



干旱胁迫下心叶驼绒藜生理响应特性

柯梅 侯钰荣 魏鹏 兰吉勇 康帅 李超

Physiological responses of *Krascheninnikovia ewersmannia* under drought stress

KE Mei, HOU Yurong, WEI Peng, LAN Jiyong, KANG Shuai, LI Chao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0701>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

外源脱落酸对红砂叶片渗透调节物质含量及抗氧化酶活性的影响

Effects of exogenous abscisic acid on the content of osmotic adjustment substances and antioxidant enzyme activity in the leaves of *Reaumuria soongorica*

草业科学. 2020, 37(2): 245 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0172>

IAA改善PEG处理下白三叶幼苗叶片抗氧化保护和渗透调节能力

Improvement of oxidation resistance and osmotic regulation of white clover seedlings by exogenous auxin under polyethylene glycol stress

草业科学. 2017, 11(11): 2295 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0048>

水分胁迫下4种观赏草的生理特性

Morphological and physiological responses of four ornamental grasses under drought stress

草业科学. 2019, 36(12): 3024 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0085>

羊草根、叶在干旱和盐胁迫下的生理反应

Physiological response of leaves and roots of *Leymus chinensis* under drought and salt stress

草业科学. 2017, 11(8): 1705 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0528>

干旱胁迫下5种禾本科牧草幼苗期的生理特性

Study on physiological characteristics of five gramineous grass seedlings under drought stress

草业科学. 2018, 12(5): 1106 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0503>

6种高寒禾草对于干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价

Physiological response of six alpine grass varieties to drought stress and their drought resistance evaluation

草业科学. 2021, 38(12): 2397 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0078>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0701

柯梅, 侯钰荣, 魏鹏, 兰吉勇, 康帅, 李超. 干旱胁迫下心叶驼绒藜生理响应特性. 草业科学, 2023, 40(5): 1349-1357.

KE M, HOU Y R, WEI P, LAN J Y, KANG S, LI C. Physiological responses of *Krascheninnikovia ewersmannia* under drought stress. Pratacultural Science, 2023, 40(5): 1349-1357.

干旱胁迫下心叶驼绒藜生理响应特性

柯 梅, 侯钰荣, 魏 鹏, 兰吉勇, 康 帅, 李 超

(新疆维吾尔自治区畜牧科学院草业研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 以心叶驼绒藜 (*Krascheninnikovia ewersmannia*) 为研究材料, 用 0 (CK)、5%、15%、25%、30%、35% 聚乙二醇 (PEG-6000) 模拟干旱胁迫, 从渗透性调节物质、保护性物质、脂肪酸组分等方面研究其对胁迫的生理响应。结果显示, 在 5%、15% 低浓度 PEG 处理下, 驼绒藜幼苗通过增加渗透调节物质脯氨酸含量、启动抗氧化酶系统、保持膜脂中的饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸动态平衡来减弱膜脂过氧化对细胞膜系统的损害; 在 25% PEG 处理下, 丙二醛含量急剧增加, 叶片膜脂过氧化程度加重, 植物通过大幅提高脯氨酸含量、增强抗氧化酶活性、增大膜脂中不饱和脂肪酸含量减少干旱胁迫带来的膜脂损伤; 在 30%、35% 高浓度 PEG 处理下, 脯氨酸含量下降、抗氧化酶系统活性降低、饱和脂肪酸含量增加, 膜脂受损害严重。由此得出, 驼绒藜幼苗在 PEG 处理液为 25% 时, 渗透调节物质、保护性物质、不饱和脂肪酸等物质协同作用形成高效的防御系统以增强对干旱胁迫的抗性。

关键词: 心叶驼绒藜; PEG 胁迫; 渗透调节; 抗氧化酶; 脂肪酸; 抗旱性

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2023)05-1349-09

Physiological responses of *Krascheninnikovia ewersmannia* under drought stress

KE Mei, HOU Yurong, WEI Peng, LAN Jiyong, KANG Shuai, LI Chao

(Grassland Research Institute of Xinjiang Academy of Animal Science, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: The physiological responses of *Krascheninnikovia ewersmannia* to drought stress was studied using 0 (CK), 5%, 15%, 25%, 30%, and 35% polyethylene glycol (PEG-6000) to simulate drought stress from the aspects of osmotic regulation substances, protective substances, and fatty acid components. The results showed that under the 5%, 15% low concentration of PEG treatment, the damage of membrane lipid peroxidation to the cellular membrane system was weakened through increasing the content of osmotic adjustment substance proline, initiating the antioxidant enzyme system, and maintaining the dynamic balance of saturated fatty acids and unsaturated fatty acids in membrane lipids; under the treatment of 25% PEG, the content of malondialdehyde increased sharply and the degree of membrane lipid peroxidation was aggravated. Plants can reduce membrane lipid damage caused by drought stress by significantly increasing the proline content, enhancing antioxidant enzyme activity, and increasing unsaturated fatty acid content in membrane lipid; under the 30%, 35% high concentration PEG treatment, proline content decreased, antioxidant enzyme system activity decreased, saturated fatty acid content increased, and membrane lipids were seriously damaged. It is concluded that with the 25% PEG treatment solution, osmoregulatory substances, protective substances, unsaturated fatty acids, and other substances act together to form an efficient defense system to enhance the resistance to drought stress.

