

干旱胁迫对奇亚籽生理特性的影响

邹原东, 孙玉楠, 武 晋, 徐 琰*

北京农业职业学院园艺园林学院, 北京

收稿日期: 2025年9月8日; 录用日期: 2025年10月9日; 发布日期: 2025年10月20日

摘 要

以日光温室中栽植的奇亚籽、辣椒和菠菜三种作物为实验材料, 在持续干旱条件下, 测定叶片的叶绿素、丙二醛(MDA)及可溶性蛋白的含量并分析其中的差异, 探究干旱胁迫下奇亚籽的生理响应特征, 为耐旱作物筛选及干旱区种植提供理论支撑。结果表明, 随着干旱胁迫的持续增加, 奇亚籽表现出较高的光合保护性和渗透调节能力。叶绿素含量比菠菜和辣椒分别高出356.52%和585.71%, 光合保护机制高效; MDA含量比菠菜低14.8%, 比辣椒高0.2%, 膜脂过氧化程度轻, 膜系统稳定性强; 可溶性蛋白含量比辣椒和菠菜分别高出38.5%和12.5%, 渗透调节能力突出, 表明奇亚籽通过协同生理机制具有更高的抗旱性。

关键词

奇亚籽, 叶绿素, MDA, 可溶性蛋白, 干旱胁迫

The Effect of Drought Stress on the Physiological Characteristics of Chia Seeds

Yuandong Zou, Yunan Sun, Jin Wu, Yan Xu*

College of Horticulture and Landscape Architecture, Beijing Vocation College of Agriculture, Beijing

Received: September 8, 2025; accepted: October 9, 2025; published: October 20, 2025

Abstract

In a solar greenhouse, chia seeds, chili peppers, and spinach were used as experimental materials. Under prolonged drought conditions, the contents of chlorophyll, malondialdehyde (MDA), and soluble proteins in leaves were measured and analyzed to explore the physiological responses of chia seeds under drought stress, providing theoretical support for drought-resistant crop screening and cultivation in arid regions. The results showed that as drought stress persisted, chia seeds exhibited

*通讯作者。

higher photoprotective properties and osmotic adjustment capacity. The chlorophyll content in chia seeds was 356.52% and 585.71% higher than that in spinach and chili peppers, respectively, indicating an efficient photosynthetic protection mechanism. The MDA content in chia seeds was 14.8% lower than that in spinach but only 0.2% higher than that in chili peppers, suggesting less membrane lipid peroxidation and stronger membrane system stability. The soluble protein content in chia seeds was 38.5% and 12.5% higher than that in chili peppers and spinach, respectively, highlighting its prominent osmotic adjustment ability. These findings indicate that chia seeds possess higher drought resistance through concerted physiological mechanisms.

Keywords

Chia Seeds, Chlorophyll, MDA, Soluble Protein, Drought Stress

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

奇亚籽(*Salvia hispanica*, L)为唇形科鼠尾草属一年生草本植物,原产于墨西哥及危地马拉,是阿兹特克文明的传统食用作物,因富含 α -亚麻酸、膳食纤维、蛋白质等营养物质及抗氧化活性物质被联合国粮农组织列为“具有潜力的超级食物”。其种子具极强吸水膨胀性,且植株在干旱半干旱环境中仍能维持生长,表现出显著的耐旱适应性,是研究植物抗旱生理的典型材料。

奇亚籽原产于干旱区,虽已被证实具有耐旱表型,但其干旱胁迫下的生理响应特征仍缺乏系统性研究;辣椒是典型需水量较高的重要经济作物,对干旱敏感;菠菜是常见叶菜类蔬菜,三种作物作为不同类型在研究上有代表性。本研究通过分析干旱胁迫下三种作物的叶绿素、MDA 及可溶性蛋白动态变化,旨在揭示不同类型作物抗旱能力的生理机制,并为其在干旱区农业种植及生态修复中的应用提供理论支撑。

2. 材料与方法

2.1. 试验材料

供试材料为奇亚籽,其种子系去年年初从美国引种后在北京试验田种植一季所得,本试验直接采用该季收获后自留的种子。

2.2. 试验方法

实验于日光温室中进行,环境参数控制如下:温度恒定 $25 \pm 1^\circ\text{C}$,光照强度维持 2500 lux,相对湿度调控在 20%~30%。2025 年 3 月下旬将奇亚籽按常规密度均匀播于穴盘中,每个穴盘点种两个,播种后立即浇透水,后续停止常规浇灌。播种后约 1 周观察出苗情况,1 个月后将奇亚籽幼苗移栽至相同环境条件的试验区域,待植株生长至株高约 20 厘米且叶片数达到 10 片时进行样品采集。所有处理均设置 3 次重复,同时辣椒、菠菜作为同期同环境栽植的对照作物,以用于比较不同物种对相同环境参数的响应差异。

