

金 昆, 丛龙琦, 穆东祺, 等. 干旱胁迫对冷蒿生长、生理指标和药效物质含量的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(3): 493-500.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.03.008

干旱胁迫对冷蒿生长、生理指标和药效物质含量的影响

金 昆, 丛龙琦, 穆东祺, 曹 阳, 张 奥, 薛 焱

(内蒙古医科大学药学院, 内蒙古 呼和浩特 010110)

摘要: 本研究以冷蒿(*Artemisia frigida* Willd.)为试验材料,分别探究轻度干旱胁迫处理(土壤相对含水率保持在 $75\%\pm 5\%$)、中度干旱胁迫处理(土壤相对含水率保持在 $50\%\pm 5\%$)、重度干旱胁迫处理(土壤相对含水率保持在 $25\%\pm 5\%$)对冷蒿生长发育、抗氧化酶活性、活性氧含量、抗氧化物含量和药用物质含量的影响。结果表明,随干旱胁迫程度的提高,冷蒿叶片游离脯氨酸(Pro)含量、还原型抗坏血酸(AsA)含量、还原型谷胱甘肽(GSH)含量整体呈上升趋势,谷胱甘肽还原酶(GR)、过氧化氢酶(CAT)活性呈上升趋势。表明在受到干旱胁迫后,冷蒿能够维持动态平衡和相对稳定的内环境。随干旱胁迫程度的提高,冷蒿叶片叶周长、叶面积、叶长、叶宽、株高、茎粗等生长指标整体呈下降趋势,总黄酮含量呈上升趋势。相关性分析结果表明,冷蒿株高、茎粗等生长指标与干旱胁迫程度呈显著负相关($P<0.05$),总黄酮含量与干旱胁迫程度呈显著正相关($P<0.05$)。对冷蒿产量-品质线性回归模型进行分析,结果表明在含水率为 $57\%\sim 59\%$ 的土壤中栽培冷蒿可以较好地平衡其产量与质量。本研究结果可为蒙药药材冷蒿的优质高效栽培提供理论依据。

关键词: 干旱胁迫; 冷蒿; 阿给; 生理指标; 药效物质

中图分类号: R931.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)03-0493-08

Impact of drought stress on the growth, physiological indices, and pharmacodynamic substance content of *Artemisia frigida* Willd.

JIN Kun, CONG Longqi, MU Dongqi, CAO Yang, ZHANG Ao, XUE Yan

(School of Pharmacy, Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010110, China)

Abstract: This study used *Artemisia frigida* Willd. as the experimental material to investigate the effects of mild drought stress (soil relative water content maintained at $75\%\pm 5\%$), moderate drought stress (soil relative water content maintained at $50\%\pm 5\%$), and severe drought stress (soil relative water content maintained at $25\%\pm 5\%$) on the growth and development of *Artemisia frigida* Willd., as well as its antioxidant enzyme activities, reactive oxygen species content, antioxidant substance content and pharmacodynamic substance content. The results showed that with the increase in drought stress intensity, the overall contents of free proline (Pro), reduced ascorbic acid (AsA), and reduced glutathione (GSH) in the leaves of *Artemisia frigida* Willd. increased, and the activities of glutathione reductase (GR) and catalase (CAT) also increased. The above results indicated that after being subjected to drought stress, *Artemisia frigida* Willd. could maintain dynamic equilibrium and a relatively stable internal environment. As the drought stress intensity increased, the growth indicators of *Artemisia frigida* Willd., such as leaf perimeter, leaf area, leaf length, leaf width, plant height, and stem diameter, showed an overall downward trend, while the total flavonoids content increased. The

收稿日期: 2024-07-09

基金项目: 内蒙古自然科学基金面上项目(2022MS08014); 内蒙古高等学校科学研究重点项目(NJZZ22647); 内蒙古医科大学面上项目(YKD2023MS083)

作者简介: 金 昆(1999-), 男, 山东日照人, 硕士研究生, 研究方向为中药资源开发。(E-mail) 1540848500@qq.com

通讯作者: 薛 焱, (E-mail) xyxy2172@163.com

so increased. The above results indicated that after being subjected to drought stress, *Artemisia frigida* Willd. could maintain dynamic equilibrium and a relatively stable internal environment. As the drought stress intensity increased, the growth indicators of *Artemisia frigida* Willd., such as leaf perimeter, leaf area, leaf length, leaf width, plant height, and stem diameter, showed an overall downward trend, while the total flavonoids content increased. The

correlation analysis results showed that the growth indicators of *Artemisia frigida* Willd., such as plant height and stem diameter, were significantly negatively correlated with drought stress intensity ($P < 0.05$), while the total flavonoids content was significantly positively correlated with drought stress intensity ($P < 0.05$). The analysis results of the yield-quality linear regression model of *Artemisia frigida* Willd. indicated that cultivating it in soil with a water content of 57%–59% could achieve a better balance between yield and quality. This study provides a theoretical basis for the high-quality and efficient cultivation of the Mongolian medicinal herb *Artemisia frigida* Willd..