Keywords: *Krascheninnikovia ewersmannia*; PEG stress; osmotic regulation; antioxidant enzyme; fatty acid; drought resistance

收稿日期: 2022-09-01 接受日期: 2022-12-07

基金项目: 自治区公益性项目“五种荒漠植物芽期抗旱性评价”(ZY2022022); 自治区基金面上项目 (2020D01A38)

第一作者: 柯梅 (1986-), 女, 新疆巴里坤人, 高级实验师, 硕士, 研究方向为牧草遗传育种及抗性评价。E-mail: km1108@163.com

通信作者: 兰吉勇 (1975-), 男, 山东招远人, 高级实验师, 本科, 研究方向为牧草栽培及抗性评价。E-mail: lji_wlmq@163.com

Corresponding author: LAN Jiyong E-mail: ljy_wlmq@163.com

干旱是一个世界性问题^[1]。据统计,全球干旱、半干旱地区占陆地面积的 45% 以上,并且呈逐渐增加趋势^[2]。水分是植物体的重要组成部分,它参与植物整个生长过程,是限制植物生长的重要生物因子^[3]。干旱胁迫阻碍植物的生长发育,植物根据当前的应激条件对内部生理代谢网络进行调配,以获得新的稳态来适应逆境。

心叶驼绒藜 (*Krascheninnikovia ewersmannia*) 是藜科驼绒藜属多年生强旱生半灌木,在我国仅分布于新疆^[4]。心叶驼绒藜粗蛋白含量高,骆驼、山羊等喜食,营养丰富,经济价值高,是优良的饲用半灌木;同时具有较强的防风固沙和水土保持能力,有作为干旱荒漠区生态植被恢复物种的潜力,生态价值高^[5]。国内外对驼绒藜主要从种子萌发特性^[6]、微生境对土壤种子库影响^[7]、再生体系建立^[8]、栽培管理技术^[9]、根系发育^[10]、改良土壤^[11]、种群空间格局分形特征等^[12-14] 等方面开展了研究,伊犁心叶驼绒藜 (*K. ewersmanniana* ‘Yili’) 是 2006 年经驯化培育的野生栽培品种^[15],对其主要开展了生物学及生态学特性等相关研究^[16-17],在逆境条件下心叶驼绒藜膜脂脂肪酸与相关生理指标之间的关系研究还未见报道。

PEG 是一种新型的高分子渗透剂,能使植物处于类似于干旱的胁迫状态之下而限制植物的吸水速率,其本身不会进入植物细胞引起质壁分离^[18]。目前已在燕麦 (*Avena sativa*)^[19]、紫花苜蓿 (*Medicago sativa*)^[20] 等多种植物中广泛运用,效果较好。植物在受到干旱胁迫时,会通过生理代谢形成一系列适应机制与策略^[21]。主要从合成渗透调节物质、增加抗氧化酶活性以及改变膜脂通透性等途径来提高自身抵抗胁迫的能力^[22-23]。细胞膜是植物细胞进行能量转换、物质交换、信息传递和代谢调节的界面^[24],干旱胁迫引起细胞失水,可引起植物体内膜脂不饱和脂肪酸发生一系列自由基反应,导致膜脂过氧化^[25],从而破坏细胞膜结构,严重时可导致植物细胞死亡。

本研究以心叶驼绒藜为研究对象,采用 PEG-6000 设置不同梯度模拟干旱胁迫,通过测定驼绒藜幼苗渗透调节物质、保护性物质及脂肪酸组分及含

量变化,探讨驼绒藜幼苗在干旱胁迫下的生理响应特性及其对干旱的耐受性,揭示干旱胁迫下驼绒藜幼苗生理响应与细胞膜结构功能之间的关系,认识驼绒藜适应干旱的特性,为抗旱性牧草的选育、荒漠化地区生态恢复、草地生态系统的稳定和健康可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与培养方法

供试心叶驼绒藜种子采集于新疆呼图壁县。将清选后未去苞片的种子与土壤拌匀,撒播于花盆中覆盖一层薄土,浇蒸馏水置于温度为 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、光照 $12\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ 人工智能温室中发芽,待种子出苗后间苗,每盆保留 5 株。

1.2 试验处理

心叶驼绒藜幼苗长至株高为 20 cm 左右,分别用含有 0 (对照)、5%、15%、20%、25%、30%、35% 聚乙二醇 (PEG-6000) 的 Hoagland 营养液模拟干旱胁迫,每隔 3 d 浇灌 1 次处理液,处理条件与材料培养阶段相同。待叶片发生不同程度萎蔫时,分别取各处理浓度下植株混合均匀的叶片测定各项指标,各指标 5 个重复,脂肪酸 3 个重复。

1.3 测定指标与方法

叶片相对含水量 (relative water content, WRC) 采用饱和称重法测定^[26],叶片相对电导率 (relative electric conductivity, REC) 采用浸泡法^[27]测定,借助试剂盒采用硫代巴比妥酸法测定样品丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 含量,采用茚三酮显色法测定脯氨酸 (proline, Pro) 含量,过氧化物酶 (peroxidase, POD) 活性、过氧化氢酶 (catalase, CAT) 活性、超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 活性均参照李合生^[28]的方法测定,脂肪酸 (fatty acid, FA) 组分及含量使用 GC-MS 气质联用仪进行测定^[29]。

1.4 数据处理

采用 GC-MS 数据分析软件分析脂肪酸数据,采用 SPSS 17.0 进行单因素方差分析,以 Duncan 法对各测定数据进行多重比较,显著水平为 $P < 0.05$;

采用 Excel 2003 对原始数据进行整理及表格绘制。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对驼绒藜叶片生理状态的影响

WRC 反映植物遭受胁迫后的整体水分状况,是衡量植物水分维持能力的重要指标之一^[30]。心叶驼绒藜幼苗经不同梯度 PEG 处理后,叶片 WRC 呈下降趋势(表 1),各处理与对照相比差异显著($P < 0.05$)。5% PEG 处理下叶片 WRC 与对照相比下降了 7.5%;在 15%、25% 处理下叶片 WRC 与对照相比分别下降了 26.34%、37.13%,下降速率较缓慢;35% 处理下 WRC 下降不超过 46.12%,仍保持 50% 以上的含水量,说明心叶驼绒藜具有较强的叶片保水能力。

REC 的大小表示细胞膜受伤害的程度。随着处理液浓度的增大,REC 呈先升高后下降的趋势。在 25% 处理下,REC 达最大值,为 67.59%,是对照的 2.8 倍,表明细胞膜透性增加,膜受损伤程度加重;至 30%、35% 处理下,REC 缓慢下降,但仍显著高于对照($P < 0.05$)。

MDA 是膜脂过氧化的产物,其含量代表细胞膜质过氧化的程度,反映植物受胁迫程度大小^[31]。5% PEG 胁迫下,驼绒藜 MDA 含量与对照无显著差异($P > 0.05$),随 PEG 浓度增大,驼绒藜幼苗 MDA 含量显著增加,在 25% PEG 处理下 MDA 含量急剧积

