

DOI: 10.11686/cyxb2025081

http://cyxb.magtech.com.cn

张继元, 安海全, 潘靖一, 等. 7个紫花苜蓿品种种子萌发及幼苗生长的抗旱性评价. 草业学报, 2026, 35(2): 68—82.

ZHANG Ji-yuan, AN Hai-quan, PAN Jing-yi, et al. Drought resistance evaluation of seed germination and seedling growth of seven alfalfa cultivars.

Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(2): 68—82.

7个紫花苜蓿品种种子萌发及幼苗生长的抗旱性评价

张继元¹, 安海全², 潘靖一¹, 刘畅¹, 龙思思¹, 赵丽丽^{1*}

(1. 贵州大学动物科学学院草业科学系, 贵州 贵阳 550025; 2. 安顺市畜牧技术推广站, 贵州 安顺 561000)

摘要:以皇冠、角斗士、PANGO、巨能801、WL525、维多利亚、迪特7个紫花苜蓿品种种子为试验材料, 采用浓度为15%的聚乙二醇-6000(PEG-6000)溶液模拟干旱胁迫14 d, 实验室内分析了种子萌发、幼苗生长和生理生化指标对干旱胁迫的响应与变化。结果表明: 干旱胁迫条件下, 除PANGO外其余6个紫花苜蓿种子的发芽指数和活力指数均显著下降($P < 0.05$); 皇冠和WL525幼苗的干重、苗长和根长显著增加($P < 0.05$); 巨能801、维多利亚和角斗士幼苗的相对含水量均显著增加($P < 0.05$); 除角斗士外其余6个品种的过氧化物酶(POD)活性均显著上升, 除维多利亚外, 其余6个品种的丙二醛(MDA)含量均显著上升; 皇冠、迪特和巨能801的超氧化物歧化酶(SOD)活性均显著上升; 角斗士的脯氨酸(Pro)和可溶性糖(SS)含量显著升高($P < 0.05$)。基于种子萌发、幼苗生长和生理生化等17个指标, 利用主成分分析法结合隶属函数法综合评价, 得出7个紫花苜蓿品种种子萌发与幼苗生长期的抗旱性由强到弱的排序为: 巨能801 > 角斗士 > WL525 > 维多利亚 > PANGO > 迪特 > 皇冠; 基于系统聚类分析划分出: 1) 强抗旱品种为‘巨能801’; 2) 中抗旱品种为‘角斗士’、‘WL525’和‘维多利亚’; 3) 弱抗旱品种为‘PANGO’、‘迪特’和‘皇冠’。

关键词: 紫花苜蓿; 种子萌发; 生理; PEG-6000; 抗旱性评价

Drought resistance evaluation of seed germination and seedling growth of seven alfalfa cultivars

ZHANG Ji-yuan¹, AN Hai-quan², PAN Jing-yi¹, LIU Chang¹, LONG Si-si¹, ZHAO Li-li^{1*}

1. Department of Grassland Science, College of Animal Science, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Anshun Animal Husbandry Technology Promotion Station, Anshun 561000, China

Abstract: In this research a 15% polyethylene glycol-6000 (PEG-6000) solution was employed to simulate drought stress and test germination and seedling growth responses to drought of seven alfalfa (*Medicago sativa*) cultivars, namely, Phabulous, Gladiator, PANGO, Magnum 801, WL525, Victoria, and Dieter, for 14 days. The responses and changes in seed germination, seedling growth, and physiological and biochemical indexes to drought stress were measured and analyzed in the laboratory. It was found that under drought stress, the germination index and vigor index of the six alfalfa seeds, except PANGO, decreased significantly ($P < 0.05$). The dry weight, seedling length and root length of Phabulous and WL525 seedlings increased significantly ($P < 0.05$). The relative water content of seedlings of Magnum 801, Victoria and Gladiator increased significantly ($P < 0.05$). The

收稿日期: 2025-03-11; 改回日期: 2025-04-29

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合基础-ZK[2023]119, 黔科合平台人才[2021]5636号), 国家自然科学基金(32260340, 32060391)和贵州大学大学生科研训练计划项目(贵大SRT字[2022]072)资助。

作者简介: 张继元(2002—), 男, 贵州六盘水人, 在读本科。E-mail: zhangjiyuan010@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: zhaolili_0508@163.com

peroxidase (POD) activity of the six cultivars, except Gladiator, increased significantly ($P < 0.05$), and the malondialdehyde (MDA) content increased significantly ($P < 0.05$) in all cultivars except Victoria. The superoxide dismutase (SOD) activity increased significantly ($P < 0.05$) in Phabulous, Dieter, and Magnum 801. The proline (Pro) and soluble sugar (SS) content increased significantly ($P < 0.05$) in Gladiator. Using data for 17 traits defining seed germination, seedling growth and physiology and biochemistry, a multivariate evaluation was conducted using principal component analysis combined with the membership function method. In this way, the drought resistance of the seven alfalfa cultivars during seed germination and early seedling growth was ranked from strong to weak as follows: Magnum 801 > Gladiator > WL525 > Victoria > PANGO > Dieter > Phabulous. According to a hierarchical cluster analysis, the cultivars were classified into three categories: 1) Strongly drought-resistant cultivars are 'Magnum 801'; 2) Cultivars with medium drought-resistance are 'Gladiator', 'WL525' and 'Victoria'; 3) Varieties with weak drought-resistance are 'PANGO', 'Dieter' and 'Phabulous'.

Key words: alfalfa; seed germination; physiology; PEG-6000; drought resistance evaluation

干旱是制约植物生长发育的重要因子之一,是限制全球农业、畜牧业和牧草业可持续发展的重要因素^[1],尤其是对牧草的生产造成严峻挑战。世界上 1/3 的土地位于干旱或半干旱地区,而我国干旱和半干旱地区占土地面积 50% 以上^[2-3],其中位于中国西南的贵州省,是中国典型的喀斯特省,其喀斯特面积占全省总面积的 73.8%^[4-5]。该地区虽然年均降水量达 800~1300 mm^[6],但岩溶地貌导致地表水快速渗漏至地下,加之岩石裂隙发育,加剧了地下水资源流失,致使土壤持水能力不足^[7]。这里普遍存在生境基岩裸露、土体浅薄、水分下渗严重等问题,导致喀斯特地区在降水较多的背景下,干旱灾害频发^[8]。频发的干旱灾害不仅造成植物种子不能正常萌发,植物根系难以稳定获取水分,幼苗不能健康生长,牧草产量急剧下降,甚至出现极端干旱,导致牧草成片死亡,给畜牧业和牧草业的生产和发展带来巨大损失^[9]。因此,筛选、培育适宜喀斯特干旱环境生长的抗旱牧草品种是减少干旱损失的有效途径之一^[10]。

紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 又称紫苜蓿,为多年生豆科牧草,是一种全球性重要的优质牧草,素有“牧草之王”的美誉^[11],其具有营养价值高和抗逆性强等优点^[12],是草地补播、建植人工草地和草田轮作的首选牧草^[13]。同时,紫花苜蓿具有强大的根系,具备极强的生物固氮能力^[14],不仅能够调节土壤的酸碱度,还能提升土壤的理化性质^[15],在涵水固土、防风固沙、荒漠化和石漠化治理等方面起到了关键性作用^[16]。特别是在中国西南喀斯特山区,种植紫花苜蓿不仅有助于改善生态环境,还能提升土地的利用效率,提高生物多样性,有效助推当地畜牧业健康发展^[17],但针对喀斯特地区的紫花苜蓿抗旱品种筛选与适生性研究仍存在不足,适合当地推广的抗旱紫花苜蓿品种缺乏。近年来国内外学者对不同紫花苜蓿品种的抗旱性及其抗旱机制开展了系统研究,发现不同品种紫花苜蓿的抗旱能力不一,适应机制也存在差别。陈云鑫等^[18]研究发现陇东、Dryland 和巨能 7 品种抗旱性较强,适宜在干旱地区推广种植。徐航等^[19]研究指出,东苜 2 号、龙牧 803 和 5909 综合抗旱性状表现较好,在干旱区域不仅适应性强,而且牧草产量和品质较优。Ruan 等^[20]揭示了紫花苜蓿可通过调节内源一氧化氮水平来诱导内源激素代谢,从而增强自身抗逆性,特别是在调节脱落酸和水杨酸代谢水平上,可以促进植物生长并提高抗旱性。Xu 等^[21]进一步发现,紫花苜蓿种子对脱落酸的敏感性是可遗传的,对脱落酸不敏感的植株在萌发期表现出更强的耐旱性。此外,中苜 1 号和巨能品种在遭受干旱胁迫后,根系会发生补偿生长,增加根冠比,以缓解水分亏缺^[22]。这些研究为选择适合干旱地区种植的紫花苜蓿品种提供了科学依据。然而,牧草品种具有地域性,各优良紫花苜蓿品种均有其适宜的种植区域。现有研究多集中于北方干旱半干旱地区,缺乏对喀斯特地区紫花苜蓿抗旱性的研究,尤其在种子萌发期和幼苗期,导致其在喀斯特区域的生产推广受限。因此,针对喀斯特地区开展适生紫花苜蓿品种的抗旱性研究,能够更有效地支撑喀斯特地区紫花苜蓿品种的推广利用,为该地区紫花苜蓿的高效利用提供科学支撑。