Key words: drought stress; *Artemisia frigida* Willd.; Agi; physiological parameters; pharmacodynamic substance

蒙药药材阿给为菊科蒿属植物冷蒿(*Artemisia frigida* Willd.)的干燥地上部分,中药名为小白蒿,藏药名为坎巴,味苦、辛,性温,具有清热止血、散肿祛风等功效^[1]。阿给最早记载于公元 8 世纪医药典籍《四部医典》^[2],现已被内蒙古自治区列入《内蒙古自治区优势和特色药材名录》中。同时,因其对低温与干旱环境的适应性较强,冷蒿在牧业和生态领域也具有极高的价值^[3]。冷蒿分布范围广泛,遍及欧亚大陆草原区,在中国主要分布于内蒙古、青海、甘肃和东北各地区^[2]。然而随着全球气候变暖,冷蒿分布区干旱程度上升,导致野生冷蒿储量减少。因此,开展冷蒿种质资源的保护与标准化种植研究迫在眉睫^[4]。

不同植物为应对环境胁迫演化出多种生存策略^[5-6],在干旱胁迫下,植株通过内源调控中各生理通路的协同作用以缓解损伤^[7-8]。目前,国内外关于干旱胁迫对药材影响的研究多集中于单一方面。在药材表型方面,何凤等^[9]对干旱胁迫与复水条件下的杜仲表型和生理响应进行了研究,张倩倩等^[10]通过分析生物量和有效成分含量探究不同种源黄芪对干旱胁迫的响应^[10]。理想的生长环境有助于药用部位的生物量积累,但从药材品质形成与提升的角度看,适当的逆境更有利于药用成分的积累^[10-12]。因此,需要确定适当的种植水分,以平衡药材产量与品质。目前,关于冷蒿的研究主要集中在药理活性和化学成分方面^[13-14],关于干旱胁迫对冷蒿影响的研究尚未见报道。本研究拟探究不同程度干旱胁迫对冷蒿生长发育、抗氧化酶活性、活性氧含量、抗氧化物含量和药效物质含量的影响,旨在为冷蒿的优质高效栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于内蒙古医科大学药学院温室内进行,冷蒿种子于 2022 年 10 月采集自赤峰市赛罕乌拉自然保护区(43°59′~44°27′N,118°18′~118°55′E),种子

经 3%高锰酸钾灭菌处理后,用蒸馏水冲洗干净,在营养钵中育苗,待长出第 2 片真叶时,将幼苗移栽至直径 20 cm 的花盆中,每盆装入 2 kg 混合基质[腐殖土:珍珠岩=3:1(质量比)],移栽后进行为期 90 d 的常规培养,挑选株高无显著差异的植株进行干旱试验。

干旱试验采用盆栽控水法模拟自然干旱,设置 1 个对照及 3 个处理:正常供水对照(CK)、轻度干旱胁迫处理(LD,土壤相对含水率保持在 75%±5%)、中度干旱胁迫处理(MD,土壤相对含水率保持在 50%±5%)、重度干旱胁迫处理(SD,土壤相对含水率保持在 25%±5%)。每个处理重复 6 次。每天 18:00 称重并补足蒸发量,持续处理 28 d 后取样。

1.2 试验方法

1.2.1 生长指标的测定 干旱胁迫处理结束后,使用游标卡尺和卷尺分别测量冷蒿的茎粗与株高;表型测定参考牛雪婧等^[15]的方法,每个处理选取新梢后第 3 叶序的功能叶进行测量。用 Scopeimage 9.0 软件(NOVEL NSZ-810 显微镜)测量叶片叶长、叶宽、小裂片长、小裂片宽、叶面积和叶周长。

1.2.2 生理指标的测定 选取各处理冷蒿相同部位的叶片进行生理指标测定。冷蒿叶片水势使用 TLD-3000 露点水势仪(杭州托普仪器有限公司产品)进行测定。渗透调节物质含量、活性氧含量、抗氧化物含量、抗氧化酶活性均采用江苏艾迪生生物科技有限公司试剂盒进行测定,生理指标及其测定方法如表 1 所示。

1.2.3 药效物质含量的测定 总酚含量采用福林酚比色法测定,总黄酮含量采用铝盐比色法测定。以没食子酸作为标准品,总酚含量的标准曲线回归方程为 $Y = 65.951 0x + 0.023 5$ ($R^2 = 0.999 5$);以芸香苷作为标准品,总黄酮含量的标准曲线回归方程为 $Y = 20.298 0x + 0.062 0$ ($R^2 = 0.999 3$),求不同干旱程度处理下冷蒿中的总酚与总黄酮含量(mg/g),计

算公式如下:

$$M = (C \times V \times N) / m \quad (1)$$

式中, M 为物质含量, 单位 mg/g; C 为根据标准

曲线计算所得的物质质量浓度, 单位 mg/mL; V 为提取液总体积, 单位 mL; N 为稀释倍数; m 为样品重量, 单位 g。

表 1 生理指标测定方法

Table 1 Methods for the determination of physiological parameters

类别	生理指标	测定方法
渗透调节物质含量	游离脯氨酸 (PRO) 含量	酸性茚三酮比色法
	可溶性糖 (SS) 含量	蒽酮比色法
活性氧含量	过氧化氢 (H_2O_2) 含量	硫酸钛比色法
	超氧阴离子 (OFR) 含量	盐酸羟胺氧化法
抗氧化物含量	还原型谷胱甘肽 (GSH) 含量	二硫代二硝基苯甲酸 (DTNB) 法
	还原型抗坏血酸 (AsA) 含量	抗坏血酸氧化酶 (AAO) 法
抗氧化酶活性	超氧化物歧化酶 (SOD) 活性	水溶性四氮唑-8 (WST-8) 法
	过氧化氢酶 (CAT) 活性	过氧化氢分解法
	谷胱甘肽还原酶 (GR) 活性	还原型辅酶 II (NADPH) 法
	抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性	紫外分光光度法