2.3. 测定项目及方法

取样后处理叶片,擦除灰尘,剔除叶脉部分,留取中间部位进行测定。叶绿素含量测定采用分光光

度法法[1]。MDA 的测定采用 TBA 比色法[2]。可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝 G-250 法[3]。

2.4. 数据分析

数据采用 WPS 教育版制图，并用 SPSS17.0 进行方差分析。

3. 结果与分析

3.1. 干旱条件下不同品种叶绿素含量的比较

干旱胁迫初期，因气孔导度下降导致光合机构保护性调节，叶绿素含量维持相对稳定[4]；随胁迫加剧，水分亏缺引发类囊体膜结构损伤，叶绿素合成关键酶活性抑制与降解途径激活，导致叶绿素总量显著下降，且不同植物因抗旱机制差异表现出品种特异性响应梯度，重度干旱下部分物种叶片呈现明显黄化现象，标志着光合功能衰退。

在干旱胁迫条件下，奇亚籽、辣椒与菠菜三者的叶绿素含量表现出显著的种间差异特征(图 1)。从定量分析结果可见，奇亚籽叶片叶绿素含量最高，达到 8.2 mg/g，显著高于其他两个物种；菠菜叶绿素含量次之，为 2.3 mg/g，呈现中等水平；而辣椒叶片叶绿素含量最低，仅为 1.4 mg/g，在三者中表现出明显劣势。从种间梯度分布来看，叶绿素含量呈现奇亚籽 > 菠菜 > 辣椒的单向递减规律，其中奇亚籽与辣椒的叶绿素含量差值达 6.8 mg/g，方差分析也表明，奇亚籽、辣椒、菠菜三组的叶绿素含量存在极显著差异 ($p < 0.05$)，奇亚籽的叶绿素含量显著高于辣椒和菠菜，辣椒与菠菜的叶绿素含量相对接近且显著低于奇亚籽。体现出干旱环境下不同物种在叶绿素合成与维持能力上的显著分化。该差异特征为解析植物种间抗旱适应性提供了叶绿体层面的基础数据支撑，反映出不同物种在干旱胁迫下光合色素代谢策略的种特异性特征。

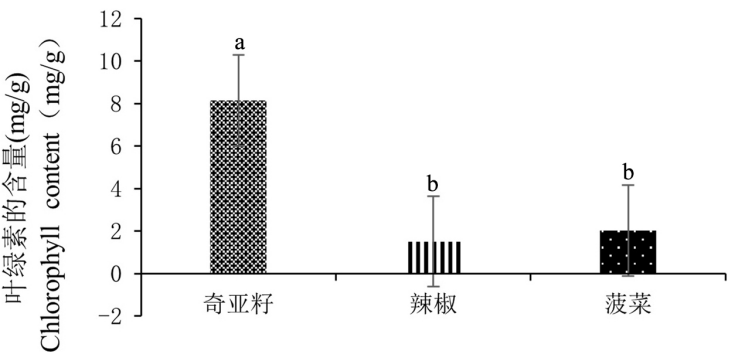


Figure 1. Comparison of chlorophyll content in different varieties under drought conditions
图 1. 干旱条件下不同品种叶绿素含量的比较

3.2. 干旱条件下不同品种 MDA 含量的比较

丙二醛是膜脂氧化的产物，其含量高低反映细胞膜损伤程度。干旱胁迫下 MDA 含量偏高，其细胞膜脂过氧化程度更严重，膜结构损伤更明显[5]，抗旱过程中细胞稳定性较弱；干旱条件下 MDA 含量较低，其细胞膜保护机制相对有效，膜损伤程度较轻，展现出相对较强的膜系统稳定性。

根据图 2 显示可知，干旱条件下奇亚籽、辣椒、菠菜的丙二醛(MDA)含量呈现显著差异。其中菠菜的 MDA 含量最高，为 0.055 $\mu\text{mol/g}$ ，高于奇亚籽和辣椒，后两者含量相近且处于较低水平。整体来看，干旱条件下三者的 MDA 含量表现为菠菜 > 辣椒 > 奇亚籽。方差分析表明，三组丙二醛含量的均值无统计学上的显著差异($p > 0.05$)