本研究以贵州喀斯特地区引种的 7 个紫花苜蓿品种为试验材料,研究干旱胁迫下各品种种子萌发特性及幼

苗生长和生理生化变化,揭示其抗旱特性的生理机制,并采用主成分分析法结合隶属函数法的多维度评估体系,结合系统聚类分析,综合评价品种间的抗旱差异。本研究旨在筛选出抗旱性能优异的紫花苜蓿品种,为贵州喀斯特地区紫花苜蓿高效种植和畜牧业可持续发展提供理论支持,并通过综合评价为喀斯特地区抗旱牧草品种的定向选育奠定基础。研究结果为降低贵州喀斯特地区干旱导致的牧草减产风险,提高草地生产力可提供理论支撑,助力推动喀斯特地区石漠化治理、生态修复和农业可持续发展。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试紫花苜蓿品种为7个,具体品种名称、来源、原产地和千粒重等信息见表1。

表1 供试紫花苜蓿品种

Table 1 Alfalfa cultivars tested

品种 Cultivars	千粒重 Thousand seeds weight (g)	来源 Source	原产地 Place of origin
皇冠Phabulous	2.32	贵州众智恒生态科技有限公司 Guizhou Zhongzhiheng Ecological Technology Co., Ltd	美国 America
角斗士 Gladiator	2.25	贵州众智恒生态科技有限公司 Guizhou Zhongzhiheng Ecological Technology Co., Ltd	意大利 Italy
PANGO	2.25	贵州众智恒生态科技有限公司 Guizhou Zhongzhiheng Ecological Technology Co., Ltd	美国 America
巨能 801 Magnum 801	2.10	贵州众智恒生态科技有限公司 Guizhou Zhongzhiheng Ecological Technology Co., Ltd	美国 America
WL525	2.54	贵州众智恒生态科技有限公司 Guizhou Zhongzhiheng Ecological Technology Co., Ltd	美国 America
维多利亚 Victoria	2.19	贵州众智恒生态科技有限公司 Guizhou Zhongzhiheng Ecological Technology Co., Ltd	加拿大 Canada
迪特 Dieter	2.18	贵州众智恒生态科技有限公司 Guizhou Zhongzhiheng Ecological Technology Co., Ltd	意大利 Italy

1.2 试验方法

1.2.1 萌发试验 试验以蒸馏水为对照(CK),配制浓度为15%的聚乙二醇-6000(PEG-6000)溶液模拟干旱胁迫,每个处理设置4次重复,采取完全随机试验设计。选取颗粒饱满、大小均一、无霉变及病虫害的种子,用75%酒精溶液消毒3 min后,使用蒸馏水冲洗3~5遍彻底去除残留酒精,整齐摆放于铺有2层滤纸的培养皿,每皿摆放50粒种子。之后向其中缓慢加入处理溶液8 mL,于光照6000 lx、昼/夜时长12 h/12 h,25 °C恒温条件下培养。为保持溶液浓度恒定,每日采用称重法补充蒸发失去的水分确保溶液浓度恒定,以胚根长度大于种子的50%视为种子萌发。试验第7天随机挑取10粒种子采用称重法^[18]称量种子鲜重,并计算种子发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数。其中:

$$\text{发芽率(germination rate)} = (\text{发芽种子数} / \text{供试种子数}) \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{发芽势(germination potential)} = (\text{第4天发芽种子数} / \text{供试种子数}) \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{发芽指数(germination index, GI)} = \sum G_t / D_t \quad (3)$$

$$\text{活力指数(vitality index, VI)} = \text{GI} \times \text{第7天种子平均鲜重(g)} \quad (4)$$

式中: G_t 表示第 t 天的种子发芽数; D_t 为种子发芽天数。

试验于2023年9—12月在贵州大学动物科学学院草业科学系实验室进行。

1.2.2 幼苗试验 通过萌发试验培育出7个紫花苜蓿品种幼苗,从每个紫花苜蓿品种中随机选取15株生长一致、健康的幼苗小心放置于培养皿进行培育,每个处理重复4次,为使幼苗正常生长、保持恒定溶液浓度,每日采用称重法^[18]补充蒸发失去的水分确保溶液浓度恒定。每日观察幼苗的生长状况,若出现幼苗发霉等情况,及时将发霉和有病虫害的幼苗从培养皿中移出。试验第14天,随机选取5株测量苗长、芽长和根长,称鲜重之后,置于105 °C烘箱杀青30 min,75 °C烘干至恒重称干重,计算相对含水量和芽根比。其中:

$$\text{相对含水量(relative water content)} = (\text{鲜重} - \text{干重}) / \text{鲜重} \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{芽根比(bud root ratio)} = \text{芽长} / \text{根长} \quad (6)$$

试验于 2023 年 9—12 月在贵州大学动物科学学院草业科学系实验室进行。

1.2.3 生理指标测定 幼苗试验结束后,取新鲜完整的幼苗整株,在液氮中进行快速冷冻,用于测定生理指标。采用愈创木酚法测定过氧化物酶(peroxidase, POD)活性, WST-8 法测定超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性,紫外吸收法测定过氧化氢酶(catalase, CAT)活性,磺基水杨酸法测定脯氨酸(proline, Pro)含量,硫代巴比妥酸法测定丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量,蒽酮比色法测定可溶性糖(soluble sugar, SS)含量^[23]。

1.2.4 综合评价方法 采用主成分分析法结合隶属函数法计算抗旱性综合评价值(comprehensive evaluation, D),并结合系统聚类分析,对 7 个紫花苜蓿品种的抗旱性进行综合评价和排序。即通过主成分分析对干旱胁迫下 7 个紫花苜蓿品种的 17 项抗旱性指标($X_1 \sim X_{17}$)进行降维,提取主成分作为综合评价指标,再利用综合评价指标的隶属函数值及权重计算出每个品种的 D 值,基于 D 值采用组间联接法和欧氏距离进行系统聚类分析,最终实现抗旱性综合评价和抗旱性排序。计算公式如下:

$$\text{权重}(W_j) = P_j / \sum_{j=1}^n P_j \quad (7)$$

$$\text{隶属函数值} \mu(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (8)$$

$$\text{抗旱性综合评价值}(D) = \sum_{j=1}^n [\mu(X_j) \cdot W_j] \quad (9)$$

式中: $j=1, 2, 3, \dots, n$, X_j 表示第 j 个综合指标值, X_{\min} 和 X_{\max} 分别表示第 j 个综合指标的最小值与最大值, P_j 表示各品种第 j 个主成分所对应的贡献率。

1.3 数据处理

使用 Microsoft Excel 2019 进行数据处理, IBM SPSS Statistics 26 软件进行方差分析、邓肯多重比较(Duncan)、主成分分析(principal component analysis, PCA)和系统聚类分析,差异显著水平为 $P < 0.05$, 采用 Origin 2018 软件作图,所有数据结果均以“平均值±标准差”表示。

2 结果与分析

2.1 种子萌发

如图 1 所示,在 15% PEG-6000 胁迫下,巨能 801 的发芽率和发芽势均维持在较高水平,分别达到了 90.5% 和 89.0%,均显著高于 PANGO、皇冠、角斗士和迪特 4 个品种,其中迪特的发芽率和发芽势与巨能 801 相比显著降低了 18% 和 17% ($P < 0.05$)。随着干旱胁迫的发生,皇冠、角斗士、维多利亚和迪特的发芽率和发芽势均出现下降趋势,迪特的发芽率和发芽势显著低于对照组,分别下降了 12% 和 9%;角斗士和 PANGO 的发芽势显著低于对照组 ($P < 0.05$),分别下降了 15% 和 16%。

在 15% PEG-6000 胁迫下,巨能 801 的发芽指数和活力指数仍保持最高水平,分别是皇冠的 1.7 和 2.0 倍。随着干旱胁迫的发生,7 个紫花苜蓿品种种子的发芽指数均显著下降 ($P < 0.05$),6 个紫花苜蓿品种(除 PANGO)的活力指数均显著下降 ($P < 0.05$),其中皇冠的发芽指数和活力指数下降幅度最大,分别下降了 41% 和 62%。

2.2 幼苗生长

如表 2 所示,随着干旱胁迫的发生,皇冠、PANGO 和 WL525 的幼苗干重显著增加,维多利亚的干重显著减少 ($P < 0.05$),维多利亚、巨能 801 和迪特 3 个品种的干重显著低于其余 4 个品种,PANGO 的干重除与 WL525 差异不显著外,均显著高于其他 6 个品种 ($P < 0.05$);角斗士的幼苗鲜重显著增加了 0.4 倍,皇冠、PANGO、WL525 和迪特的鲜重分别显著减少了 15%、17%、17% 和 40%,其中迪特的鲜重均显著低于其余 6 个品种,可见干旱胁迫对物质积累的影响存在品种间的差别。

在 15% PEG-6000 胁迫下,维多利亚和巨能 801 的相对含水量显著高于其他 5 个品种 ($P < 0.05$),分别为 95.86% 和 95.56%,比最低的 PANGO 均高出 6%。随着干旱胁迫的发生,角斗士和巨能 801 的相对含水量均显著上升了 2%,维多利亚的相对含水量显著上升了 3%,其余 4 个品种的相对含水量均显著下降,其中 PANGO 降幅最大,为 6%。