1.2.4 数据处理 原始数据记录及统计使用 Microsoft Excel 2019 软件完成; 利用 IBM SPSS Statistics 26 软件进行单因素方差分析, 利用 Duncan's 法进行组间差异性比较; 利用 GraphPad prism 9.1.0 软件进行归一化后线性回归分析和绘图。计算公式如下:

$$\text{正向指标: } X_{ij} = (x_{ij} - \min x_j) / (\max x_j - \min x_j) \quad (2)$$

$$\text{反向指标: } X_{ij} = (\max x_j - x_{ij}) / (\max x_j - \min x_j) \quad (3)$$

式中, X_{ij} 和 x_{ij} 分别为各指标归一化后的数据和原始数据, $\max x_j$ 和 $\min x_j$ 分别为 j 指标的最大值和最小值。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对冷蒿生长指标的影响

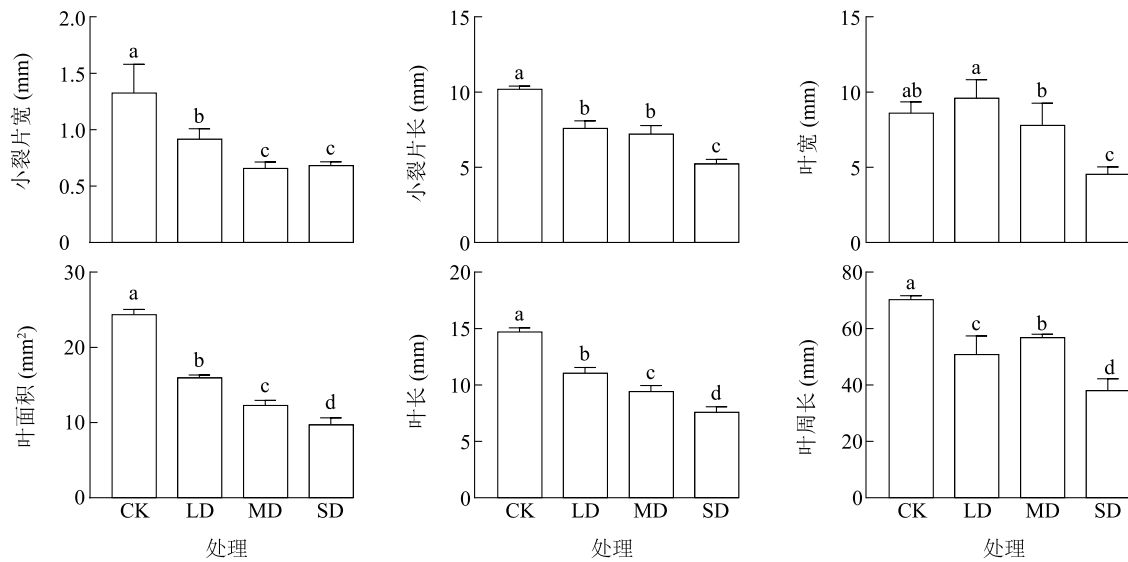
冷蒿叶片为二至三回羽状全裂叶, 小裂片呈条形或条状披针形^[16-17]。如图 1 所示, 对照冷蒿叶叶周长最大, SD 处理冷蒿叶叶周长最小, 与对照相比, LD 处理、MD 处理、SD 处理冷蒿叶叶周长分别显著减小 27.68%、19.13% 和 45.92% ($P < 0.05$)。冷蒿叶面积随干旱程度增加呈降低趋势, 与对照相比, LD 处理、MD 处理、SD 处理冷蒿叶叶面积分别显著降低 34.52%、49.56% 和 60.11% ($P < 0.05$)。叶长随干旱程度增加呈降低趋势, 与对照相比, LD 处理、MD 处理、SD 处理冷蒿叶长分别显著降低 24.79%、

35.89% 和 48.42% ($P < 0.05$)。小裂片长随干旱程度增加呈下降趋势, 与对照相比, LD 处理、MD 处理、SD 处理冷蒿叶小裂片长分别显著降低 25.53%、29.23% 和 48.74% ($P < 0.05$)。叶宽随干旱程度增加呈先增大后减小的趋势, LD 处理和对照相比无显著差异 ($P > 0.05$), 与对照相比, MD 处理、SD 处理冷蒿叶叶宽分别显著降低 9.41% 和 47.19%。小裂片宽随干旱程度增加呈下降趋势, MD 处理和 SD 处理相比无显著差异 ($P > 0.05$), 与对照相比, LD 处理、MD 处理、SD 处理冷蒿叶小裂片宽分别显著降低 30.79%、50.34% 和 48.49% ($P < 0.05$)。