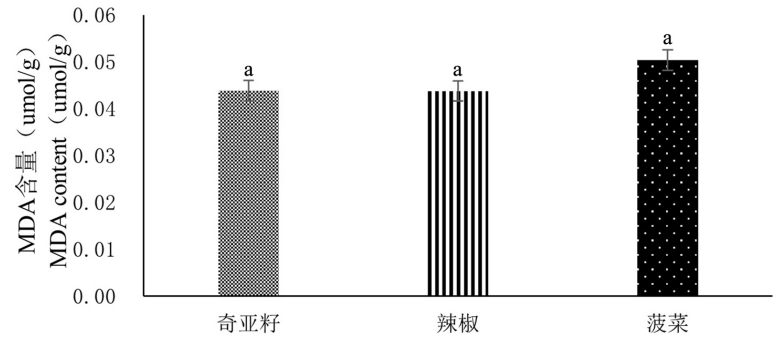


Figure 2. Comparison of MDA content in different varieties under drought conditions
图 2. 干旱条件下不同品种 MDA 含量的比较

3.3. 干旱条件下不同品种可溶性蛋白含量的比较

有研究表明，可溶性蛋白含量可作为评估物种抗旱性的有效参数。抗旱强的品种通过上调蛋白合成通路增强细胞保水能力，而抗旱弱的品种的胁迫响应机制相对保守，其蛋白合成能力在干旱胁迫下显著受限，与维管束组织发育特性及逆境响应基因的表达效率相关[6]。

从图 3 可以看出，在干旱胁迫下，奇亚籽、辣椒、菠菜三品种的可溶性蛋白含量呈现显著差异。奇亚籽可溶性蛋白含量最高，达 1.80 mg/g，较辣椒(1.30 mg/g)和菠菜(1.60 mg/g)分别高出 38.5%和 12.5%，辣椒的可溶性蛋白含量低，菠菜的可溶性蛋白含量介于二者之间(1.60 mg/g)。方差分析表明组间存在显著差异，奇亚籽、辣椒、菠菜的可溶性蛋白含量存在显著差异($p < 0.05$)。从变异幅度看，奇亚籽与辣椒的差值达 0.50 mg/g，反映出不同物种在干旱适应策略上的本质分化。该差异格局为筛选耐旱作物种质提供了生化指标依据。

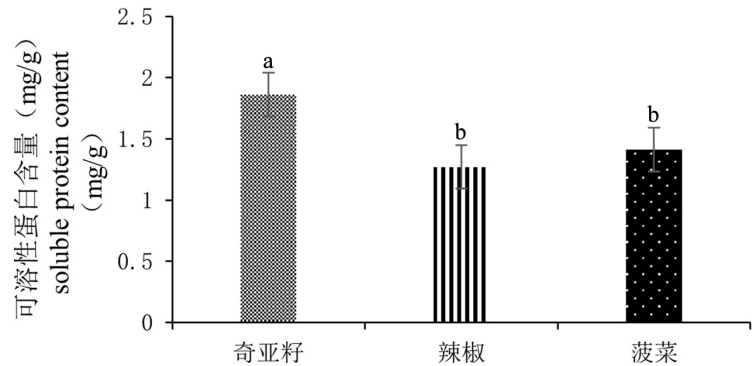


Figure 3. Comparison of soluble protein content among different varieties under drought conditions
图 3. 干旱条件下不同品种可溶性蛋白含量的比较

4. 结果与分析

干旱胁迫对植物叶绿素含量的影响因物种、胁迫强度及持续时间而异。多数研究表明，轻度干旱胁迫初期，植物通过调节抗氧化酶系统和渗透调节物质维持叶绿素合成，含量短暂上升或保持稳定；但随胁迫加剧，抑制叶绿素 a/b 结合蛋白基因表达，叶绿素合成受阻；叶绿素酶活性升高，分解加速，导致含量显著下降[7]。部分耐旱物种，如仙人掌科植物，可通过维持类囊体膜结构稳定性，在长期干旱下保持较高叶绿素水平。而水稻等 C3 植物在重度干旱下叶绿素降幅可达 30%~50%；小麦等作物因品种抗性不同表现出分化[8]。另外，叶绿素 a/b 比值变化也被证实与光系统稳定性相关，干旱下叶绿素 b 相对含量