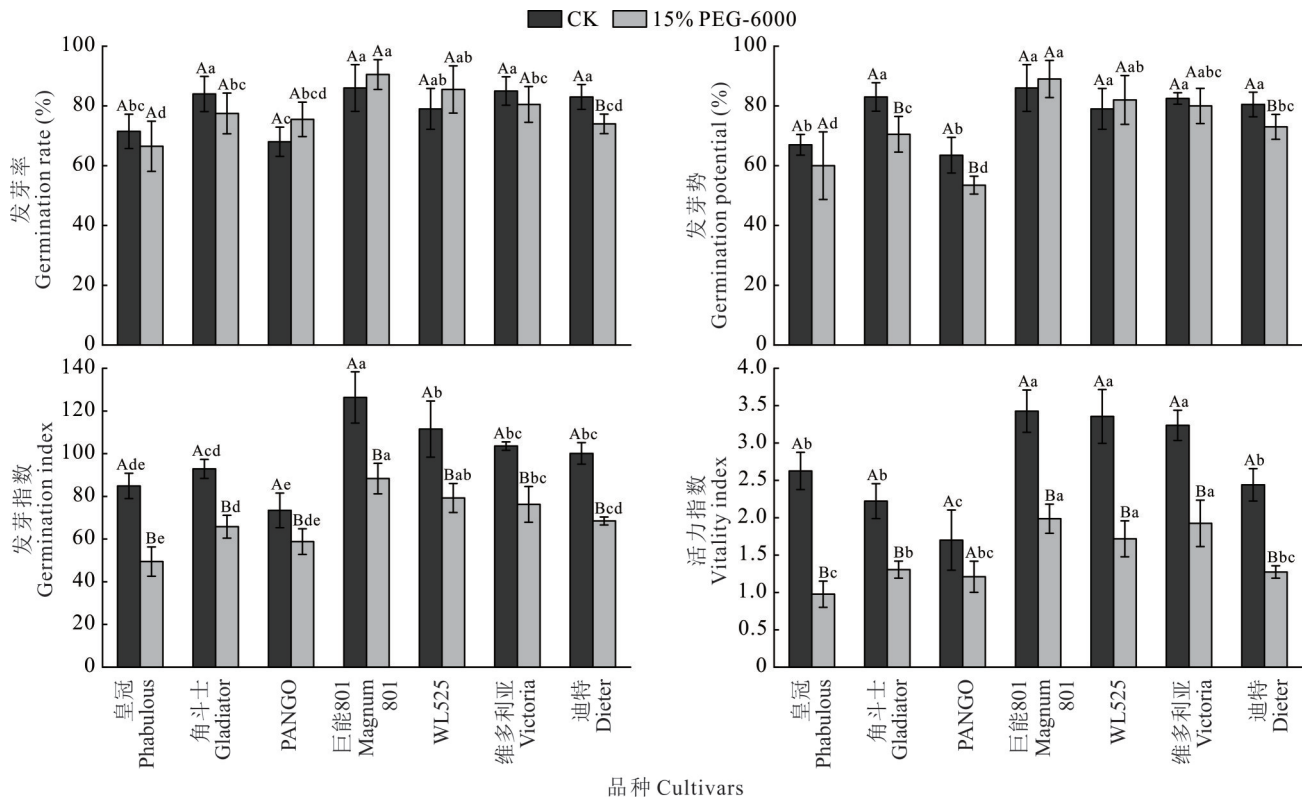


图1 干旱胁迫对7个紫花苜蓿品种种子萌发的影响

Fig. 1 Effects of drought stress on seed germination of seven alfalfa cultivars

不同小写字母表示同一处理不同品种之间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示同一品种不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。Different lowercase letters indicate significant differences among different cultivars of the same treatment ($P < 0.05$), and different uppercase letters indicate significant difference between different treatments of the same cultivars ($P < 0.05$), the same below.

如表3所示,在15% PEG-6000胁迫条件下,PANGO的芽长显著短于其余6个品种,为8.51 mm;皇冠的根长为巨能801的2.5倍,显著长于其余6个品种,巨能801的根长显著短于角斗士,但其芽长、根长和苗长未受干旱胁迫的显著影响,角斗士和迪特的芽长、根长和苗长同样未受干旱胁迫的显著影响 ($P > 0.05$)。干旱胁迫下皇冠的苗长显著高于其余6个品种,维多利亚和WL525的苗长显著高于巨能801和PANGO ($P < 0.05$);巨能801、维多利亚和迪特的芽根比显著增加,而皇冠和PANGO芽根比显著降低了3.7和1.4倍,其余2个品种无显著差异 ($P > 0.05$)。

2.3 生理生化

2.3.1 抗氧化酶活性和丙二醛含量 如图2所示,在15% PEG-6000胁迫下,以迪特、角斗士和皇冠的POD活性较高,分别比最低的PANGO高出了30%、21%和19%。除角斗士外其余品种的POD活性均在受到干旱胁迫时表现出显著上升的趋势 ($P < 0.05$),其中皇冠的POD活性上升了2.1倍,上升幅度最大;维多利亚上升了1.2倍,上升幅度最小;角斗士下降了5%。

在15% PEG-6000胁迫下,7个紫花苜蓿的SOD活性由大到小依次为:维多利亚、WL525、迪特、皇冠、巨能801、PANGO、角斗士,其中维多利亚的SOD活性为角斗士的11倍,显著高于除WL525外的其余5个品种,角斗士的SOD活性显著低于其他6个品种 ($P < 0.05$)。随着干旱胁迫的发生,皇冠、巨能801、维多利亚和迪特的SOD活性呈上升趋势,皇冠、巨能801和迪特的上升幅度较大,显著高于对照组 ($P < 0.05$),其中迪特上升了14倍,巨能801上升了10倍。

在15% PEG-6000胁迫下,角斗士的CAT活性最高,比巨能801、迪特、维多利亚和WL525分别高出9%、19%、30%和38%,而皇冠的CAT活性显著低于除PANGO外的其余5个品种,且较对照组显著下降了3.3倍

表 2 干旱胁迫对 7 个紫花苜蓿品种幼苗生物量和相对含水量的影响

Table 2 Effects of drought stress on seedling biomass and relative water content of seven alfalfa cultivars

品种 Cultivars	PEG-6000 浓度 PEG-6000 concentration (%)	干重 Dry weight (g·plant ⁻¹)	鲜重 Fresh weight (g·plant ⁻¹)	相对含水量 Relative water content (%)
皇冠 Phabulous	0	0.0015±0.0001Bab	0.0284±0.0022Aa	94.72±0.0022Ab
	15	0.0017±0.0001Ab	0.0242±0.0011Bbc	92.88±0.0040Bc
角斗士 Gladiator	0	0.0017±0.0003Aa	0.0219±0.0036Bc	92.26±0.0013Bd
	15	0.0017±0.0001Ab	0.0297±0.0014Aa	94.23±0.0017Ab
PANGO	0	0.0011±0.0001Bb	0.0278±0.0030Aab	95.68±0.0060Aa
	15	0.0022±0.0001Aa	0.0232±0.0022Bc	90.34±0.0085Be
巨能 801 Magnum 801	0	0.0015±0.0001Aab	0.0230±0.0021Ac	93.38±0.0033Bc
	15	0.0012±0.0004Ac	0.0272±0.0044Aab	95.56±0.0091Aa
WL525	0	0.0011±0.0002Bb	0.0272±0.0021Aab	95.64±0.0107Aa
	15	0.0019±0.0001Aab	0.0225±0.0026Bc	91.33±0.0126Bde
维多利亚 Victoria	0	0.0016±0.0002Aa	0.0238±0.0022Abc	93.23±0.0060Bc
	15	0.0010±0.0000Bc	0.0255±0.0010Abc	95.86±0.0019Aa
迪特 Dieter	0	0.0014±0.0002Aab	0.0273±0.0019Aab	94.54±0.0059Ab
	15	0.0013±0.0003Ac	0.0164±0.0008Bd	92.09±0.0143Bcd

注：不同小写字母表示同一处理不同品种之间差异显著 ($P < 0.05$)，不同大写字母表示同一品种不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)，下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among different cultivars of the same treatment ($P < 0.05$), and different uppercase letters indicate significant difference between different treatments of the same cultivars ($P < 0.05$), the same below.

表 3 干旱胁迫对 7 个紫花苜蓿品种幼苗生长的影响

Table 3 Effects of drought stress on seedling growth of seven alfalfa cultivars

品种 Cultivars	PEG-6000 浓度 PEG-6000 concentration (%)	苗长 Seedling length (mm)	芽长 Bud length (mm)	根长 Root length (mm)	芽根比 Bud root ratio
皇冠 Phabulous	0	28.74±3.20Bc	18.37±2.07Aa	10.37±1.63Bd	1.79±0.28Aa
	15	46.33±4.12Aa	15.04±1.22Bb	31.28±3.30Aa	0.48±0.04Bc
角斗士 Gladiator	0	31.96±6.13Abc	16.82±1.80Aa	15.14±4.41Abcd	1.15±0.23Abcd
	15	34.38±5.79Abc	14.95±0.84Ab	19.43±6.56Ab	0.89±0.48Abc
PANGO	0	34.77±2.26Aabc	18.70±1.24Aa	16.07±2.74Abcd	1.19±0.23Abc
	15	25.75±5.72Bd	8.51±1.90Bc	17.24±3.86Abc	0.49±0.02Bc
巨能 801 Magnum 801	0	35.35±7.50Aabc	16.00±1.69Aa	19.35±6.02Aabc	0.86±0.19Bede
	15	30.71±1.95Acd	18.10±1.64Aab	12.60±2.44Ac	1.49±0.38Aa
WL525	0	30.26±1.58Bc	16.62±1.32Aa	13.64±2.11Bcd	1.24±0.26Ab
	15	37.67±3.54Ab	18.81±5.10Aa	18.85±3.65Abc	1.05±0.43Aab
维多利亚 Victoria	0	38.31±4.87Aab	17.03±1.75Ba	21.28±4.78Aab	0.83±0.19Bde
	15	37.90±3.50Ab	20.56±0.38Aa	17.33±3.52Abc	1.22±0.25Aab
迪特 Dieter	0	40.71±4.99Aa	17.47±1.78Aa	23.23±4.37Aa	0.77±0.17Be
	15	36.47±2.68Abc	18.65±0.88Aa	17.81±2.54Abc	1.06±0.15Aab