如图 2 所示, 对照冷蒿株高与茎粗最大, 冷蒿株高、茎粗随干旱程度增加呈下降趋势。与对照相比, LD 处理、MD 处理、SD 处理冷蒿株高分别显著下降 15.09%、22.19% 和 26.92% ($P < 0.05$)。与对照相比, LD 处理、MD 处理、SD 处理冷蒿茎粗分别显著下降 15.66%、25.76% 和 35.86% ($P < 0.05$)。相关性分析结果表明, 冷蒿株高和茎粗与干旱程度呈显著负相关 ($P < 0.05$)。

2.2 干旱胁迫对冷蒿生理指标的影响

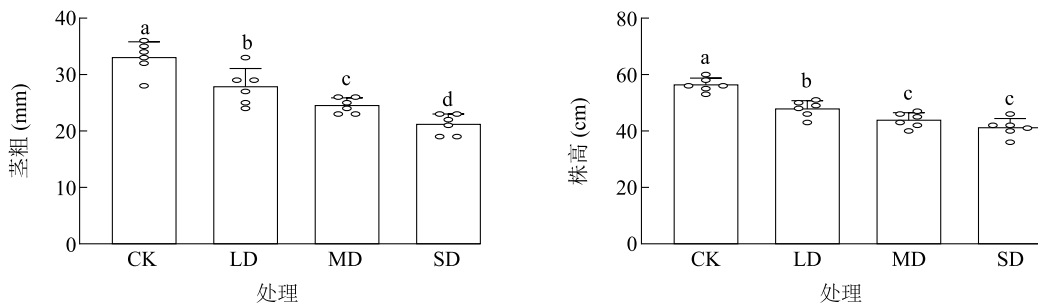
2.2.1 干旱胁迫对冷蒿叶片水势的影响 如图 3 所示, 叶片水势随干旱程度增加呈下降趋势, 与对照相比, LD 处理、MD 处理、SD 处理冷蒿叶片水势分别显著降低 62.96%、144.44% 和 238.89% ($P < 0.05$)。



CK: 正常供水对照; LD: 轻度干旱胁迫处理; MD: 中度干旱胁迫处理; SD: 重度干旱胁迫处理。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 干旱胁迫对冷蒿叶片生长的影响

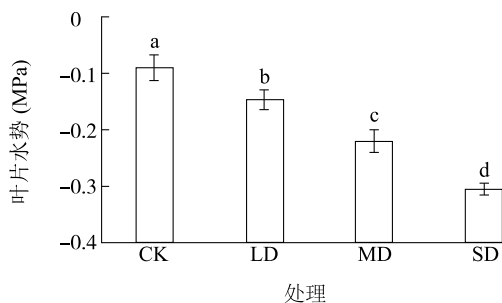
Fig.1 Impact of drought stress on the growth of *Artemisia frigida* Willd. leaves



CK: 正常供水对照; LD: 轻度干旱胁迫处理; MD: 中度干旱胁迫处理; SD: 重度干旱胁迫处理。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 干旱胁迫对冷蒿株高、茎粗的影响

Fig.2 Impact of drought stress on the plant height and stem thickness of *Artemisia frigida* Willd.



CK: 正常供水对照; LD: 轻度干旱胁迫处理; MD: 中度干旱胁迫处理; SD: 重度干旱胁迫处理。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 3 干旱胁迫对冷蒿叶片水势的影响

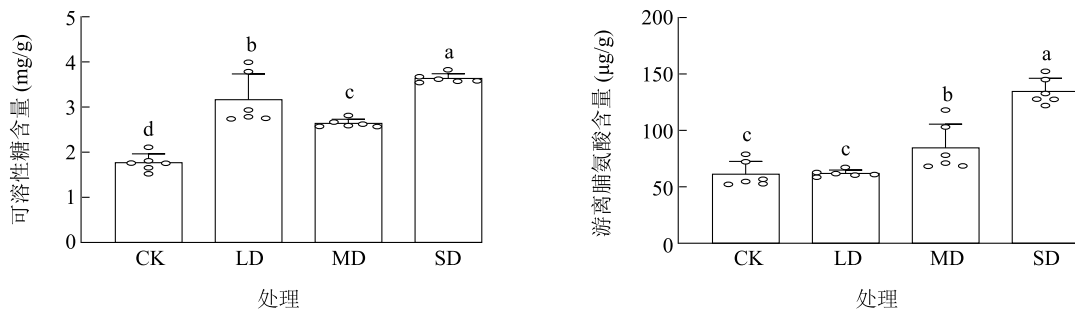
Fig.3 Effect of drought stress on the leaf water potential of *Artemisia frigida* Willd.

2.2.2 干旱胁迫对冷蒿渗透调节物质含量的影响

游离脯氨酸(Pro)是植物体内重要的渗透调节物质之一,可溶性糖(SS)通过调节植物细胞内渗透压缓解胁迫伤害^[18]。如图 4 所示,与对照相比,MD 处理、SD 处理冷蒿叶片 Pro 含量分别显著增加 37.91%、119.59% ($P < 0.05$)。与对照相比,LD 处理、MD 处理、SD 处理冷蒿叶片 SS 含量分别显著增加 78.87%、49.13%和 105.50% ($P < 0.05$)。

2.2.3 干旱胁迫对冷蒿活性氧与抗氧化物含量的影响

由表 2 可知,与对照相比,LD 处理冷蒿叶片 H_2O_2 含量显著降低 8.77% ($P < 0.05$),MD 处理、SD 处理冷蒿叶片 H_2O_2 含量分别显著增加 21.87%和 21.90% ($P < 0.05$)。与对照相比,LD 处理、MD 处



CK:正常供水对照;LD:轻度干旱胁迫处理;MD:中度干旱胁迫处理;SD:重度干旱胁迫处理。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图4 干旱胁迫对冷蒿渗透调节物质含量的影响

Fig.4 Effect of drought stress on the content of osmotic regulation substances in *Artemisia frigida* Willd.

