

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.02.020

引用格式:谢鸿宇,任秋羽,何清云,等.20份黄花苜蓿种质资源苗期抗旱性综合评价研究[J].草地学报,2026,34(2):581-591

XIE Hong-yu, REN Qiu-yu, HE Qing-yun, et al. Comprehensive Evaluation of Seedling Drought Tolerance of 20 *Medicago falcata* Germplasm Resources[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(2):581-591

20份黄花苜蓿种质资源苗期抗旱性综合评价研究

谢鸿宇,任秋羽,何清云,刘纯,王琳,李倩*

(新疆农业大学草业学院,新疆乌鲁木齐830052)

摘要:为筛选出具有较强耐旱性能的黄花苜蓿(*Medicago falcata* L.)种质资源,本研究选用20份黄花苜蓿为研究对象,通过分析幼苗的形态和生理指标的含量变化,采用隶属函数法和聚类分析综合评价了20份黄花苜蓿的抗旱性。结果表明:在不同干旱胁迫处理下,20份黄花苜蓿种质均表现出不同的抗旱响应,表现为株高、叶面积、存活率、地上生物量和叶绿素荧光参数均呈下降趋势,聚类分析将20份黄花苜蓿幼苗的抗旱性分为7类,其中材料A2Z311抗旱性极强、材料A2Z525抗旱性极弱。基于隶属函数D值,其抗旱能力由强到弱排列为A2Z311>A2Z588>A2Z355>A2Z600>A2Z317>A2Z480>A2Z423>A2Z534>A2Z528>A2Z316>A2Z350>A2Z436>A2Z302>A2Z491>A2Z351>A2Z594>A2Z599>A2Z622>A2Z353>A2Z525。本研究表明,材料A2Z311能更好地适应干旱胁迫,存活率、叶面积及叶绿素荧光参数的隶属函数值均为1,表现出更强的抗旱性,这为干旱地区苜蓿品种的选育提供理论依据。

关键词:干旱胁迫;黄花苜蓿;抗旱性

中图分类号:S541.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)02-0581-11

Comprehensive Evaluation of Seedling Drought Tolerance of 20 *Medicago falcata* Germplasm Resources

XIE Hong-yu, REN Qiu-yu, HE Qing-yun, LIU Chun, WANG Lin, LI Qian*

(College of Grassland Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: In order to screen out the germplasm resources of *Medicago falcata* L. with strong drought tolerance, 20 resources of *M. falcata* were selected in this study, and their drought tolerance was comprehensively evaluated by analyzing the changes in the content of morphological and physiological indexes of the seedlings, and by adopting the affiliation function method and cluster analysis. The results showed that under different drought stress treatments, all the 20 *M. falcata* germplasm resources showed different drought responses, as indicated by a downward trend in plant height, leaf area, survival rate, above ground biomass and chlorophyll fluorescence parameters. The drought resistance of the 20 *M. falcata* seedlings was classified into 7 categories by cluster analysis, among which, the material A2Z311 had extremely drought-resistant, and the material A2Z525 had the weakest drought-resistant. Based on the D value of the affiliation function, the drought resistance was ranked from strong to weak as A2Z311>A2Z588>A2Z355>A2Z600>A2Z317>A2Z480>A2Z423>A2Z534>A2Z528>A2Z316>A2Z350>A2Z436>A2Z302>A2Z491>A2Z351>A2Z594>A2Z599>A2Z622>A2Z353>A2Z525. The present study indicates that the material A2Z311 could better adapt to the treatment of drought stress, and the survival rate, leaf area and chlorophyll fluorescence parameters all being 1, showing stronger drought resistance, which provides a theoretical basis for the selection and breeding of alfalfa varieties in arid areas.