($P < 0.05$)，与对照组相比，除皇冠和 WL525 外其余 5 个品种干旱处理组的 CAT 活性均上升，其中迪特上升了 1.5 倍。在正常情况下 (CK)，皇冠的 CAT 活性显著高于其他 6 个品种 ($P < 0.05$)，而巨能 801、角斗士和 WL525 间 CAT 活性无显著差异。

干旱胁迫下,7个紫花苜蓿品种的MDA含量均出现升高趋势,除维多利亚外其余6个品种的MDA含量显著高于对照组($P<0.05$),其中WL525和角斗士的MDA含量分别上升了1.9和1.7倍。在15% PEG-6000胁迫下,迪特的MDA含量显著高于维多利亚($P<0.05$),但其二者的MDA含量显著低于其他5个品种,比角斗士分别低了29%和47%。

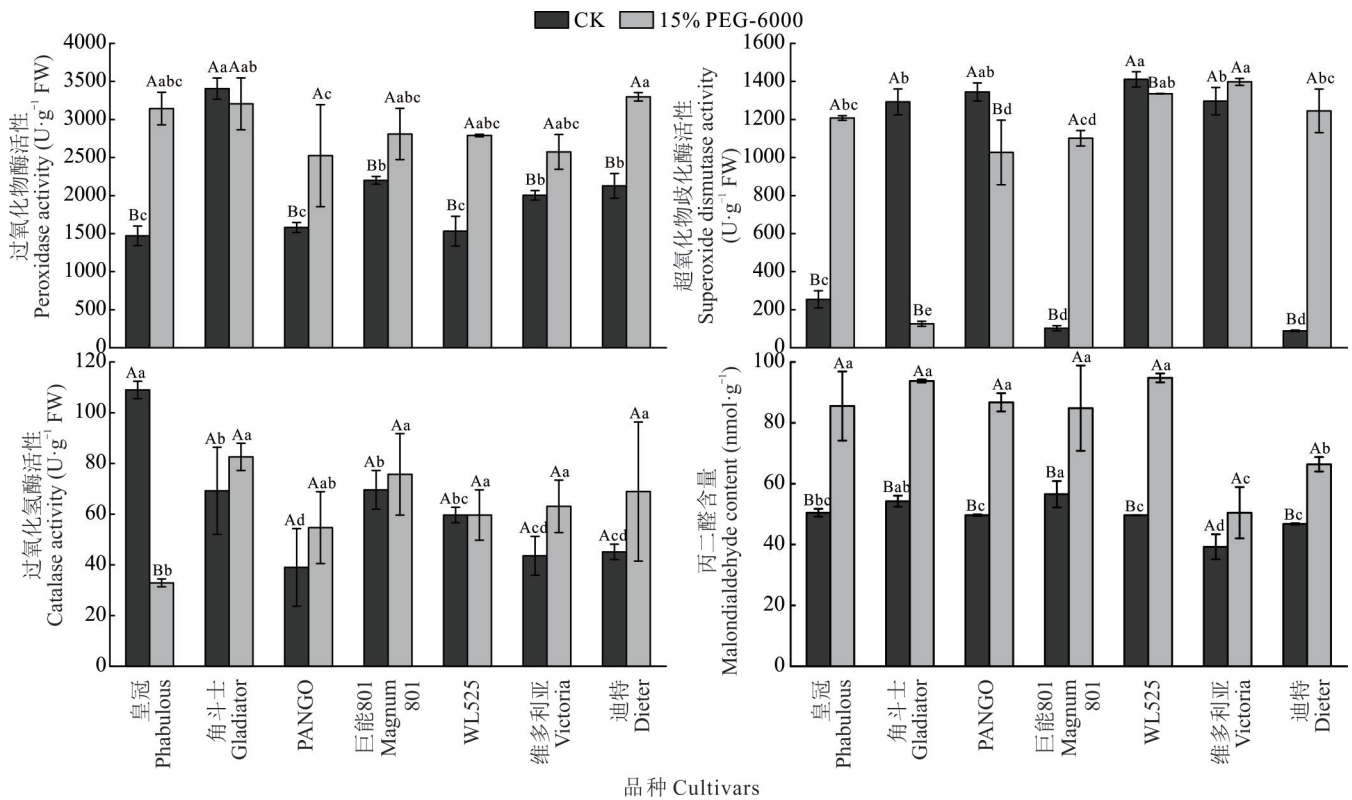


图2 干旱胁迫对7个紫花苜蓿品种抗氧化酶活性和丙二醛含量的影响

Fig. 2 Effects of drought stress on antioxidant enzymes activity and malondialdehyde content of seven alfalfa cultivars

2.3.2 渗透调节物质含量 如图3所示,随着干旱胁迫的发生,7个紫花苜蓿品种的可溶性糖含量均呈升高趋势,除皇冠、PANGO和迪特3个品种外其余4个品种的可溶性糖含量显著高于对照组,其中WL525升高了28%,维多利亚升高了30%。与对照组相比,皇冠、角斗士、PANGO、维多利亚和迪特5个品种的Pro含量明显上升,其中除维多利亚外剩余4个品种干旱胁迫组的Pro含量显著高于对照组($P<0.05$)。

2.4 抗旱性综合评价

为降低单一指标的偏差、系统误差和抗旱性信息的重叠,选取干旱处理组的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、干重、鲜重、相对含水量、苗长、芽长、根长、芽根比、POD、SOD、CAT活性、丙二醛、脯氨酸和可溶性糖含量进行主成分分析,分别设为 $X_1\sim X_{17}$ 。以提取出的主成分为综合评价指标,采用隶属函数法进行分析,之后根据公式分别计算出每个品种的抗旱性综合评价值(D),并基于 D 值采用组间联接法和欧氏距离进行系统聚类分析,最终实现抗旱性综合评价和抗旱性排序。

如表4所示,17个指标共提取出5个主成分,特征值均大于1,主成分1~主成分5的方差解释率分别为40.037%、22.334%、17.368%、10.945%、6.604%,累积方差解释率达到了97.289%,说明这5个主成分能够较好地概括原始变量的信息。其中主成分1中主要包含了发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、干重和鲜重,主成分2中主要包含了苗长、芽长、根长和相对含水量,主成分3主要包含了SOD活性、丙二醛和脯氨酸含量,主成分4和主成分5主要包含了POD、CAT活性和可溶性糖含量。主成分1和主成分2集中反映了紫花苜蓿种子的活力、发芽能力以及生长情况,主成分3~主成分5集中反映了紫花苜蓿幼苗抗氧化酶、丙二醛和渗透调节物质的状况。主成分1~主成分5的权重(W_j)分别为0.412、0.230、0.179、0.113、0.068。

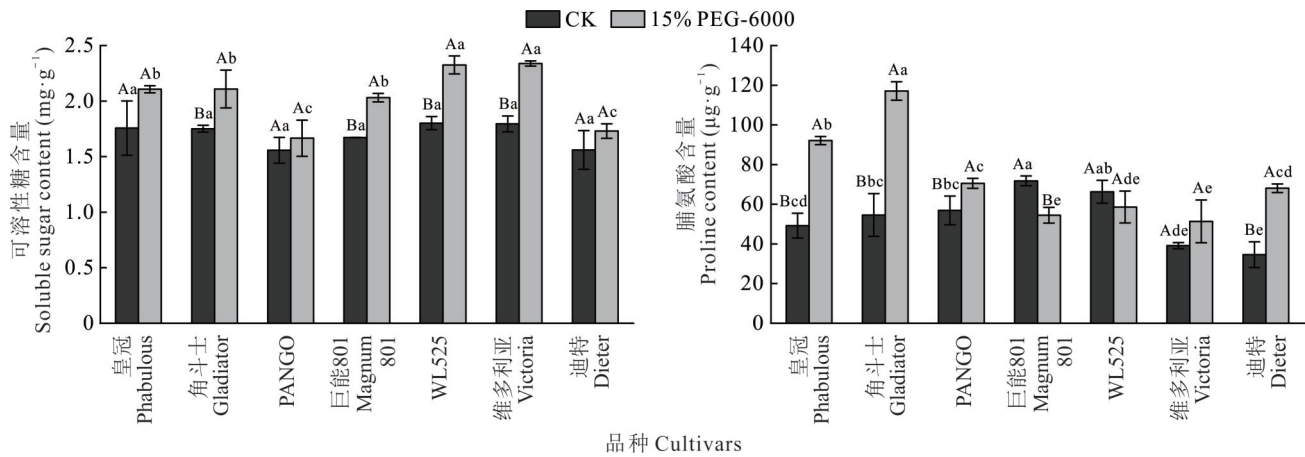


图 3 干旱胁迫对 7 个紫花苜蓿品种渗透调节物质含量的影响

Fig. 3 Effects of drought stress on the content of osmotic adjustment substances in seven alfalfa cultivars