理、SD 处理冷蒿叶片 O_2^- 含量分别显著增加 37.18%、102.56%和 60.26% ($P < 0.05$)。MD 处理冷蒿叶片 O_2^- 含量显著高于对照、LD 处理和 SD 处理 ($P < 0.05$)。

与对照相比,LD 处理、MD 处理、SD 处理冷蒿叶片 AsA 含量分别显著增加 6.47%、22.30%和 35.97% ($P < 0.05$);与对照相比,LD 处理、MD 处理、SD 处理冷蒿叶片 GSH 含量分别显著增加 53.21%、48.08%和 87.18% ($P < 0.05$)。

表2 干旱胁迫对冷蒿活性氧与抗氧化物含量的影响

Table 2 Effect of drought stress on the content of reactive oxygen species and antioxidants in *Artemisia frigida* Willd.

组别	活性氧含量		抗氧化物含量	
	H_2O_2 ($\mu\text{mol/g}$)	O_2^- ($\mu\text{mol/g}$)	GSH ($\mu\text{mol/g}$)	AsA ($\mu\text{mol/g}$)
CK	275.43±7.48b	0.78±0.03d	1.56±0.08c	1.39±0.05c
LD	251.27±3.63c	1.07±0.02c	2.39±0.12b	1.48±0.10b
MD	335.67±20.87a	1.58±0.03a	2.31±0.08b	1.70±0.07b
SD	335.75±5.27a	1.25±0.06b	2.92±0.07a	1.89±0.06a

AsA:还原型抗坏血酸;GSH:还原型谷胱甘肽。CK:正常供水对照;LD:轻度干旱胁迫处理;MD:中度干旱胁迫处理;SD:重度干旱胁迫处理。每一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。表中数据以鲜重计。

2.2.4 干旱胁迫对冷蒿抗氧化物酶活性的影响

超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)和谷胱甘肽还原酶(GR)是植物体内重要的抗氧化物酶,分别参与植物体内不同的氧化还原循环^[19]。如图5所示,与对照相比,LD 处理、MD 处理冷蒿叶片 SOD 活性分别显著提高 21.17%和 16.11% ($P < 0.05$),SD 处理冷蒿叶片 SOD 活性显著降低 11.48% ($P < 0.05$)。冷蒿叶片

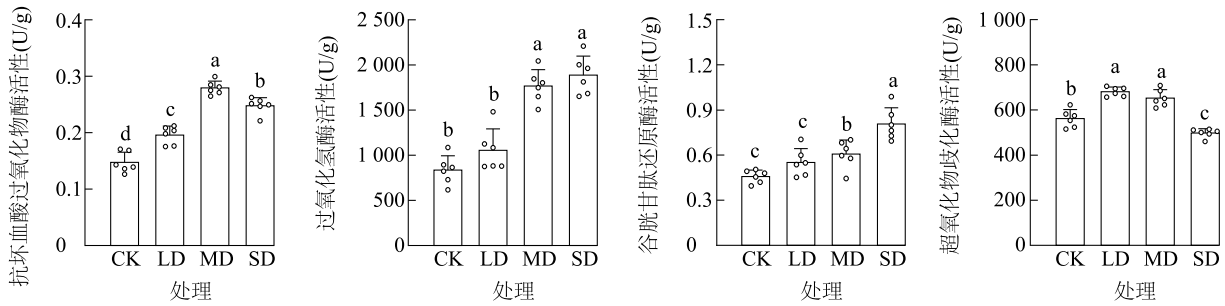
中 CAT 和 GR 活性均随干旱胁迫程度增加呈上升趋势;与对照相比,MD 处理、SD 处理冷蒿叶片 CAT 活性分别显著提高 111.26%和 125.71% ($P < 0.05$),MD 处理、SD 处理冷蒿叶片 GR 活性分别显著提高 32.69%和 76.22% ($P < 0.05$);与对照相比,LD 处理、MD 处理、SD 处理冷蒿叶片 APX 活性分别显著提高 32.77%、89.51%和 68.19%,MD 处理冷蒿叶片 APX 活性显著高于对照、LD 处理和 SD 处理 ($P < 0.05$)。

2.3 干旱胁迫对冷蒿药用物质含量的影响

干旱胁迫通过影响植物体内次生代谢途径影响药材药效物质含量^[20]。蒙药冷蒿中药效物质主要为黄酮类和酚类化合物^[21]。如图6所示,与对照相比,LD 处理、MD 处理、SD 处理冷蒿总酚含量分别显著增加 6.37%、17.67%和 13.04%,MD 处理冷蒿总酚含量显著高于对照、LD 处理和 SD 处理 ($P < 0.05$)。与对照相比,LD 处理、MD 处理、SD 处理冷蒿叶片总黄酮含量分别显著增加 9.66%、31.72%和 33.70% ($P < 0.05$)。相关性分析结果表明,总酚含量、总黄酮含量均与干旱程度呈正相关,其中总黄酮含量与干旱程度相关性显著 ($P < 0.05$)。