累,达 $228.80 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$,比对照增加了 145.39%,与其他各处理浓度 MDA 含量差异显著($P < 0.05$);之后随处理液浓度增加至 30%、35%,MDA 含量与 25% PEG 处理相比迅速减少,但与对照无差异($P > 0.05$)。表明随处理液浓度增大,驼绒藜叶片膜脂过氧化增大,在处理液浓度为 25% 时,植株受胁迫程度最大,细胞膜受损害严重。

2.2 干旱胁迫对驼绒藜叶片保护性物质的影响

Pro 作为重要的渗透调节物质,会在干旱胁迫时主动积累以适应逆境。5% PEG 处理下,驼绒藜体内 Pro 含量与对照差异不显著($P > 0.05$)(表 1);在 15% 和 25% 处理下,随处理液浓度的增大而呈显著上升趋势,Pro 含量分别是对照的 2.92 和 17.37 倍,且在 25% 处理下 Pro 含量达到最大值,表明在一定浓度 PEG 处理下,驼绒藜体内渗透保护性物质 Pro 含量迅速且大量积累,以适应水分胁迫;30% 和 35% 处理下,Pro 含量迅速下降,与对照无显著差异($P > 0.05$)。

CAT、SOD 和 POD 是植物体内清除活性氧的 3 种重要保护酶。CAT 活性随 PEG 处理浓度增加而增加,在 25% 处理时达最大值,为 $6.41 \text{ U} \cdot \text{mg}^{-1}$,比对照增加了 63.52%,与 30%、35% 处理下活性差异不显著($P > 0.05$);SOD 活性在 5% 处理下与对照差异不显著($P > 0.05$),随 PEG 处理浓度的增加 SOD 活

表 1 PEG 处理对驼绒藜叶片相关生理指标的影响
Table 1 Effect of PEG treatment on physiological indexes in *K. ewersmanniana* leaves

生理指标 Physiologic index	PEG浓度 Concentration of PEG					
	0	5%	15%	25%	30%	35%
WRC/%	93.02 ± 2.51a	86.03 ± 0.62b	68.52 ± 2.02c	58.48 ± 0.58d	52.39 ± 1.03e	50.12 ± 0.64e
REC/%	24.15 ± 2.08e	45.23 ± 0.98d	62.53 ± 3.89ab	67.59 ± 1.09a	58.57 ± 1.47bc	52.89 ± 4.19cd
MDA/(nmol·g ⁻¹)	93.24 ± 3.11cd	105.00 ± 6.25c	133.15 ± 5.66b	228.80 ± 10.74a	89.96 ± 3.37cd	79.38 ± 1.52d
Pro/(μg·g ⁻¹)	51.12 ± 2.97c	55.42 ± 1.76c	149.16 ± 1.14b	887.88 ± 34.77a	67.50 ± 2.46c	60.66 ± 0.67c
CAT/(U·mg ⁻¹)	3.92 ± 0.09d	4.51 ± 0.32c	5.49 ± 0.15b	6.41 ± 0.21a	6.23 ± 0.16a	6.25 ± 0.16a
SOD/(U·mg ⁻¹)	8.09 ± 0.51c	8.38 ± 0.13c	12.41 ± 1.17ab	15.16 ± 0.13a	13.57 ± 1.83a	9.62 ± 0.31bc
POD/(U·mg ⁻¹)	3.46 ± 0.14d	3.96 ± 0.21d	5.93 ± 0.14b	8.21 ± 0.29a	6.08 ± 0.28b	4.86 ± 0.32c

WRC, 相对含水量; REC, 相对电导率; MDA, 丙二醛; Pro, 脯氨酸; CAT, 过氧化氢酶; SOD, 超氧化物歧化酶; POD, 过氧化物酶。同行不同字母表示不同PEG浓度处理间差异显著($P < 0.05$)。下表同。

WRC, relative water content; REC, relative electric conductivity; MDA, malondialdehyde; Pro, proline; CAT, catalase; SOD, superoxide dismutase; POD, peroxidase. Different lowercase letters within the same row indicate significant difference between the different concentrations of PEG at the 0.05 level. This is applicable for the following tables as well.

性增大,在 25% 处理下活性最大,为 $15.16 \text{ U} \cdot \text{mg}^{-1}$,比对照增加了 87.39%,与 15%、30% 处理浓度活性差异不显著 ($P > 0.05$),35% 处理下 SOD 活性下降,与对照无显著差异。POD 活性总体呈先升高后降低的趋势,且在 25% 处理下活性最大,与对照相比增加了 137.28%,之后 POD 活性呈下降趋势,但仍高于对照,二者差异显著 ($P < 0.05$)。表明植物在受到干旱胁迫时,植物体内的 3 种保护酶活性同步增加,在 25% 处理下 3 种酶活性都达到峰值,以清除活性氧对植物造成的伤害,其中 POD 活性增幅最大,其次是 SOD, CAT 增幅较小。

2.3 干旱胁迫对驼绒藜叶片脂肪酸组成及含量的影响

驼绒藜叶片总脂肪酸 (FA) 主要由 16 种脂肪酸构成 (表 2),包括 6 种饱和脂肪酸 (saturated fatty acids, SFA) 和 10 种不饱和脂肪酸 (unsaturated fatty acids, UFA)。SFA 中,主要由棕榈酸 (C16:0) 和硬脂酸 (C18:0) 组成;UFA 主要由 α -亚麻酸 (C18:3N3)、岩芹酸 (C18:1N12)、油酸 (C18:1N9C)、亚油酸 (C18:2N6) 组成,其中,单不饱和脂肪酸 (monounsaturated fatty acids, MUFA) 7 种、多不饱和脂肪酸 (polyunsaturated fatty acids, PUFA) 3 种。驼绒藜幼苗叶片经不同浓度 PEG 处理后,脂肪酸组分与对照相比未发生改变,但脂肪酸各组分含量随 PEG 处理浓度的增大而发生变化。