表 4 干旱胁迫下 7 个紫花苜蓿品种各项指标的主成分分析

Table 4 Principal component analysis of indicators of seven alfalfa cultivars under drought stress

项目 Item	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5
X ₁ 发芽率 Germination rate	0.3652	0.1368	0.0529	0.0467	0.0586
X ₂ 发芽势 Germination potential	0.3210	0.0467	0.0848	0.3509	0.0437
X ₃ 发芽指数 Germination index	0.3546	0.1194	0.0780	0.1903	0.0571
X ₄ 活力指数 Vitality index	0.3623	0.0553	0.1358	0.0530	0.1770
X ₅ 干重 Dry weight	0.2628	0.3338	0.1266	0.1266	0.1628
X ₆ 鲜重 Fresh weight	0.1794	0.0350	0.3092	0.4302	0.3595
X ₇ 相对含水量 Relative water content	0.1712	0.4238	0.1137	0.1909	0.0863
X ₈ 苗长 Seedling length	0.0671	0.4335	0.2217	0.1878	0.0738
X ₉ 芽长 Bud length	0.2116	0.2089	0.3784	0.0678	0.2957
X ₁₀ 根长 Root length	0.2206	0.3782	0.0130	0.1789	0.1084
X ₁₁ 芽根比 Bud root ratio	0.3043	0.0915	0.2717	0.0553	0.3173
X ₁₂ 过氧化物酶活性 Peroxidase activity	0.2073	0.0589	0.0865	0.5371	0.1533
X ₁₃ 超氧化物歧化酶活性 Superoxide dismutase activity	0.1160	0.2880	0.3690	0.1704	0.3086
X ₁₄ 过氧化氢酶活性 Catalase activity	0.1521	0.3481	0.0467	0.3652	0.0905
X ₁₅ 丙二醛含量 Malondialdehyde content	0.0092	0.0310	0.5448	0.0762	0.2911
X ₁₆ 脯氨酸含量 Proline content	0.2596	0.0969	0.3492	0.1770	0.2753
X ₁₇ 可溶性糖含量 Soluble sugar content	0.1960	0.2620	0.1006	0.1874	0.5515
特征值 Eigenvalue	6.806	3.797	2.953	1.861	1.123
贡献率 Contribution rate (%)	40.037	22.334	17.368	10.945	6.604
累积贡献率 Cumulative contribution rate (%)	40.037	62.371	79.740	90.685	97.289
权重 Weight	0.412	0.230	0.179	0.113	0.068

以主成分 1~主成分 5 为综合评价指标,可得到 7 个紫花苜蓿品种的综合指标值(X_j),根据公式(8)和公式(9)分别计算出每个品种综合指标值的隶属函数值 $\mu(X_j)$ 和抗旱性综合价值值(D),依据 D 值对 7 个紫花苜蓿品种进行抗旱性排序。如表 5 所示,供试的 7 个紫花苜蓿品种的综合价值存在差异,为 0.23 至 0.81,抗旱性由强到弱依次为:巨能 801、角斗士、WL525、维多利亚、PANGO、迪特、皇冠。

表5 干旱胁迫下7个紫花苜蓿品种的隶属函数值及综合评价值

Table 5 Subordinate function values and comprehensive evaluation values of seven alfalfa cultivars under drought stress

品种 Cultivars	隶属函数值 Subordinate function values $\mu(X_j)$					综合评价值 Comprehensive evaluation (D)	排序 Sort
	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5		
皇冠 Phabulous	0.0000	0.1856	0.5822	0.4526	0.5167	0.2332	7
角斗士 Gladiator	0.2607	0.8494	1.0000	0.9071	0.8180	0.6399	2
PANGO	0.2695	0.6646	0.5640	0.0000	0.2457	0.3815	5
巨能 801 Magnum 801	1.0000	1.0000	0.4875	0.4970	0.3074	0.8063	1
WL525	0.9295	0.0000	0.8548	0.7233	0.1753	0.6296	3
维多利亚 Victoria	0.7198	0.3426	0.0000	0.5532	1.0000	0.5059	4
迪特 Dieter	0.1790	0.6234	0.0699	1.0000	0.0000	0.3426	6

如图4所示,根据每个品种抗旱性综合评价值(D),利用系统聚类分析,在欧氏距离为15时将7个紫花苜蓿品种分为3类:1)强抗旱品种为‘巨能801’;2)中抗旱品种,包括‘角斗士’、‘WL525’和‘维多利亚’;3)弱抗旱品种,包括‘PANGO’、‘迪特’和‘皇冠’。

3 讨论

3.1 种子萌发

种子萌发是植物生活史中的关键阶段,依赖充足的水分供给,水分不足将阻碍种子正常吸水膨胀,直接阻碍胚的激活从而影响种子的萌发过程与幼苗建成^[24]。通常种子萌发需水阈值越小,种子的耐旱性越好^[25]。PEG-6000具有水溶性和不挥发性等特点,是一种理想的渗透压剂,广泛用于植物抗旱性研究,已经在黑麦草(*Lolium perenne*)^[26]、燕麦(*Avena sativa*)^[27]和狼尾草(*Pennisetum alopecuroides*)^[28]等植物上得到科学应用。

本研究中,15% PEG-6000胁迫对不同品种紫花苜蓿种子的萌发产生了显著影响,且呈现品种间差异,干旱胁迫显著抑制了多数紫花苜蓿品种的种子萌发。具体表现为,与对照相比,发芽率(除PANGO、巨能801、WL525)和发芽势(除巨能801、WL525)均在受到干旱胁迫时表现出下降趋势,这与前人在宽叶雀稗(*Paspalum dilatatum*)^[29]和金皇后紫花苜蓿^[30]上的研究结果一致,说明干旱胁迫对紫花苜蓿种子萌发有抑制作用^[31],干旱限制种子的吸水膨胀,直接阻碍了紫花苜蓿的萌发进程。值得注意的是,巨能801和WL525的种子发芽率和发芽势在干旱胁迫下反而有小幅上升,与Yuan^[32]等提出的“适当浓度PEG处理虽然会略微导致植株受损但是一定程度上促进种子萌发,进而提高植株抗逆能力”这一观点基本一致。干旱胁迫未对PANGO种子发芽率产生显著影响,但显著抑制了其发芽势,表明其种子吸水速率受干旱抑制,导致其萌发时间延迟,使发芽高峰期一定程度上向后推移。

7个紫花苜蓿品种发芽指数和活力指数(除PANGO)均在受到干旱时表现出显著下降,下降幅度明显高于发芽率和发芽势,说明干旱对供试紫花苜蓿种子活力的抑制作用高于对发芽率的抑制作用^[32],表明干旱不仅影响种子的萌发能力,更削弱了幼苗建成的潜在活力^[33]。巨能801、维多利亚和WL525的活力指数在对照和干旱处理组中均显著高于其余品种,表现出了更强的种子活力,为干旱胁迫下幼苗快速建成提供了保障,展现出了品种间抗旱性的差异。

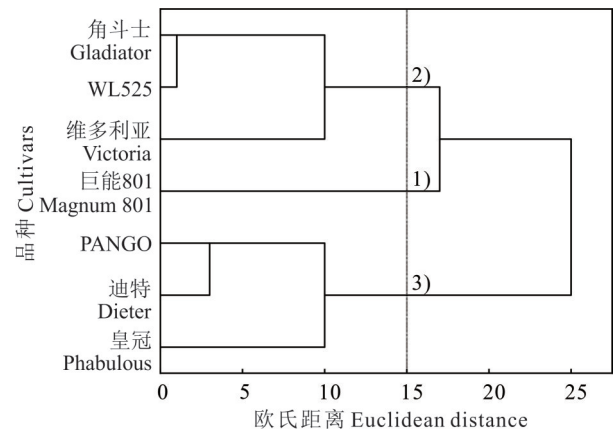


图4 7个紫花苜蓿品种抗旱性综合评价值聚类分析

Fig. 4 Cluster analysis of comprehensive evaluation value (D) for drought resistance in seven alfalfa cultivars

3.2 幼苗生长

相对含水量是指植物组织内水分占植物重量的百分比,可反映植物的生理状态和生长情况,大量研究表明植株在受到干旱胁迫时相对含水量会明显下降^[34]。本研究中,随干旱胁迫的发生皇冠、PANGO、WL525 和迪特的相对含水量均显著下降;角斗士、巨能 801 和维多利亚的相对含水量显著上升,其中 PANGO 的相对含水量下降至 90.34%。由此可见,干旱胁迫会大幅削弱皇冠、PANGO、WL525 和迪特的保水能力,导致植株相对含水量下降,难以维持细胞膨压和代谢活性,这与干旱胁迫下植物相对含水量降低的普遍规律一致^[35],其中 PANGO 的相对含水量下降至 90.34%,远低于其他品种,表明其在干旱下水分流失更严重。然而,角斗士、巨能 801 和维多利亚在应对干旱胁迫时,能够通过提高相对含水量来减轻干旱胁迫对植物造成的伤害,维持细胞结构的稳定性,减缓水分亏缺对生理功能的影响,从而增强对干旱环境的耐受性^[36]。