2.4 冷蒿产量-品质线性回归模型

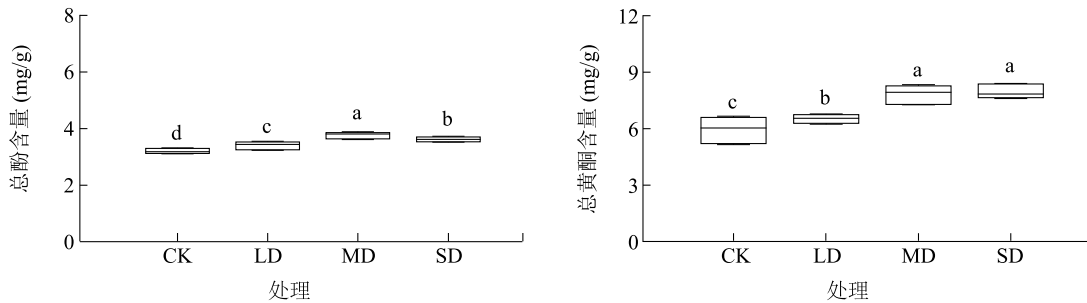
基于相关性分析和前人研究结果,将株高与茎粗作为产量的标志指标,总黄酮与总酚含量作为质量的标志指标^[21]。2种药效物质含量的积累趋势与株高和茎粗的变化趋势相反,由于单位不同,采用无量纲化处理后进行线性回归分析。如图7所示,对照与 LD 处理、MD 处理、SD 处理冷蒿产量标志、质量标志的变化趋势相反,4项指标在土壤含水率为57%~59%时出现交叉,表明在该含水率的土壤中



CK: 正常供水对照; LD: 轻度干旱胁迫处理; MD: 中度干旱胁迫处理; SD: 重度干旱胁迫处理。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 5 干旱胁迫对冷蒿抗氧化酶活性的影响

Fig.5 Effect of drought stress on the antioxidant enzyme activity in *Artemisia frigida* Willd.

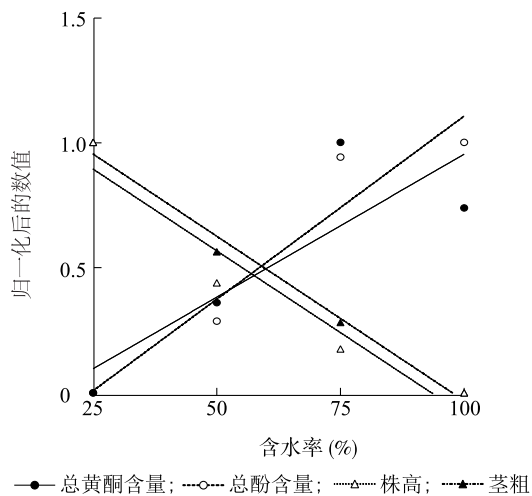


CK: 正常供水对照; LD: 轻度干旱胁迫处理; MD: 中度干旱胁迫处理; SD: 重度干旱胁迫处理。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 6 干旱胁迫对冷蒿药用物质含量的影响

Fig.6 Impact of drought stress on the pharmacodynamic substance content in *Artemisia frigida* Willd.

栽培冷蒿可以平衡其产量与质量。



25%、50%、75%、100% 含水率分别对应 SD 处理、MD 处理、LD 处理、CK (见图 6 注)。

图 7 冷蒿产量-品质线性回归模型

Fig.7 Yield-quality linear regression model of *Artemisia frigida* Willd.

3 讨论

3.1 干旱胁迫对冷蒿生长的影响

干旱胁迫对药用植物的影响直接体现在叶片与地上部分。叶片是植物进行蒸腾作用和光合作用的主要器官,缺水会导致叶片脱水,直接影响正常的生长与代谢活动^[6],干旱胁迫对全草入药或叶部入药的中药如荆芥、淫羊藿等的影响尤为显著^[22-23]。在本研究中,随着干旱胁迫程度的提高,冷蒿叶片叶周长、叶面积、小裂片长整体显著降低,株高和茎粗也显著降低,这种干旱响应模式能够保证冷蒿生命活动的稳定,但不利于药用成分的积累。

干旱胁迫对植株内环境的影响较大,在干旱胁迫下,植物的渗透调节系统被激活,游离脯氨酸(Pro)和可溶性糖(SS)等渗透调节物质含量增加以维持细胞结构稳定^[24],同时多种抗氧化途径被激活^[25-26],谷胱甘肽还原酶(GR)、过氧化氢酶(CAT)等抗氧化酶最先响应氧化胁迫,而细胞中 AsA-GSH

循环中的 AsA 不仅能直接还原活性氧,还能作为 AsA-GSH 循环中的活性酶底物参与活性氧的清除过程,多种酶共同抵御干旱环境^[7-8]。本研究中,随干旱胁迫程度的提高,冷蒿叶片游离脯氨酸(Pro)含量、还原型抗坏血酸(AsA)含量、还原型谷胱甘肽(GSH)含量整体呈上升趋势,谷胱甘肽还原酶(GR)、过氧化氢酶(CAT)活性呈上升趋势,表明在受到干旱胁迫后,冷蒿能够维持动态平衡和相对稳定的内环境,保证生命活动的正常进行。