5%、15% PEG 处理下,除了山嵛酸 (C22:0) 含量在 15% 处理下与对照差异显著 ($P < 0.05$),其余各组分含量与对照相比无显著差异 ($P > 0.05$);25% 胁迫下脂肪酸各组分含量都达到了最大值,与对照相比差异显著 ($P < 0.05$);随着处理浓度的增加,在 30% 和 35% 处理下,不饱和脂肪酸中的油酸 (C18:1N9C)、 α -亚麻酸 (C18:3N3)、异油酸 (C18:1N7) 含量与饱和脂肪酸中的花生酸 (C20:0)、山嵛酸 (C22:0)、木蜡酸 (C24:0) 含量与 25% 处理差异不显著 ($P > 0.05$)。上述结果表明 PEG 处理对驼绒藜叶片细胞膜脂肪酸组分含量产生了一定程度的影响,在 PEG 25% 处理下,植物通过增加脂肪酸的含量而减小胁迫造成的损害。

2.4 PEG 胁迫下驼绒藜叶片各指标相关性分析

相关性分析 (表 3) 表明, WRC 与所有指标都呈

负相关关系,其中与 Pro 含量、MDA 含量、SOD 活性相关性不显著,与 REC、POD 活性、CAT 活性、SFA 含量、UFA 含量极显著负相关 ($P < 0.01$),相关系数分别为 -0.737 、 -0.708 、 -0.928 、 -0.682 、 -0.748 ;CAT 活性与 Pro 含量、MDA 含量相关性不大,与 SOD 活性显著正相关,与 REC、POD 活性极显著正相关 ($P < 0.01$);SFA 与 UFA 含量相关性一致,表现为协同正相关,相关系数为 0.942;其他指标两两之间在 0.01 或 0.05 水平呈显著或极显著相关。

3 讨论与结论

干旱胁迫时细胞内的水分会向外界环境散失,相对含水量逐渐下降,植物细胞膨压减小,造成渗透胁迫^[32],植物为了缓解和抵御渗透胁迫带来的伤害,会在细胞内合成 Pro 等有机物质或积累无机离子进行渗透调节作用^[33],渗透物质的积累量能够反映干旱胁迫的程度^[34]。本研究中,随处理浓度的升高,Pro 含量在 25% 处理下达到最大,其积累量是对照的 17.37 倍,Pro 含量增加较快且增幅较大,说明干旱对植物造成的损害加重,植物迅速合成 Pro 以增加溶质含量提高细胞的渗透势,维持细胞的含水量和膨压,从而增强植物的耐旱能力,这与祁娟等^[30]和李波等^[35]的研究中 Pro 累积趋势结果相一致。处理液浓度超过 25%,Pro 含量呈下降趋势,说明高浓度的干旱胁迫已经超出了驼绒藜幼苗自身的渗透调节能力。

MDA 是一种具有细胞毒性的物质,是细胞膜质过氧化重要产物,以其含量可作为判断膜脂过氧化的程度^[36]。本研究中,5%、15% 处理下 MDA 含量比对照增加了 11.20%、29.97%,说明细胞膜质过氧化程度相对较低,细胞膜受伤害较小;与对照相比,25% 处理下的 MDA 含量增加了 59.25%,表明细胞膜质过氧化程度高,细胞膜系统受损程度严重,膜脂过氧化程度加重,膜通透性发生改变,细胞中的电解质大量外渗,使植物组织浸泡液的电导率升高^[37],叶片相对含水量下降,抗旱能力变弱^[38],与本研究结果相契合,即驼绒藜叶片相对含水量与相对电导率显著负相关。

脂肪酸作为细胞膜的重要组成部分^[39],是维持正常膜功能的基础结构。脂肪酸按饱和度分为饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸,植物在受到干旱胁迫时,

表 2 不同浓度 PEG 胁迫下驼绒藜叶片脂肪酸组分及含量

Table 2 Fatty acid composition and content in *K. ewersmanniana* leaves under different concentrations of PEG stress