干旱胁迫下,花苜蓿(*Medicago ruthenica*)^[37]和狼尾草^[38]通过提高根系长度适应干旱;而王江银等^[39]对苜蓿抗旱性的研究表明,新牧 4 号品种在干旱胁迫中更倾向于将资源分配给芽,促进芽生长,抑制根系的生长。本研究中,干旱胁迫下皇冠和 WL525 的根长显著增加,得到了与花苜蓿和狼尾草相似的结论,即它们将营养物质向根部移动,优先促进根的生长,来增强水分获取能力,从而抵御干旱,维持较稳定的生长,得到了较高的干重。干旱胁迫下维多利亚的芽长和芽根比均显著上升,这与王江银等^[39]的研究结果类似,说明其将资源分配给地上部分,可能通过快速完成营养器官建成以适应干旱^[40-41]。然而,干旱胁迫下 PANGO 的芽长和芽根比显著下降,说明其地上部分对干旱胁迫更为敏感,干旱胁迫抑制了其地上部分的生长,最终限制植株的整体生长,以上结果进一步呈现出供试紫花苜蓿品种间抗旱机制和抗旱能力的差异。

3.3 生理生化

植物在遭受干旱胁迫时不仅外观形态发生改变,其内部也会产生多种抗逆性反应,包括分泌渗透压调节物质、pH 调节和活性氧清除等^[42]。在正常的生理活动中,植物体内的活性氧产生和消除维持着一种动态平衡。然而,在干旱胁迫下,活性氧会迅速累积,如果不能及时清除,会导致植物细胞的分子生物结构发生变化,破坏细胞膜结构与功能,严重时甚至会导致植物死亡^[43]。丙二醛是脂质过氧化反应的一种产物,其在植物体内的含量被视为衡量脂质过氧化程度的重要指标^[44]。干旱胁迫能够导致紫花苜蓿产生大量超氧自由基,使膜脂发生过氧化反应,导致细胞膜受到损伤^[45]。本研究中,干旱胁迫下 7 个紫花苜蓿的 MDA 含量均明显上升,是细胞膜受到损伤的指示,还可能导致其光合系统与代谢活动受到进一步抑制。石晓昀等^[46]对于新疆野苹果(*Malus sieversii*)的水分胁迫研究表明,MDA 会抑制蛋白质的合成,引发叶绿体形态结构的变化,进而影响植物的光合作用和有机物的累积。

干旱胁迫下植物会激活体内的抗氧化酶,用于清除那些对植物细胞正常代谢有害的活性氧,从而保护细胞膜免受活性氧的攻击^[43]。脯氨酸和可溶性糖是维持细胞膨压的主要渗透调节物质,能够保护植物免受氧化胁迫的损伤^[22]。干旱胁迫下,皇冠、PANGO、巨能 801、WL525、维多利亚和迪特 6 个品种均通过提高保护酶活性和增加渗透调节物质含量来适应干旱,但供试品种间的抗氧化酶和渗透调节物质表现出不同的变化规律,呈现出品种适应干旱的特异性,这已经在牧歌 37CR、巨能和中苜 1 号品种抗旱性研究中被证实^[22]。干旱胁迫下,皇冠、迪特和巨能 801 的抗氧化酶系统主要依赖提高 POD 和 SOD 活性来消除细胞内的过氧化氢和活性氧,但主要的渗透调节物质不同。具体而言,巨能 801 通过提高 POD 和 SOD 活性来增强抗氧化能力,并主要依靠可溶性糖作为渗透调节物质。这与苜蓿王品种上的研究相似,干旱胁迫下,其叶表面蜡质及脯氨酸含量均较高^[47],表明其主要通过蜡质层物理屏障和脯氨酸积累协同抗旱,其抗旱机制与巨能 801 具有一定程度的相似性,二者均依赖渗透调节物质维持细胞水势,但巨能 801 更偏向于提高抗氧化酶活性保护膜结构,而苜蓿王依赖表皮蜡质减少非气孔性失水,差异可能源于品种遗传和胁迫响应的不同。

脯氨酸作为一种重要的渗透调节物质,有助于维持细胞的渗透压平衡,稳定细胞内部的胶体状态和代谢过程,在抗旱过程中发挥了关键作用。本研究中,角斗士在干旱胁迫发生后,其脯氨酸和可溶性糖含量显著上升,有效缓解了干旱带来的负面影响。虽然其抗氧化酶系统出现了严重失衡——SOD 活性降低 90%,但脯氨酸含量显

著上升了2.14倍,大量的脯氨酸积累不仅弥补了SOD活性降低所带来的不足,还有效减轻了游离氨毒性,并为生长和发芽储备能量^[48],这与干旱胁迫下角斗士的根部和幼苗生长出现增加趋势的结果相吻合。WL525和维多利亚,这两个品种则侧重于提高POD活性和可溶性糖含量来应对干旱胁迫。PANGO其抗旱策略主要是通过提高POD活性和脯氨酸含量,但其芽长和芽根比显著下降,表明地上部分对干旱较为敏感;这与郝俊峰等^[49]研究中北极熊品种在干旱胁迫下活力指数降低和根芽比上升的表现一致,可能通过抑制地上部细胞伸长减少蒸腾失水。迪特和皇冠主要依赖于提高POD和SOD活性来增强抗氧化能力,并且主要依靠脯氨酸作为渗透调节物质。这与王焱等^[50]对四季旺品种干旱胁迫的响应模式相似,其在水势为-0.3 MPa的PEG溶液中,SOD活性较高且上升速度快。然而,在水势为-0.9 MPa时,其相对发芽率、萌发指数和脯氨酸含量均较高,这表明抗氧化酶活性虽为关键保护机制,但需与渗透调节和形态适应协同作用,才能实现高效的干旱耐受。

3.4 抗旱性评价

对植物抗旱性的评价通常基于测定指标与抗旱性之间的关系,但单一指标易受环境因素干扰且无法全面反映其抗旱机制。在黑麦草^[51]和梯牧草(*Phleum pratense*)^[52]等牧草的抗旱性评价中,研究人员基于多个测定指标,采用主成分分析法结合隶属函数法有效地评价了材料间的抗旱性差异。这种综合评价法能够减少单一指标的偏差和抗旱性信息重叠的问题,被广泛应用于植物抗逆性评价中。如在紫花苜蓿抗逆性研究中,研究人员针对不同逆境开展了一系列研究。在低温胁迫下,对10个紫花苜蓿品种的12项指标经主成分分析,筛选出渗透调节物质和抗氧化酶活性等核心参数,再利用隶属函数法构建耐寒性模型,结果表明品种龙牧801具有高耐寒性,半致死温度验证进一步支持了评价结果的可靠性^[53]。盐胁迫环境下,通过隶属函数法综合生长速率、生物量、膜透性等指标发现,中苜一号品种表现出最优的耐盐性^[54]。干旱胁迫下,结合20个紫花苜蓿品种干草产量、叶片相对持水率、膜相对完整性等指标,经聚类分析划分为5个抗旱等级,其中Prime等品种为强抗旱类^[55]。在萌发期通过PEG模拟干旱胁迫,利用隶属函数法对14个紫花苜蓿品种的发芽率、根芽比等指标综合赋值,筛选出蕴能为抗旱性强的品种^[56]。

本研究中,不同紫花苜蓿品种抗旱机理不同,指标间响应干旱的规律并不一致,难以用单一指标科学评价品种间的抗旱性差异。因此,采用主成分分析法结合隶属函数法计算综合评价值(D),并结合系统聚类分析,成为本研究综合评价和排序7个紫花苜蓿品种抗旱性的有效方法。该方法通过指标降维与综合赋值,不仅精准揭示了不同品种在干旱胁迫下的响应差异,而且通过聚类分析实现了抗旱性的量化分级。综合评价分析结果表明,7个引进品种中,强抗旱品种为‘巨能801’,中抗旱品种为‘角斗士’、‘WL525’和‘维多利亚’,弱抗旱品种为‘PANGO’、‘迪特’和‘皇冠’。因此,在干旱频发的地区可以选择抗旱性较强的紫花苜蓿品种如巨能801,尽量避免选择抗旱性较弱的紫花苜蓿品种如皇冠进行种植。

4 结论

1)干旱胁迫显著抑制多数紫花苜蓿品种种子的萌发进程,且干旱对种子活力的抑制作用高于对发芽率的影响,严重削弱了幼苗建成的潜在活力。紫花苜蓿品种间对干旱胁迫的响应存在显著差异,巨能801、维多利亚和WL525活力指数较高,种子萌发期的抗旱潜力突出。

2)干旱胁迫显著影响紫花苜蓿幼苗生长与生理生化过程,且品种间响应存在显著差异。在生长特征上,皇冠和WL525通过增加根长获取水分,维多利亚将资源分配给地上部分,PANGO的地上生长则受干旱显著抑制。生理生化层面,干旱胁迫导致所有品种丙二醛含量上升,细胞膜受损,但各品种抗氧化防御机制存在特异性:多数品种通过激活POD、SOD等抗氧化酶及积累脯氨酸、可溶性糖等渗透调节物质应对干旱,角斗士则主要依赖脯氨酸积累调节渗透平衡。

3)本研究通过主成分分析法结合隶属函数法综合评价得出7个紫花苜蓿品种抗旱性由强到弱为:巨能801>角斗士>WL525>维多利亚>PANGO>迪特>皇冠;利用系统聚类分析划分出:1)强抗旱品种为‘巨能801’,2)中抗旱品种为‘角斗士’、‘WL525’和‘维多利亚’,3)弱抗旱品种为‘PANGO’、‘迪特’和‘皇冠’。

参考文献 References:

- [1] Mi J Z, Zhang L Y, Tian L, *et al.* Responses of seedling growth, yield of foxtail millet [*Setaria italic*(L.) Beauv.] and soil moisture to humic acid applications with different durations in dryland area. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(8): 2441—2449.
米俊珍, 张兰英, 田露, 等. 旱作区谷子苗期生长、产量与土壤水分对不同施用年限腐殖酸的响应. *生态学杂志*, 2021, 40(8): 2441—2449.
- [2] Kogan F, Adamenko T, Guo W. Global and regional drought dynamics in the climate warming era. *Remote Sensing Letters*, 2013, 4(4): 364—372.
- [3] Wu M, Liu X B, Ding L R, *et al.* Effects of silicon on germination and physiological characteristics of alfalfa under drought stress simulated by PEG. *Acta Agrestia Sinica*, 2017, 25(6): 1258—1264.
吴淼, 刘信宝, 丁立人, 等. PEG模拟干旱胁迫下硅对紫花苜蓿萌发及生理特性的影响. *草地学报*, 2017, 25(6): 1258—1264.
- [4] Zou C H, Xie X Y, Zhou Z F. Future prospects in utilization of photo-taking unmanned aerial vehicle in low altitude of RS system in plateau mountain area of Guizhou. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2011, 29(2): 24—28.
邹长慧, 谢晓尧, 周忠发. 无人机低空航拍遥感系统在贵州高原山区的应用前景探讨. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2011, 29(2): 24—28.
- [5] Zhang Z H. Exploring the way of controlling rocky desertification and developing ecological animal husbandry in Guizhou Province. *Pratacultural Science*, 2006, 23(8): 63—67.
张自和. 贵州治理石漠化发展生态畜牧业探索之路. *草业科学*, 2006, 23(8): 63—67.
- [6] Wu X P, Zhou Z F, Zhu M, *et al.* Spatiotemporal characteristics of drought in different geomorphic types in typical karst cluster areas. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(1): 336—347.
吴小飘, 周忠发, 朱孟, 等. 典型喀斯特聚集区不同地貌类型干旱时空特征. *水土保持研究*, 2023, 30(1): 336—347.
- [7] Li S M, Xie G D. Spatial and temporal heterogeneity of water conservation service for meadow ecosystem. *Chinese Journal of Grassland*, 2015, 37(2): 88—93.
李士美, 谢高地. 草甸生态系统水源涵养服务功能的时空异质性. *中国草地学报*, 2015, 37(2): 88—93.
- [8] Zhao Y, Wu M, Ye X X, *et al.* Growth and chlorophyll fluorescence kinetics parameters of *Alchornea trewioides* under drought and re-watering in karst areas. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, 43(9): 1537—1546.
赵英, 吴敏, 叶晓霞, 等. 干旱与复水对喀斯特地区红背山麻杆生长及叶绿素荧光动力学参数的影响. *西北植物学报*, 2023, 43(9): 1537—1546.
- [9] Liu S X, Wang H W, Qin F. Genetic dissection of drought resistance for trait improvement in crops. *The Crop Journal*, 2023, 11(4): 975—985.
- [10] Maiti R, Rajkumar D, Vidyasagar P. Screening of rice varieties for drought resistance at seedling stage. *Research on Crops*, 2012, 13(3): 790—794.
- [11] Cui W N, Meng J J, Zhang W X, *et al.* Effect of gibberellin on seed germination and seedling growth of five species of forage seeds. *Pratacultural Science*, 2024, 41(1): 89—98.
崔文宁, 孟静静, 张文香, 等. GA₃处理对盐胁迫下5种牧草种子萌发及幼苗生长的影响. *草业科学*, 2024, 41(1): 89—98.
- [12] Soufan W, Okla M K, Salamatullah A, *et al.* Seasonal variation in yield, nutritive value, and antioxidant capacity of leaves of alfalfa plants grown in arid climate of Saudi Arabia. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2021, 81(2): 182—190.
- [13] Liu Z, Lan J, Li W, *et al.* Reseeding improved soil and plant characteristics of degraded alfalfa (*Medicago sativa*) grassland in loess hilly plateau region, China. *Ecological Engineering*, 2023, 190(1): 106933.
- [14] Wang J, Liu X J, Hao F, *et al.* Study on nitrogen utilization characteristics of alfalfa with different nitrogen efficiency in different growth periods. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(11): 2461—2469.
王静, 刘晓静, 郝凤, 等. 不同氮效率紫花苜蓿各生育期氮利用特征研究. *草地学报*, 2021, 29(11): 2461—2469.
- [15] Chen Y C, Li X, Cai Y D, *et al.* Effects of dry-farming alfalfa on fungal communities in high altitude sandy areas of Xinjiang. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(5): 77—87.
陈永成, 李肖, 蔡宜东, 等. 旱作紫花苜蓿对新疆高海拔沙区真菌群落的影响. *中国草地学报*, 2023, 45(5): 77—87.
- [16] Tong C C, Liu X J, Lin F, *et al.* Yield effect of optimisation of photosynthetic characteristics of alfalfa through balanced fertilization. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(8): 70—80.
童长春, 刘晓静, 蔺芳, 等. 基于平衡施肥的紫花苜蓿光合特性及光合因子的产量效应研究. *草业学报*, 2020, 29(8):

70—80.

- [17] Zhang X L, Liu X J, Qi M X, *et al.* Alfalfa seeding root characteristics under complex saline-alkali stress. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(3): 340—346.
张晓磊, 刘晓静, 齐敏兴, 等. 混合盐碱对紫花苜蓿苗期根系特征的影响. *中国生态农业学报*, 2013, 21(3): 340—346.
- [18] Chen Y X, Ma Q L, Ma D M, *et al.* Evaluation of the drought resistance of 66 alfalfa clones at the seedling stage. *Pratacultural Science*, 2024, 41(4): 908—918.
陈云鑫, 马巧利, 麻冬梅, 等. 66个紫花苜蓿品种无性系苗期抗旱性评价. *草业科学*, 2024, 41(4): 908—918.
- [19] Xu H, He L, Song M Q, *et al.* Comprehensive evaluation of the production performance of eight alfalfa varieties in the arid area of Qaidam. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(2): 33—40.
徐航, 何霖, 宋美琪, 等. 8个紫花苜蓿品种在柴达木旱区的生产性能综合评价. *干旱地区农业研究*, 2024, 42(2): 33—40.
- [20] Ruan Q, Bai X M, Wang Y Z, *et al.* Regulation of endogenous hormone and miRNA in leaves of alfalfa (*Medicago sativa* L.) seedlings under drought stress by endogenous nitric oxide. *BMC Genomics*, 2024, 25(1): 2—19.
- [21] Xu M Z, Xu Z P, Liu Y R, *et al.* Transcriptome analysis reveals the vital role of aba plays in drought tolerance of the ABA-insensitive alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Agronomy*, 2024, 14(3): 406.
- [22] Han Z S, Zheng M N, Liang X Z, *et al.* Effects of drought stress on morphological and physiological characteristics of different alfalfa cultivars. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(3): 37—43.
韩志顺, 郑敏娜, 梁秀芝, 等. 干旱胁迫对不同紫花苜蓿品种形态特征和生理特性的影响. *中国草地学报*, 2020, 42(3): 37—43.
- [23] Yang Y, Liu Y C, Zhou M C, *et al.* Studies on the changes of seed contents in *Rosa spinosissima* under low temperature sand storage. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2023, 38(S1): 253—260.
杨宇, 刘雨晨, 周美春, 等. 低温沙藏下密刺蔷薇种子内含物变化研究. *华北农学报*, 2023, 38(S1): 253—260.
- [24] El Harfi M, Hanine H, Rizki H, *et al.* Effect of drought and salt stresses on germination and early seedling growth of different color-seeds of sesame (*Sesamum indicum*). *International Journal of Agriculture and Biology*, 2016, 18(6): 1088—1094.
- [25] Li W R, Zhang S Q, Shan L. Seeds germination characteristics and drought-tolerance of alfalfa and sorghum seedling under water stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 3066—3074.
李文晓, 张岁岐, 山仑. 水分胁迫下紫花苜蓿和高粱种子萌发特性及幼苗耐旱性. *生态学报*, 2009, 29(6): 3066—3074.
- [26] Shan X D, Zhang R, Maiwulidai K, *et al.* Effect of gibberellin soaking on seed germination of perennial ryegrass under polyethylene glycol simulated drought conditions. *Pratacultural Science*, 2019, 36(9): 2304—2311.
单旭东, 张睿, 麦吾丽代·卡哈尔, 等. 赤霉素浸种对PEG模拟干旱条件下多年生黑麦草种子萌发的影响. *草业科学*, 2019, 36(9): 2304—2311.
- [27] Gao Z H, Li X Y, Lan J, *et al.* Comparison and evaluation of seed germination indexes of different forage-type oat cultivars under PEG-6000 stress. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(5): 1210—1218.
高志昊, 李雪颖, 兰剑, 等. 干旱胁迫条件下不同饲用燕麦品种种子萌发指标比较与评价. *草地学报*, 2022, 30(5): 1210—1218.
- [28] Tian H, Zhang H S, Xiong J B, *et al.* Variability in drought resistance during seed germination among 34 *Pennisetum alopecuroides* gerplasm. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(4): 11—24.
田宏, 张鹤山, 熊军波, 等. 34份狼尾草萌发期抗旱性综合评价. *中国草地学报*, 2024, 46(4): 11—24.
- [29] Qu X H, Zhao L L, Wang P C, *et al.* Drought resistance of six *Paspalum wettsteinii* materials during germination period. *Seed*, 2017, 36(4): 24—27.
屈兴红, 赵丽丽, 王普昶, 等. 6个宽叶雀稗材料种子萌发期抗旱性研究. *种子*, 2017, 36(4): 24—27.
- [30] Cheng B, Hu S R, Gao Y, *et al.* Drought resistance of 5 alfalfa species at germination period under PEG simulated drought stress. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2019, 47(1): 53—59.
程波, 胡生荣, 高永, 等. PEG模拟干旱胁迫下5种紫花苜蓿萌发期抗旱性的评估. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(1): 53—59.
- [31] Fu B Z, Lan J, Li X W, *et al.* Effects of PEG-6000 drought stress on seed germination of 16 varieties of alfalfa. *Seed*, 2012, 31(4): 10—14.
伏兵哲, 兰剑, 李小伟, 等. PEG—6000干旱胁迫对16个苜蓿品种种子萌发的影响. *种子*, 2012, 31(4): 10—14.
- [32] Yuan Z H, Wang C T, Li S P, *et al.* Effects of different plant hormones or PEG seed soaking on maize resistance to drought stress. *Canadian Journal of Plant Science*, 2014, 94(8): 1491—1499.