3.2 干旱胁迫对冷蒿药效物质含量的影响

干旱胁迫是影响药材品质的重要非生物因素之一^[27-29]。遭受干旱胁迫后,植物体内活性氧大量累积,而黄酮类化合物具有较强的抗氧化活性,因此有研究者认为黄酮类化合物能够缓解干旱胁迫^[30]。本研究中,随着干旱胁迫程度的提高,冷蒿总黄酮含量显著增加。刘同歌等^[31]发现,随着干旱胁迫程度的提高,大麻中次生代谢物质含量增加,与本研究结论一致。这可能是因为干旱胁迫激活冷蒿抗氧化机制,冷蒿通过增加黄酮类化合物等次生代谢产物的含量加速活性氧的清除。同时,干旱胁迫导致渗透压升高,会抑制初生代谢活动,增强次生代谢活动,从而使药效物质含量提高。而重度干旱胁迫处理冷蒿叶中总酚含量显著低于中度干旱胁迫处理,这可能是因为参与相关次生代谢途径的酶活性下降,酚类代谢产物的合成受阻。许丽丽等^[32]对血叶兰幼苗进行干旱胁迫处理,也得到类似结论。

3.3 干旱胁迫对冷蒿药材产量与品质协同关系的影响

环境胁迫对药用植物的影响主要体现在表观形态和有效成分含量 2 个方面。本研究发现,干旱胁迫程度与冷蒿叶周长、叶面积、株高、茎粗等生长指标呈负相关,与有效成分含量呈正相关。该结论与荆芥、淫羊藿等药材的研究结果^[22-23]一致。而在特定干旱胁迫程度下,根类中药如甘草的药材产量与有效成分含量的变化趋势相同^[33]。这种差异可能与入药部位、种属差异或原生环境等因素有关。因此,在实际栽培中,应当根据药材特性制定差异化的栽培策略。顾旭鹏等^[34]认为环境因子对药材品质形成的影响具有时间尺度效应和程度尺度效应,时间尺度影响药用植物在多样生态环境中的表现,而程度尺度则通过次生代谢产物合成途径调控药材品质。因此探寻适宜的干旱胁迫程度是实现高效种

植、提高经济效益、保障用药安全的重要思路。

4 结论

本研究中,随干旱胁迫程度的提高,冷蒿叶片游离脯氨酸(Pro)含量、还原型抗坏血酸(AsA)含量、还原型谷胱甘肽(GSH)含量整体呈上升趋势,谷胱甘肽还原酶(GR)、过氧化氢酶(CAT)活性呈上升趋势。表明在受到干旱胁迫后,冷蒿能够维持动态平衡和相对稳定的内环境。随干旱胁迫程度的提高,冷蒿叶片叶周长、叶面积、叶长、叶宽、株高、茎粗等生长指标整体呈下降趋势,总黄酮含量呈上升趋势。相关性分析结果表明,冷蒿株高、茎粗等生长指标与干旱胁迫程度呈显著负相关($P < 0.05$),总黄酮含量与干旱胁迫程度呈显著正相关($P < 0.05$)。结合冷蒿产量-品质线性回归模型进行分析,结果表明在含水率为 57%~59% 的土壤中栽培冷蒿可以较好地平衡其产量与质量。本研究结果可为蒙药材冷蒿的优质高效栽培提供理论依据。

参考文献:

- [1] 薛 焱,刘欣媛,高洪波,等. 蒙药阿给水提物的抗炎作用及其机制研究[J]. 中国药房,2020,31(12):1425-1429.
- [2] 王青虎,乌仁苏布德,布和巴特尔,等. 蒙药小白蒿的历史沿革与现代研究概述[J]. 中国现代应用药学,2010,27(10):897-900,915.
- [3] 陈 越,宛 涛,张晓明,等. 冷蒿资源利用研究进展[J]. 中国草地学报,2024,46(2):134-143.
- [4] 王 昀,王丽娟,陆晓娟,等. 2023 年上半年我国干旱的特征及其成因分析[J]. 干旱气象,2023,41(6):884-896.
- [5] 张一龙,喻启坤,李 雯,等. 不同抗旱性狗牙根地上地下表型特征及内源激素对干旱胁迫的响应[J]. 草业学报,2023,32(3):163-178.
- [6] 孙 娜,秦雪龙,梁锋娜,等. 不同干旱胁迫强度下的类芦生长权衡研究[J]. 草业科学,2023,40(6):1582-1591.
- [7] 刘付松,张开弦,姚秋阳,等. 干旱后复水对党参农艺性状、生理生化及代表组分的影响[J]. 中国药理学杂志,2022,57(13):1081-1088.
- [8] MACHADO J, FERNANDES A P G, BOKOR B, et al. The effect of silicon on the antioxidant system of tomato seedlings exposed to individual and combined nitrogen and water deficit[J]. Annals of Applied Biology,2024,184(1):50-60.
- [9] 何 凤,刘攀峰,王 璐,等. 干旱胁迫及复水对杜仲苗生理特性的影响[J]. 植物生理学报,2021,57(3):661-671.
- [10] 张倩倩,李光跃,苏优拉,等. 干旱胁迫对蒙古黄芩和膜荚黄芪不同器官黄酮类成分积累的影响[J]. 西北植物学报,2020,40(7):1201-1208.