下降更显著,影响光能捕获效率。叶绿素含量变化是植物响应干旱的重要生理指标,但其机制需结合物种特性与胁迫动态综合分析。本研究表明,奇亚籽在所测植物中叶绿素含量最高,与其耐旱适应性相关。高叶绿素含量有助于维持干旱条件下的光能捕获效率,为光合作用提供物质基础,奇亚籽可通过高效的叶绿素合成或保护机制应对逆境。辣椒叶绿素含量最低,其对于干旱胁迫更敏感。低叶绿素水平可加剧光系统损伤,降低光合效率,辣椒在干旱环境中光合机构稳定性较弱,需依赖其他生理途径维持生存[9]。菠菜叶绿素含量介于两者之间,其耐旱能力中等,通过平衡叶绿素合成与分解维持基本光合功能。通过三种植物的叶绿素含量差异与其耐旱特性也可看出,奇亚籽的高叶绿素特征可作为筛选耐旱物种的潜在指标,而辣椒的低叶绿素表现提示其在干旱区种植时需加强光保护措施。

干旱胁迫会导致植物膜脂过氧化加剧,丙二醛(MDA)作为膜脂氧化的主要产物,其含量变化是评估膜损伤程度的关键指标。前人研究显示,小麦、玉米、大豆等农作物在干旱胁迫下MDA含量呈升高趋势[10],表明膜系统在干旱中遭受损伤。部分抗旱品种,如耐旱牧草沙棘,在短期干旱下MDA积累较慢,而敏感品种水稻MDA迅速升高;长期干旱处理中,骆驼刺等植物可通过调节抗氧化酶系统减缓MDA累积,体现适应性机制[11]。另外,MDA含量变化还与胁迫强度、处理时间及植物生长阶段相关,高浓度干旱或衰老组织中MDA峰值更高。本研究表明,奇亚籽、辣椒、菠菜三种植物在干旱胁迫下的MDA含量存在明显差异。菠菜的MDA含量最高,其膜脂过氧化程度最严重,干旱胁迫下膜系统损伤更为剧烈,这与菠菜对干旱的耐受性较弱或抗氧化防御系统效率较低有关。奇亚籽与辣椒的MDA含量相近,二者膜损伤程度相当,通过维持抗氧化酶活性、积累渗透调节物质等生理机制缓解膜脂过氧化。菠菜的高MDA含量表明了其在干旱环境中面临更大的膜系统稳定性风险,而奇亚籽与辣椒的相对低含量表明其膜保护机制更有效。

多数研究表明,可溶性蛋白作为渗透调节剂和抗氧化物质,其含量差异直接影响植物的抗旱能力。干旱胁迫会诱导植物合成可溶性蛋白,通过提高细胞渗透调节能力维持水分平衡。例如,小麦、玉米等作物在干旱处理后,可溶性蛋白含量显著升高,与脯氨酸等渗透调节物质协同作用,增强细胞保水能力[12]。可溶性蛋白中的抗氧化酶及相关功能蛋白可通过清除自由基、修复氧化损伤,减轻干旱对细胞的伤害。番茄、水稻等研究显示,干旱胁迫下抗氧化活性与蛋白含量的升高,与植物抗逆性呈正相关[13]。耐旱物种的可溶性蛋白增幅通常高于敏感物种,且品种间遗传变异导致蛋白表达谱分化。除此之外,胁迫强度、持续时间及植物生长阶段也会影响蛋白含量变化,如中度干旱胁迫下的蛋白积累效应往往强于重度胁迫[14][15]。本研究表明,奇亚籽的可溶性蛋白含量显著高于辣椒和菠菜,具备更强的渗透调节潜力。奇亚籽作为原产地干旱、半干旱地区典型的耐旱植物,高含量可溶性蛋白与其通过积累亲水性物质维持细胞膨压、抵御脱水胁迫的生存策略直接相关。辣椒的可溶性蛋白含量最低,与人工栽培环境下的抗逆需求较低有关;菠菜含量介于两者之间,其对于干旱胁迫的适应能力弱于奇亚籽但强于辣椒,与叶片组织的水分需求及代谢特性相关。奇亚籽的高含量蛋白通过增强细胞保水能力和清除活性氧,减轻干旱对光合系统、膜结构的损伤;而辣椒的低含量使其在干旱条件下更易出现生理干旱,需通过气孔调节、根系形态适应等机制补偿抗逆性。