- [33] Xu X, He B, Tan C Y, *et al.* Observation on seed germination microstructure of wild *Glycine max* in Guizhou under drought stress. *Seed*, 2025, 44(1): 170–177.
徐熙, 何兵, 谭春燕, 等. 干旱胁迫下贵州野生大豆种子萌发微结构观察. *种子*, 2025, 44(1): 170–177.
- [34] Meng Q L, Guan Z B, Feng B L, *et al.* Principal component analysis and fuzzy clustering on drought-tolerance related traits of foxtail millet (*Setaria italica*). *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(8): 2667–2675.
孟庆立, 关周博, 冯佰利, 等. 谷子抗旱相关性状的主成分与模糊聚类分析. *中国农业科学*, 2009, 42(8): 2667–2675.
- [35] Wu Y H, Liu W H, Liu K Q, *et al.* Effects of drought stress on leaf senescence and the active oxygen scavenging system of oat seedlings. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(10): 75–86.
吴雨涵, 刘文辉, 刘凯强, 等. 干旱胁迫对燕麦幼苗叶片光合特性及活性氧清除系统的影响. *草业学报*, 2022, 31(10): 75–86.
- [36] Geravandi M, Farshadfar E, Kahrizi D. Evaluation of some physiological traits as indicators of drought tolerance in bread wheat genotypes. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2011, 58(1): 69–75.
- [37] Hou R H, Du K, Huang W Y, *et al.* Evaluation on drought resistance of 10 wild *Medicago ruthenica* L. materials from different provenances at germination period. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(2): 489–494.
侯瑞虹, 杜柯, 黄伟业, 等. 10份不同种源野生花苜蓿材料种子萌发期抗旱性评价. *草地学报*, 2024, 32(2): 489–494.
- [38] Zhou J Y, Zhao W W, Yang Y, *et al.* Comprehensive evaluation of drought resistance of two different *Pennisetum* species during seed germination and seedling growth stages. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(8): 50–59.
周洁仪, 赵文武, 杨杨, 等. 2种狼尾草属牧草萌发期和苗期抗旱性综合评价. *中国草地学报*, 2023, 45(8): 50–59.
- [39] Wang J Y, Xu W N, Su Y, *et al.* Characterization and comparison of drought resistance of five alfalfa varieties during germination period under PEG-6000 simulated drought stress. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2023, 44(2): 81–91.
王江银, 徐婉宁, 苏洋, 等. PEG-6000模拟干旱胁迫下5份苜蓿材料萌发期抗旱性鉴定与比较. *畜牧与饲料科学*, 2023, 44(2): 81–91.
- [40] Duan P C, Wang Y T, Yang D Y, *et al.* Improvement of degraded soil on tunnel construction waste slag dumps and its microbial community effect. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2025, 15(2): 651–662.
段鹏昌, 王奕婷, 杨东阳, 等. 隧洞施工弃渣场退化土壤的改良及其微生物群落效应. *环境工程技术学报*, 2025, 15(2): 651–662.
- [41] Zhang M, Ye L, Li S P, *et al.* Effects of drought stress on the growth biomass and C, N, and P stoichiometric characteristics of *Fraxinus malacophylla* seedlings. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2024, 42(2): 397–404.
张梅, 叶澜, 李树萍, 等. 干旱胁迫对白枪杆幼苗生长生物量及C、N、P化学计量特征的影响. *四川农业大学学报*, 2024, 42(2): 397–404.
- [42] Chaves M M, Oliveira M M. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(407): 2365–2384.
- [43] He A Y, Dean J M, Lodhi I J. Peroxisomes as cellular adaptors to metabolic and environmental stress. *Trends in Cell Biology*, 2021, 31(8): 656–670.
- [44] Shao Y J, Shan L. Advances in the studies on drought tolerance mechanism of plants. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(4): 16–20.
邵艳军, 山仑. 植物耐旱机制研究进展. *中国生态农业学报*, 2006, 14(4): 16–20.
- [45] Han D L, Wang Y R. Adaptability of *Medicago sativa* under water stress. *Acta Prataculturae Sinica*, 2005, 14(6): 7–13.
韩德梁, 王彦荣. 紫花苜蓿对于干旱胁迫适应性的研究进展. *草业学报*, 2005, 14(6): 7–13.
- [46] Shi X Y, Wang Y X, Jiang X, *et al.* Effects of nitric oxide on photosynthesis and physiological characteristics of apple rootstocks under water stress. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(4): 249–254.
石晓昀, 王延秀, 姜霄, 等. 一氧化氮对水分胁迫下苹果砧木新疆野苹果光合与生理特性的影响. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(4): 249–254.
- [47] Zhou L Y, Liu S H, Qin H M, *et al.* A study on relationship between leaf epicuticular wax coverage and drought resistance of five alfalfa varieties. *Pratacultural Science*, 2013, 30(4): 596–601.
周玲艳, 刘胜洪, 秦华明, 等. 5个苜蓿品种叶片表面蜡质覆盖与抗旱性的关系. *草业科学*, 2013, 30(4): 596–601.
- [48] Liao Y, Peng Y G, Chen G Z. Research advances in plant salt-tolerance mechanism. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 2077–2089.
廖岩, 彭友贵, 陈桂珠. 植物耐盐性机理研究进展. *生态学报*, 2007, 27(5): 2077–2089.

- [49] Hao J F, Zhang Y X, Zhu A M, *et al.* Evaluation of drought resistance of 15 alfalfa species at germination period under PEG-6000 simulated drought stress. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2020, 589(1): 90–95.
郝俊峰, 张玉霞, 朱爱民, 等. PEG-6000 干旱胁迫下 15 个苜蓿品种种子萌发抗旱性评价. *黑龙江畜牧兽医*, 2020, 589(1): 90–95.
- [50] Wang Y, Cai W, Lan J, *et al.* Comprehensive evaluation of drought resistance of twelve alfalfa varieties. *Grassland and Turf*, 2018, 38(2): 80–88.
王焱, 蔡伟, 兰剑, 等. 12 个苜蓿品种抗旱性综合评价. *草原与草坪*, 2018, 38(2): 80–88.
- [51] Shi Y H, Wan L Q, Liu J N, *et al.* Analysis of the principal components and the subordinate function of *Lolium perenne* drought resistance. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(5): 669–672.
石永红, 万里强, 刘建宁, 等. 多年生黑麦草抗旱性主成分及隶属函数分析. *草地学报*, 2010, 18(5): 669–672.
- [52] Tan J Q, Zhang X H, Li S Y, *et al.* Comprehensive evaluation of drought resistance of 7 *Phleum pratense* forage germplasm materials during seed germination. *Grassland and Turf*, 2024, 44(2): 226–236.
檀嘉琦, 张鲜花, 李思媛, 等. 7 份梯牧草种质材料的种子萌发期抗旱性综合评价. *草原与草坪*, 2024, 44(2): 226–236.
- [53] Wang M, Li L, Jia R, *et al.* Evaluation of physiological characteristics and cold resistance of 10 alfalfa varieties under low temperature stress. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(6): 76–88.
王敏, 李莉, 贾蓉, 等. 10 种紫花苜蓿在低温胁迫下的生理特性及耐寒性评价. *草业学报*, 2024, 33(6): 76–88.
- [54] Xiong X, Gui W Y, Liu M H, *et al.* Evaluation of salt tolerance in different alfalfa varieties under uniform and non-uniform salt stress. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(9): 67–76.
熊雪, 桂维阳, 刘沫含, 等. 不同紫花苜蓿品种在均匀与不均匀盐胁迫下的耐盐性评价. *草业学报*, 2018, 27(9): 67–76.
- [55] Yu L, Wang Y R, Garnett T, *et al.* A study on physiological responses of varieties of *Medicago sativa* and their relationship with the drought resistance capacity under drought stress. *Acta Prataculturae Sinica*, 2006, 15(3): 75–85.
余玲, 王彦荣, Garnett T, 等. 紫花苜蓿不同品种对干旱胁迫的生理响应. *草业学报*, 2006, 15(3): 75–85.
- [56] Yang X Q, Ren W B, Bai Z A, *et al.* Drought resistance evaluation of 14 alfalfa varieties during seed germination. *Grassland and Turf*, 2025, 45(1): 205–211.
杨学清, 任卫波, 白卓安, 等. 14 份紫花苜蓿种子萌发期抗旱性评价. *草原与草坪*, 2025, 45(1): 205–211.