- [11] 杜虹韦,李 孟,姜志红,等. 干旱胁迫下黄芩代谢变化揭示药材活性成分复杂性的生物学本质[J]. 中国实验方剂学杂志, 2021,27(24):148-156.
- [12] 谢丰璞,王 楠,高 静,等. 干旱胁迫下药用大黄根部药效成分及根际土壤微生物变化规律及其相互作用机制研究[J]. 中国中药杂志,2023,48(6):1498-1509.
- [13] KUNERT O, ALPERTH F, PABI E, et al. Highly oxidized flavones in *Artemisia* species - structure revisions and improved UH-PLC-MSn analysis[J]. Heliyon, 2023,9(11):e22309.
- [14] FU Q H, MA X Q, LI S C, et al. New insights into the interactions between the gut microbiota and the inflammatory response to ulcerative colitis in a mouse model of dextran sodium sulfate and possible mechanisms of action for treatment with PE & AFWE[J]. Animal Models and Experimental Medicine, 2024,7(2):83-97.
- [15] 牛雪婧,聂 靖,杨白云,等. 河北木蓝叶表型对干旱胁迫的响应[J]. 西北植物学报,2020,40(4):613-623.
- [16] 布日额,阿拉腾图亚,包金泉,等. 蒙药材阿给的生药学研究[J]. 中国民族医药杂志,1998(增刊1):53.
- [17] 赵一之,曹 瑞,赵利清. 内蒙古植物志 第5卷[M]. 3版. 呼和浩特:内蒙古人民出版社,2020.
- [18] YUSUF M, SAEED T, ALMENHALI H A, et al. Melatonin improved efficiency of 24-epibrassinolide to counter the collective stress of drought and salt through osmoprotectant and antioxidant system in pea plants [J]. Scientia Horticulturae, 2024, 323: 112453.
- [19] 赵晶晶,詹万龙,周 浓. 非生物胁迫下植物体内活性氧和丙酮醛代谢的研究进展[J]. 南方农业学报,2022,53(8):2099-2113.
- [20] CAO S S, SHI L, SHEN Y, et al. Ecological roles of secondary metabolites of *Saposhnikovia divaricata* in adaptation to drought stress[J]. PeerJ, 2022,10:e14336.
- [21] 王青虎,武晓兰,王金辉. 蒙药小白蒿化学成分的研究(II)[J]. 中草药,2011,42(6):1075-1078.
- [22] 武 曦,张 罡,郭 华,等. 干旱胁迫对多裂叶荆芥幼苗形态和不同部位生理生化指标的影响[J]. 山西农业科学,2022,50(2):161-169,132.
- [23] 许彩丽. 遮阴与干旱胁迫对箭叶淫羊藿农艺及生理生化性状的影响研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2021.
- [24] CHEN Q, QU Z, MA G H, et al. Humic acid modulates growth, photosynthesis, hormone and osmolytes system of maize under drought conditions[J]. Agricultural Water Management, 2022,263(4):107447.
- [25] WANG Z H, WEI Y Q. Physiological and transcriptomic analysis of antioxidant mechanisms in sweet sorghum seedling leaves in response to single and combined drought and salinity stress[J]. Journal of Plant Interactions, 2022,17(1):1006-1016.
- [26] RAHMAT A, HASSANI H K, HOSSEIN M R. The simultaneous activity of cytosolic and mitochondrial antioxidant mechanisms in neutralizing the effect of drought stress in soybean[J]. Plant Physiology Reports, 2022,28(1):78-91.
- [27] 郅亚微,贺 涛. 褪黑素对模拟干旱胁迫下罗勒幼苗光合性能及抗氧化酶活性的影响[J]. 江苏农业科学,2024,52(3):179-184.
- [28] 李小玲,华智锐. 温度与水分胁迫下黄芩的渗透调节能力与交叉关系研究[J]. 江苏农业科学,2023,51(21):162-168.
- [29] 杨秋悦,罗影子,杨 洋,等. 干旱胁迫对铁皮石斛生理及不同部位活性成分的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(13):142-149.
- [30] JORGE T F, TOHGE T, WENDENBURG R, et al. Salt-stress secondary metabolite signatures involved in the ability of *Casuarina glauca* to mitigate oxidative stress[J]. Environmental and Experimental Botany, 2019,166:103808.
- [31] 刘同歌,苑海鹏,叶云舒,等. 干旱胁迫和复水对火麻生理及次生代谢产物含量的影响[J]. 节水灌溉,2023,12:41-50.
- [32] 许丽丽,孟新亚,尤燕平,等. 血叶兰幼苗对干旱胁迫的生理响应及其抗旱性指标筛选[J]. 亚热带植物科学,2024,53(1):12-21.
- [33] 盛玉章. 水盐胁迫及施肥对甘草和秦艽品质的影响[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2022.
- [34] 顾旭鹏,杨林林,董诚明,等. 中药材品质形成机制及调控研究进展[J]. 北方园艺,2024(6):129-137.

(责任编辑:成纾寒)