J].植物生理学报,2018,54(12):1839-1846.
- [33] 杨娟,姜阳明,周芳,等.PEG模拟干旱胁迫对不同抗旱性玉米品种苗期形态与生理特性的影响[J].作物杂志,2021(01):82-89.
- [34] 李璇,岳红,王升,等.影响植物抗氧化酶活性的因素及其研究热点和现状[J].中国中药杂志,2013,38(07):973-978.
- [35] 王菲菲,张胜忠,胡晓辉,等.16份花生品种(系)油酸含量及FAD2基因型鉴定[J].花生学报,2022,51(04):29-34+43.
- [36] 姚丽璇.水稻HTS2基因参与热胁迫响应的分子机制研究[D].杭州:杭州师范大学,2024:38-39.