综上所述,叶绿素研究结果为解析植物耐旱机制及农业生产中的品种选育提供了数据支持。MDA含量是反映植物干旱响应和抗逆性的重要标志,可作为筛选植物抗旱性的重要指标,但其动态变化需结合作物种类、胁迫模式综合分析,后续可结合抗氧化酶活性、渗透调节物质等指标,进一步解析三种植物干旱响应的分子机制及耐逆性差异。可溶性蛋白的动态变化是植物应对干旱的重要生理策略,但其具体分子机制及与抗逆性的量化关系仍需深入研究。三种植物的可溶性蛋白含量差异与其生态适应性及抗旱策略密切相关,奇亚籽的高蛋白特征可成为其耐旱优势的关键生理基础,为筛选耐旱作物品种提供了参考依据。本试验今后可继续在干旱强度与时间梯度,设置轻度、重度、持续性与间歇性干旱等多梯度胁

胁迫处理, 来量化叶绿素降解速率、MDA 累积阈值及可溶性蛋白响应的动态规律; 可聚焦生理指标测定, 对叶绿素合成关键酶基因、抗氧化系统调控基因的基因表达及脯氨酸合成途径的分子机制进行解析, 来揭示表型差异的内在调控逻辑; 可扩大模式植物尤其是对照植物的可比性, 并通过多年多点试验来验证生理指标与抗旱表型的关联性, 以完善植物抗旱机制的持续性研究。

基金项目

北京农业职业学院科技研发推广类项目: 施肥对奇亚产量及品质影响的研究, 编号(xy-yf-18-11)。

参考文献

- [1] 朱广惠, 刘艳华. 植物与植物生理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [2] 闫姝婕, 孔超, 姜乐, 等. 外源脯氨酸对干旱胁迫下番茄幼苗生长发育的影响[J]. 天津农业科学, 2025, 31(6): 51-58.
- [3] 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.
- [4] 李进华, 麦生威, 李冰, 等. 干旱胁迫对翅茎白粉藤光合作用及叶绿体超微结构的影响[J]. 广西林业科学, 2023, 52(6): 707-712.
- [5] 张宏芝, 王立红, 时佳, 等. 土壤水分对不同抗旱性春小麦品种叶片保护性酶活性及产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2024, 61(5): 1041-1047.
- [6] 乔羽, 赵允格, 高丽倩, 等. 斑块面积对干燥-复水条件下藓类植物生理活性的影响[J]. 生态学报, 2024, 44(5): 2081-2088.
- [7] 王芳, 彭云玲, 方永丰, 等. 花后干旱胁迫对不同持绿型玉米叶片衰老的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(4): 60-66.
- [8] 吴梅, 张边江, 陈全战, 等. C4 高效光合基因在 C3 植物中的应用研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(3): 68-71.
- [9] 靳红磊, 明宇, 王宏斌. 阴生和阳生植物在光合结构及功能中的差异概述[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2021, 60(6): 1-8.
- [10] 陈默, 陈璐, 黄晓雅, 等. PEG 模拟干旱胁迫下苗期木薯的生长生理响应[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2024, 39(4): 15-22.
- [11] 麦格皮热提古丽·达吾提, 王海鸥, 陈晓楠, 等. 干旱胁迫下丛枝菌根真菌对疏叶骆驼刺和多枝柞柳生长及生理的影响[J]. 西北植物学报, 2023, 43(11): 1897-1909.
- [12] 曹梦琳, 赵智勇, 毕红园, 等. 不同小麦种质苗期抗旱性筛选[J]. 农业与技术, 2024, 44(17): 5-10.
- [13] 姜岩岩, 徐晓飞, 郝桂杰. 夜间低温对栽培和野生番茄果实抗逆性的影响[J]. 华北农学报, 2012, 27(6): 97-101.
- [14] 金思雨, 彭祚登, 张舒乐. 同程度干旱胁迫和复水处理对刺槐苗木生理指标的影响[J]. 东北林业大学学报, 2024, 52(10): 27-39.
- [15] 刘江, 李明倩, 常峻菲, 等. 干旱胁迫及复水对大豆关键生育时期叶片生理特性的影响[J]. 中国农业气象, 2022, 43(8): 622-632.