脂肪酸含量 Fatty acid composition content/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	PEG浓度 PEG concentration					
	0	5%	15%	25%	30%	35%
岩芹酸(C18:1N12) Petroselinic acid	82.22 $\pm$ 4.35d	98.20 $\pm$ 6.71cd	108.67 $\pm$ 7.72abcd	166.60 $\pm$ 14.59a	153.62 $\pm$ 33.87ab	140.47 $\pm$ 4.15abc
油酸(C18:1N9C) Oleic acid	70.40 $\pm$ 3.49c	86.88 $\pm$ 3.78bc	91.11 $\pm$ 9.33bc	166.30 $\pm$ 15.17a	143.93 $\pm$ 29.38a	120.98 $\pm$ 4.54ab
反-10-十九碳烯酸 (C19:1N9T) 10-Transnonadecenoic acid	34.93 $\pm$ 0.93c	39.51 $\pm$ 2.79c	38.24 $\pm$ 2.80c	66.67 $\pm$ 3.76a	53.06 $\pm$ 3.72b	58.79 $\pm$ 4.26ab
亚油酸(C18:2N6) Linoleic acid	71.03 $\pm$ 2.45c	82.55 $\pm$ 5.64c	78.48 $\pm$ 5.93c	139.00 $\pm$ 7.81a	111.85 $\pm$ 7.84b	124.87 $\pm$ 9.62ab
顺-11-二十碳烯酸 (C20:1) 11-Eicosenoic acid	35.82 $\pm$ 4.48c	37.68 $\pm$ 2.89c	48.72 $\pm$ 13.53bc	106.92 $\pm$ 2.33a	56.31 $\pm$ 6.77bc	63.23 $\pm$ 4.50b
α -亚麻酸(C18:3N3) Alpha Linolenic acid	444.75 $\pm$ 21.45b	471.06 $\pm$ 26.29b	475.43 $\pm$ 45.81b	874.10 $\pm$ 23.75a	656.64 $\pm$ 46.93ab	475.73 $\pm$ 22.85b
芥酸(C22:1N9) Erucic acid	9.01 $\pm$ 0.40c	10.34 $\pm$ 0.80c	9.82 $\pm$ 1.14c	17.19 $\pm$ 0.27a	14.00 $\pm$ 0.57b	12.45 $\pm$ 0.47b
反异油酸(C18:1N7T) Transvaccenic acid	10.93 $\pm$ 1.49c	10.24 $\pm$ 1.00c	12.14 $\pm$ 0.95bc	17.21 $\pm$ 0.86a	13.25 $\pm$ 1.07bc	14.70 $\pm$ 1.29ab
异油酸(C18:1N7) Vaccenic acid	7.86 $\pm$ 0.50b	7.08 $\pm$ 0.26b	8.18 $\pm$ 0.55b	16.48 $\pm$ 1.63a	16.22 $\pm$ 2.58a	13.78 $\pm$ 0.67a
γ -亚麻酸(C18:3N6) Gamma Linolenic acid	2.87 $\pm$ 0.49c	2.78 $\pm$ 0.21c	2.87 $\pm$ 0.33c	5.75 $\pm$ 0.30a	4.48 $\pm$ 0.30b	4.83 $\pm$ 0.52ab
肉豆蔻酸(C14:0) Myristic acid	6.70 $\pm$ 0.37c	7.97 $\pm$ 0.45c	8.16 $\pm$ 0.47c	14.28 $\pm$ 0.74a	12.09 $\pm$ 0.36b	11.55 $\pm$ 0.61b
棕榈酸(C16:0) Palmitic acid	544.87 $\pm$ 19.05c	591.69 $\pm$ 31.28c	607.64 $\pm$ 24.19c	876.39 $\pm$ 45.57a	762.40 $\pm$ 27.95b	700.30 $\pm$ 9.41b
硬脂酸(C18:0) Stearic acid	332.44 $\pm$ 31.94c	375.34 $\pm$ 19.30c	378.57 $\pm$ 31.20c	585.65 $\pm$ 44.05a	475.47 $\pm$ 13.44b	404.59 $\pm$ 10.14bc
花生酸(C20:0) Arachidic acid	6.77 $\pm$ 0.79b	8.85 $\pm$ 0.52b	8.97 $\pm$ 0.56b	14.30 $\pm$ 0.79a	13.06 $\pm$ 1.32a	12.54 $\pm$ 0.34a
山嵛酸(C22:0) Behenic acid	12.68 $\pm$ 1.34c	16.30 $\pm$ 0.58bc	20.67 $\pm$ 1.60b	37.23 $\pm$ 2.33a	34.02 $\pm$ 3.80a	31.08 $\pm$ 1.40a
木蜡酸(C24:0) Lignoceric acid	11.92 $\pm$ 0.66b	14.49 $\pm$ 0.98b	15.26 $\pm$ 1.41b	30.52 $\pm$ 1.59a	28.07 $\pm$ 4.32a	25.66 $\pm$ 0.16a
不饱和脂肪酸(UFA) Unsaturated fatty acid	769.82 $\pm$ 42.97c	846.31 $\pm$ 85.82c	873.65 $\pm$ 143.34c	1 576.24 $\pm$ 103.76a	1 223.37 $\pm$ 201.39b	1 252.44 $\pm$ 60.28b
饱和脂肪酸(SFA) Saturated fatty acid	915.37 $\pm$ 91.49d	1 014.64 $\pm$ 91.59cd	1 039.27 $\pm$ 99.14cd	1 558.37 $\pm$ 157.86a	1 325.11 $\pm$ 86.99b	1 185.71 $\pm$ 31.44bc

不饱和脂肪酸由于具有活跃的不饱和键而易被氧化, 导致膜上脂肪酸饱和度发生变化, 从而引起膜的流动性改变。本研究中, 在低浓度的 PEG 处理下, 脂肪酸各组分含量随 PEG 处理浓度的升高缓慢增加, 与对照相比差异不显著 ($P < 0.05$), 膜流动性未受到影响。当处理液浓度为 25% 时, 不饱和脂肪酸含量迅速增大, 与低浓度处理差异显著 ($P < 0.05$),

表明在 25% 干旱胁迫下, 植物通过增加不饱和脂肪酸的含量以提高膜脂的流动性, 减小膜损伤, 从而提高植物的抗旱性; PEG 处理浓度为 30% 时, 不饱和脂肪酸所占总脂肪酸含量下降至 48%, 而饱和脂肪酸所占总脂肪酸含量增加至 52%, 表明高浓度的 PEG 处理对植物造成膜损伤, 不饱和脂肪酸发生氧化反应, 饱和脂肪酸含量增加, 膜脂流动性下降, 包

表 3 PEG 胁迫下驼绒藜叶片各指标相关性分析
Table 3 Correlation analysis of indicators in *C. ewersmanniana* leaves under PEG stress

指标 Index	WRC	REC	Pro	MDA	SOD	POD	CAT	SFA	UFA
WRC	1								
REC	-0.737**	1							
Pro	-0.277	0.537*	1						
MDA	-0.144	0.540*	0.958**	1					
SOD	-0.396	0.736**	0.856**	0.883**	1				
POD	-0.708**	0.876**	0.771**	0.745**	0.848**	1			
CAT	-0.928**	0.808**	0.429	0.35	0.543*	0.848**	1		
SFA	-0.682**	0.692**	0.730**	0.619**	0.609**	0.854**	0.789**	1	
UFA	-0.748**	0.632**	0.699**	0.534*	0.573*	0.787**	0.802**	0.942**	1

WRC、REC、Pro、MDA、CAT、POD、SOD、SFA、UFA 分别表示相对含水量、相对电导率、脯氨酸、丙二醛、过氧化氢酶、过氧化物酶、超氧化物歧化酶、饱和脂肪酸、不饱和脂肪酸。*和**分别表示在0.05水平和0.01水平显著相关。
WRC, REC, Pro, MDA, CAT, POD, SOD, SFA, UFA represent relative water content, relative electric conductivity, proline, malondialdehyde, saturated fatty acid, and unsaturated fatty acid, respectively. * and ** indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 level, respectively.