收稿日期:2025-03-25;修回日期:2025-05-06

基金项目:新疆维吾尔自治区重点研发项目(2023B02031);新疆维吾尔自治区牧草及草坪草种质资源圃建设项目资助

作者简介:谢鸿宇(2005-),女,汉族,四川绵阳人,本科生,主要从事牧草遗传育种研究,E-mail:2872291438@qq.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail:540794898@qq.com

Key words: Drought stress; *Medicago falcata*; Drought resistance

干旱胁迫会抑制植物生长,影响植株光合作用和蒸腾作用等生命活动,植物在短期缺水或长期干旱的情况下,往往会受到严重不可逆的伤害,这种伤害不仅有形态结构的改变,而且影响植物的生理结构和功能^[1]。新疆作为我国野生黄花苜蓿(*Medicago falcata* L.)的起源地,拥有丰富的种质资源^[2],然而该地区干旱少雨,年降水量仅约 160 mm^[3-4],严重制约植物生长。因此,结合乡土草种资源与气候特点开展耐旱种质筛选,对发掘抗逆基因、培育抗旱新品种具有重要意义。

黄花苜蓿是豆科苜蓿属多年生草本植物,富含蛋白质、维生素和多种矿物质,其营养价值为各类牧草之首,优质干草的粗蛋白可达 20% 以上,还含有微量元素以及其他活性物质等^[5]。黄花苜蓿是豆科牧草抗逆育种中重要的种质资源和紫花苜蓿品种改良的重要基因库。黄花苜蓿目前主要分布于西北、华北及东北等地区,这些地区降水稀少,气候干燥,对我国苜蓿产业有极大的影响^[6]。黄花苜蓿作为豆科牧草抗逆育种的重要种质资源,具有耐旱性强、生态功能优良等特点。陈敏^[7]

表明直立型黄花苜蓿在干旱条件下主根长度和根冠比显著增加,根系向深层土壤延伸的能力更强,具有更好的抗旱性。朱新强等^[8]在对黄花苜蓿模拟干旱处理中发现,黄花苜蓿通过增强抗氧化系统和渗透调节能力可以抵御干旱伤害,有一定的抗旱能力。

近年来,尽管已经有相关研究报道黄花苜蓿的抗旱性^[9-10],但不同种质对于干旱胁迫萌发响应的差异与综合评价还不够全面。本研究旨在通过系统评估 20 份黄花苜蓿种质资源在干旱条件下的形态及生理表现,鉴定出有较强耐旱性的种质,为干旱地区苜蓿品种的选育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试黄花苜蓿材料共 20 份,均由新疆农业大学草业学院草种质资源研究与育种团队提供,此 20 份黄花苜蓿材料均为野外收集所得,并于低温环境中保存备用。材料详细信息如表 1 所列。

表 1 黄花苜蓿材料采集信息

Table 1 *Medicago falcata* resources and collection information

材料编号 Material number	收集地 Place of collection	经度 Longitude	纬度 Latitude	生境 Habitat
A2Z350	巴里坤县	92°19'E	43°36'N	沟边草地 River bank grass
A2Z480	巴里坤县	92°30'E	43°59'N	沟边草地 River bank grass
A2Z423	巴里坤县	92°22'E	43°47'N	沟边草地 River bank grass
A2Z528	巴里坤县	91°42'E	43°76'N	沟边草地 River bank grass
A2Z353	巴里坤县	92°34'E	43°92'N	沟边草地 River bank grass
A2Z622	阿格喜沃巴村	93°36'E	43°74'N	山坡草地 Hillside meadows
A2Z525	阿格喜沃巴村	93°16'E	43°93'N	山坡草地 Hillside meadows
A2Z594	阿格喜沃巴村	93°45'E	44°09'N	山坡草地 Hillside meadows
A2Z436	阿格喜沃巴村	93°26'E	43°44'N	山坡草地 Hillside meadows
A2Z316	阿格喜沃巴村	92°67'E	43°37'N	山坡草地 Hillside meadows
A2Z351	伊吾县	93°77'E	42°67'N	山前平原 Piedmont plain
A2Z436	伊吾县	93°84'E	43°28'N	山前平原 Piedmont plain
A2Z316	伊吾县	93°61'E	42°89'N	山前平原 Piedmont plain
A2Z311	伊吾县	94°36'E	43°29'N	山前平原 Piedmont plain
A2Z588	伊吾县	94°24'E	43°17'N	山前平原 Piedmont plain
A2Z355	奇台县	89°51'E	43°73'N	山前平原 Piedmont plain
A2Z317	奇台县	89°74'E	43°69'N	山前平原 Piedmont plain
A2Z600	奇台县	89°39'E	43°54'N	山前平原 Piedmont plain
A2Z534	奇台县	90°02'E	43°82'N	山前平原 Piedmont plain
A2Z351	奇台县	89°81'E	43°71'N	山前平原 Piedmont plain
A2Z599	玛纳斯县	86°13'E	43°49'N	山前平原 Piedmont plain
A2Z302	玛纳斯县	85°78'E	44°22'N	山前平原 Piedmont plain
A2Z491	玛纳斯县	85°61'E	44°15'N	山前平原 Piedmont plain