宏^[40]在水分逆境对吊兰 (*Chlorophytum comosum*) 叶片脂质组成的影响中得出干旱使膜脂中饱和脂肪酸增加, 与本研究得出的结论相一致。由此推断, 驼绒藜幼苗在受到干旱胁迫时通过调节植物体内脂肪酸饱和度来减小干旱胁迫对植物造成的膜脂损伤。
在正常情况下, 细胞内活性氧 (reactive oxygen species, ROS) 的产生和去除处于动态平衡状态, 干旱胁迫导致植物体内 ROS 大量积累, 细胞膜稳定结构遭到破坏^[41], 植物可通过抗氧化酶系统消除细胞中产生的过量 ROS, 减弱氧化胁迫对植物造成的伤害^[42]。干旱强度决定了水分胁迫下抗氧化酶活性的变化^[43], 驼绒藜幼苗叶片经不同浓度 PEG 处理后 POD、SOD 和 CAT 3 种酶活性协同增强^[44], 在 25% 处理下都达到了最大活力, POD 活性、SOD 活性和 CAT 活性与对照相比增加了 57.86%、46.64% 和 38.85%, 表明植物受到干旱胁迫时抗氧化酶共同作用清除 ROS 以维持氧化还原稳态, 保护膜结构, 以提高植物抵御胁迫的能力, 与程凯^[45]、缪秀梅^[46] 在不同植物对非生物胁迫生理响应研究中的结果一致。处理

液浓度超过 25% 后, 3 种酶活性均呈下降趋势。由此可见, 在低浓度的 PEG 处理下, 驼绒藜通过启动抗氧化酶系统来应对干旱, 减少细胞内 ROS 的过多积累, 减弱膜脂过氧化; 在高浓度胁迫下, 植物抗氧化酶系统平衡被破坏, 膜脂过氧化加剧, 细胞膜受损。
综上所述, 在 5%、15% 低浓度 PEG 处理下, 驼绒藜幼苗叶片 WRC 下降、REC 增大、MDA 含量逐步增加, 导致叶片膜脂过氧化, 植物通过增加渗透调节物质 Pro 含量、启动抗氧化酶系统、保持膜脂中的 SFA 和 UFA 动态平衡来减弱膜脂过氧化对细胞膜系统的损害; 在 25% PEG 处理下, MDA 含量急剧增加, 叶片膜脂过氧化程度加重, 植物通过迅速大量积累 Pro 含量、增强抗氧化酶活性、增大膜脂中 UFA 含量减少干旱胁迫造成的损害; 在 30%、35% 高浓度 PEG 处理下, Pro 含量下降、抗氧化酶系统活性降低、SFA 含量增加, 膜脂受损害严重。由此得出, 驼绒藜幼苗在 PEG 处理液为 25% 时, 渗透调节物质、保护性物质、不饱和脂肪酸等物质协同作用形成高效的防御系统以增强对干旱胁迫的抗性。

参考文献 References:

[1] 员艳丽. 白沙蒿对干旱响应的转录组研究. 呼和浩特: 内蒙古师范大学硕士学位论文, 2016.
YUAN Y L. Transcriptome analysis of the drought stress response of *Artemisia sphaerocephala*. Master Thesis. Hohhot: Inner

- Mongolia Normal University, 2016.
- [2] SCHIMEL D S. Drylands in the earth system. *Science*, 2010, 327: 418-419.
- [3] 韩晓璐, 赵媛媛, 张丽静, 郭丁, 傅华, 李永善, 杨成新. 干旱和UV-B辐射胁迫及其互作对白沙蒿抗性生理的影响. *草业学报*, 2021, 30(8): 109-118.
- HAN X X, ZHAO Y Y, ZHANG L J, GUO D, FU H, LI Y S, YANG C X. Interactive effects of drought and UV-B radiation on physiological defences in *Artemisia sphaerocephala*. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(8): 109-118.
- [4] 王梦茹, 魏岩. 北疆荒漠心叶驼绒藜种子的萌发行为. *草业科学*, 2018, 35(8): 1836-1842.
- WANG M R, WEI Y. Germination behavior of *Ceratoides ewersmanniana* seeds in northern Xinjiang. *Pratacultural Science*, 2018, 35(8): 1836-1842.
- [5] 贾明. 荒漠草原区驼绒藜资源及利用. *畜牧与饲料科学*, 2012, 33(Z2): 123-124.
- JIA M. *Ceratoides latens* resources and utilization in desert steppe. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2012, 33(Z2): 123-124.
- [6] KHAN M A, GUL B, WEBER D J. Action of plant growth regulators and salinity on seed germination of *Ceratoides lanata*. *Canadian Journal of Botany*, 2012, 82(1): 37-42.
- [7] MA J Y, REN J, WANG G, CHEN F H. Influence of different microhabitats and stand age on viable soil seed banks of sand-stabilising species. *South African Journal of Botany*, 2006, 72(1): 46-50.
- [8] 郑晓红, 李柱, 付爱良, 杨刚, 沙吾列. 心叶驼绒藜胚器官培养及再生体系的研究. *中国草地学报*, 2007(4): 50-55.
- ZHENG X H, LI Z, FU A L, YANG G, Shawulie. Study in regenerated plants induced from embryo of *Ceratoides ewersmanniana*. *Chinese Journal of Grassland*, 2007(4): 50-55.
- [9] 李柱, 付爱良, 沙吾列, 郑晓红, 杨刚. 播种深度对心叶驼绒藜出苗的影响. *草食家畜*, 2004(4): 66-67.
- LI Z, FU A L, Shawulie, ZHENG X H, YANG G. The influence of sowing depth to the germination of *Ceratoides ewersmanniana* (Stschegl. Ex Losinsk.) Botsch. Et Ikonn. Grass Feeding Livestock, 2004(4): 66-67.
- [10] 刘涛, 李柱, 安沙舟, 许帼英. 心叶驼绒藜根系的研究. *草原与草坪*, 2008(1): 13-17.
- LIU T, LI Z, AN S Z, XU G Y. A study on root system of *Ceratoides ewersmanniana*. *Grassland and Turf*, 2008(1): 13-17.
- [11] 武森阳. 华北驼绒藜两种生态型对水分胁迫的响应. 呼和浩特: 内蒙古农业大学硕士学位论文, 2015.
- WU S Y. The response of two ecotypes of *Ceratoides arborescens* to water stress. Master Thesis. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2015.
- [12] 陶冶, 刘彤, 贾亚敏, 崔运河, 骆郴, 魏鹏, 谢江波. 古尔班通古特沙漠南缘心叶驼绒藜和梭梭种群空间格局的分形特征. *干旱区地理*, 2008(3): 365-372.
- TAO Y, LIU T, JIA Y M, CUI Y H, LUO C, WEI P, XIE J B. Fractal characteristics of spatial distribution pattern of *Ceratoides ewersmanniana* and *Haloxylon ammodendron* population in the Southern Gurbantunggut Desert, Xinjiang. *Arid Land Geography*, 2008(3): 365-372.
- [13] 刘彤, 赵新俊, 贾亚敏, 崔运河, 骆郴, 魏鹏, 张元杭, 林海荣. 古尔班通古特沙漠南缘心叶驼绒藜种群更新的空间格局. *中国沙漠*, 2008(2): 258-265.
- LIU T, ZHAO X J, JIA Y M, CUI Y H, LUO C, WEI P, ZHANG Y H, LIN H R. Spatial pattern of population recruitment of *C. ewersmanniana* in south of Gurbantunggut Desert. *Journal of Desert Research*, 2008(2): 258-265.
- [14] 贾亚敏. 莫索湾南缘沙漠心叶驼绒藜种群空间分布格局的生态生物学研究. 石河子: 石河子大学硕士学位论文, 2007.
- JIA Y M. Research on the bioecological characteristics of spatial distribution pattern of *Ceratoides ewersmanniana* in the southern edge of Mosuowan desert. Master Thesis. Shihezi: Shihezi University, 2007.
- [15] 沙吾列·沙比汗, 安沙舟, 杨刚, 张荟荟, 付爱良, 张一弓, 麦利亚·依尔斯别克. 播种密度对伊犁心叶驼绒藜生长性状和生产性能的影响. *草业科学*, 2013, 30(1): 84-90.
- Shawulie-Shabihan, AN S Z, YANG G, ZHANG H H, FU A L, ZHANG Y G, Mailiya·Yiersibieke. Influence of planting density to growth and production property of *Ceratoides ewersmanniana* 'Yili'. *Pratacultural Science*, 2013, 30(1): 84-90.
- [16] 沙吾列·沙比汗, 安沙舟, 杨刚, 努尔加列力, 张荟荟, 付爱良, 郑晓红. 伊犁心叶驼绒藜植物生物学及生态学特性研究. *新疆农业科学*, 2010, 47(9): 1842-1846.
- Shawulie-Shabihan, AN S Z, YANG G, Nuerjialieli, ZHANG H H, FU A L, ZHENG X H. Study on the botanical, biological and

- ecological characteristics of *Ceratoides ewersmanniana* 'Yili'. Xinjiang Agricultural Sciences, 2010, 47(9): 1842-1846.
- [17] 李莉, 贾纳提, 刘梦. 伊犁野生心叶驼绒藜植物抗旱性生理生化指标研究. 草食家畜, 2013(1): 41-45.
LI L, JIA N T, LIU M. Study on the physiological and biochemical index of drought resistance for *Ceratoides Ewersmanniana* 'Yili'. Grass Feeding Livestock, 2013(1): 41-45.
- [18] 周桐羽. 干旱胁迫及复水处理下'寒富'苹果叶片的生理响应及转录组分析. 沈阳: 沈阳农业大学硕士学位论文, 2020.
ZHOU T Y. The Physiological response and transcriptome analysis of Hanfu apple leaves under drought stress and rehydration treatment. Master Thesis. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020.
- [19] 苏玮娟, 赵桂琴, 琚泽亮, 宫文龙, 柴继宽. 干旱胁迫时间对6份饲用燕麦种质萌发期生理指标的影响. 草地学报, 2022, 30(3): 646-654.
SU W J, ZHAO G Q, JU Z L, GONG W L, CHAI J K. Effects of drought stress duration on physiological indexes of 6 oat germplasms at germination stage. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(3): 646-654.
- [20] 李硕. 水分亏缺下紫花苜蓿根系形态构型及其生理响应研究. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2021.
LI S. The study on root morphology architecture and physiological response of alfalfa root under water deficit. PhD Thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.
- [21] 鞠乐, 齐军仓, 成禄艳, 赵佳, 廖永兵. 大麦种子萌发期对干旱胁迫的生理响应及其抗旱性评价. 西南农业学报, 2013, 26(1): 93-98.
JU L, QI J C, CHENG L Y, ZHAO J, LIAO Y B. Physiological response of barley to drought stress during seed germination period and drought resistance evaluation. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2013, 26(1): 93-98.
- [22] LIN J X, HUA X Y, PENG X Y, DONG B L, YAN X F. Germination responses of ryegrass (Annual vs. Perennial) seed to the interactive effects of temperature and salt-alkali stress. Frontiers in Plant Science, 2018, 69(31): 236-245.
- [23] MALINOWSKA M, DONNISON I, ROBSON P. Morphological and physiological traits that explain yield response to drought stress in Miscanthus. Agronomy, 2020, 10(8): 234-242.
- [24] 王洪春. 植物抗逆性与生物膜结构功能研究的进展. 植物生理学通讯, 1985(1): 60-66, 29.
WANG H C. Research progress of plant stress resistance and biofilm structure and function. Plant Physiology Journal, 1985(1): 60-66, 29.
- [25] ELATNER E F. Oxygen activation and oxygen toxicity. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33: 73-96.
- [26] 刘锦川, 云锦凤, 张磊. 氯化钠胁迫下3种披碱草属牧草生理特性的研究. 草地学报, 2010, 18(5): 694-697.
LIU J C, YUN J F, ZHANG L. Physiological characteristics of three elymus grass under NaCl stress. Acta Agrestia Sinica, 2010, 18(5): 694-697.
- [27] 陈爱葵, 韩瑞宏, 李东洋, 凌连连, 罗惠霞, 唐上剑. 植物叶片相对电导率测定方法比较研究. 广东教育学院学报, 2010, 30(5): 88-91.
CHEN A K, HAN R H, LI D Y, LING L L, LUO H X, TANG S J. A comparison of two methods for electrical conductivity about plant leaves. Journal of Guangdong Education Institute, 2010, 30(5): 88-91.
- [28] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000.
LI H S. Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [29] 楚秉泉, 毛祝新, 傅华. 高山草原地区箭筈豌豆和垂穗披碱草脂肪酸构成研究. 草业科学, 2011, 28(6): 1190-1193.
CHU B Q, MAO Z X, FU H. Study on fatty acid of *Vicia sativa* and *Elymus nutans* in alpine grassland region. Pratacultural Science, 2011, 28(6): 1190-1193.
- [30] 祁娟, 徐柱, 马玉宝, 王海清, 李临杭. 披碱草属六种野生牧草苗期抗旱胁迫的生理变化. 中国草地学报, 2008(5): 18-24.
QI J, XU Z, MA Y B, WANG H Q, LI L H. Physiological change of six wild species in *Elymus* under drought stress at seedling stage. Chinese Journal of Grassland, 2008(5): 18-24.
- [31] 丁玲, 吴雪, 杜长霞, 徐艳丽, 樊怀福. 短期干旱胁迫对黄瓜幼苗叶片抗氧化系统的影响. 浙江农林大学学报, 2015, 32(2): 285-290.
DING L, WU X, DU C X, XU Y L, FAN H F. An antioxidant system in cucumber seedling leaves with short term drought stress. Journal of Zhejiang A & F University, 2015, 32(2): 285-290.

- [32] 张立军, 刘新. 植物生理学. 北京: 科学出版社, 2017.
ZHANG L J, LIU X. Plant Physiology. Beijing: Science Press, 2017.
- [33] 王雅茹. 向日葵苗期干旱胁迫响应及其差异表达基因分析. 呼和浩特: 内蒙古农业大学硕士学位论文, 2021.
WANG Y R. Responses to drought stress and analysis of differentially expressed genes in sunflower seedlings. Master Thesis. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [34] 刘凤荣, 陈火英, 刘杨, 卫志明. 盐胁迫下不同基因型番茄可溶性物质含量的变化. 植物生理与分子生物学学报, 2004(1): 99-104.
LIU F R, CHEN H Y, LIU Y, WEI Z M. Changes in solute content of different tomato genotypes under salt stress. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2004(1): 99-104.
- [35] 李波, 贾秀峰, 白庆武, 唐宇红. 干旱胁迫对苜蓿脯氨酸累积的影响. 植物研究, 2003(2): 189-191.
LI B, JIA X F, BAI Q W, TANG Y H. Effect of drought stress on prolin accumulation of alfalfa. Bulletin of Botanical Research, 2003(2): 189-191.
- [36] 杨锋, 刘晨, 姜丽娟, 管清美. 苹果属植物抗旱性评价. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(8): 119-128.
YANG F, LIU C, JIANG L J, GUAN Q M. Comprehensive evaluation on drought tolerance of *Malus*. Journal of Northwest A&F University (Nature Science Edition), 2020, 48(8): 119-128.
- [37] 王秀彦. 干旱胁迫下黄顶菊生理生化指标变化规律的研究. 保定: 河北农业大学硕士学位论文, 2011.
WANG X Y. Response of *Flaveria bidentis* to soil water stress. Master Thesis. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2011.
- [38] 史晓霞, 毛培春, 张国芳, 孟林. 15份马蔺材料苗期抗旱性比较. 草地学报, 2007(4): 352-358.
SHI X X, MAO P C, ZHANG G F, MENG L. The comparison of drought resistance on 15 Chinese *Iris* germplasm at seedling stage. Acta Agrestia Sinica, 2007(4): 352-358.
- [39] 刘文献, 刘志鹏, 谢文刚, 王彦荣. 脂肪酸及其衍生物对植物逆境胁迫的响应. 草业科学, 2014, 31(8): 1556-1565.
LIU W X, LIU Z P, XIE W G, WANG Y R. Responses of fatty acid and its derivatives to stress in plants. Pratacultural Science, 2014, 31(8): 1556-1565.
- [40] 包宏. 水分逆境对吊兰叶片脂质组成的影响. 植物学通报, 1999, 16(5): 598-601.
BAO H. Effects of water stress on lipid compositions in leaves of *Chlorophytum comosum*. Chinese Bulletin of Botany, 1999, 16(5): 598-601.
- [41] TARCHOUNE I, SGHERRI C, IZZO R, LACHAAL M, OUERGHI Z, NAVARI-IZZO F. Antioxidative responses of *Ocimum basilicum* to sodium chloride or sodium sulphate salinization. Plant Physiology & Biochemistry, 2010, 48(9): 772-777.
- [42] RAO D E, CHAITANYA K V. Photosynthesis and antioxidative defense mechanisms in deciphering drought stress tolerance of crop plants. Biologia Plantarum, 2016, 60(2): 1-18.
- [43] TALBI S, ROMERO-PUERTAS M C, HERNÁNDEZ A, TERRÓN L, FERCHICHI A, SANDALIO L M. Drought tolerance in a Saharian plant *Oudneya africana*: Role of antioxidant defences. Environmental & Experimental Botany, 2015, 111: 114-126.
- [44] 胡国霞, 马莲菊, 陈强, 赵贵林, 褚妍, 任菲, 李雪梅. 植物抗氧化系统对水分胁迫及复水响应研究进展. 安徽农业科学, 2011, 39(3): 1278-1280, 1282.
HU G X, MA L J, CHEN Q, ZHAO G L, CHU Y, REN F, LI X M. Research progress on the response of plant antioxidant system to water stress and re-watering. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(3): 1278-1280, 1282.
- [45] 程凯. 驼绒藜属两种植物对非生物胁迫的生理响应及饲用品质动态变化的研究. 呼和浩特: 内蒙古大学硕士学位论文, 2021.
CHENG K. Research on physiological response of two *ceratoides* plants to abiotic stress and dynamic changes their forage quality. Master Thesis. Hohhot: Inner Mongolia University, 2021.
- [46] 缪秀梅. 白沙蒿对渗透胁迫的响应及其过程中膜脂构成研究. 兰州: 兰州大学硕士学位论文, 2014.
MIAO X M. The response of *Artemisia sphaerocephala* to osmotic stress and the change of membrane lipids composition during the process. Master Thesis. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.

(责任编辑 苟燕妮)