1.2 试验设计

本试验于人工气候室进行,采用室内盆栽苗期抗旱评价法,选用塑料花盆(花盆的高度为21 cm,底部直径为14 cm,口径为18 cm)进行种植,花盆中填充0.45 kg的营养土,并在每个盆中播种10粒种子,一共设置240个花盆。在出苗期,按照花土的最大持水能力的70%(即土壤相对含水量为70%)进行定期浇水,以确保种子正常发芽。苗期齐苗后进行间苗,每盆保留5株生长均匀的健壮幼苗。当幼苗发展至3~4片真叶或开始分枝时(约20天后),对所有盆栽进行充足灌水后,过12 h剪掉地上部分留茬高度3 cm,以此来模拟自然环境中植物在遭受干旱时的生长状态,随后开始干旱胁迫处理。

试验设置三种处理条件:对照组(CK),维持正常的浇水量[土壤相对含水量为(65%±5%)],轻度干旱胁迫处理[土壤相对含水量为(45%±5%)],以及重度干旱胁迫处理[土壤相对含水量为(25%±5%)]^[11-13]。每种处理设置四次重复。为了维持不同处理的土壤含水量,在每周四及周日对每个花盆里的植物进行称重和补水,确保土壤含水量各自维持在平衡的水平上。干旱胁迫持续时间均为60天。在此期间,每周日对植株的生长形态和生理指标进行测量和记录。

1.3 试验指标以及试验方法

1.3.1 形态指标测定 株高,采用尺子测量从植株茎基部至植株顶部的高度。分枝数,采用逐一计数的方法,记录植株分枝总数。地上生物量,收集每株的地上部分,并立即称重。存活率,干旱胁迫第六周后记录每盆植株的存活株数并进行计算,计算公式为(干旱处理后存活苗数/原幼苗总数)×100%。叶面积,每一个花盆取6~8叶片,采用扫描仪测量,取平均值。茎粗,使用游标卡尺测量茎基部。

1.3.2 生理指标测定 叶绿素荧光参数(F_v/F_m),采用手持式叶绿素荧光仪测量,包括最大荧光值(F_m)和可变荧光值(F_v),每个处理均重复10次。

1.4 数据统计分析

使用主成分分析方法进行抗逆性评价指标筛选,使用模糊隶属函数法进行黄花苜蓿抗旱性综合评价^[3]。为减少各个种质之间在指标性状上的固有性差异,试验中的所有指标均使用胁迫指数来进行分析。

胁迫指数:处理组测量值/对照组测量值。

正向隶属函数计算公式:

$$R(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

$R(X_i)$ 代表着不同指标的隶属度值, X_i 代表每项指标的具体实测值。 $X_{\min}$ 和 $X_{\max}$ 是参与试验的所有种质中,各个指标表现出的最低值和最高值。

标准差系数:

$$V_j = \sqrt{\sum (X_{ij} - X_j)^2 / X_j} \quad (2)$$

X_j 表示在第 j 个评价指标上所有种质的平均值, X_{ij} 是指在第 j 个评价指标上第 i 个具体种质的隶属度数值。

权重系数:

$$W_j = V_j / \sum V_j \quad (3)$$

V_j 用于表示第 j 个指标的标准差系数, W_j 是对应于第 j 个指标的权重系数。

综合评价 D 值:

$$D = \sum [R(X_i) \times W_j] \quad (4)$$

在这种综合评估模式中, D 值的数值越大,表明该黄花苜蓿抗旱性越强。

聚类分析: (5)

采用SPSS 27.0软件对紫花苜蓿株高、叶面积、茎粗、分枝数、存活率、地上生物量和叶绿素荧光参数等指标作综合聚类分析,最后借助GraphPad Prism 9.5.1软件完成图形绘制工作。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对苜蓿形态指标的影响

2.1.1 不同干旱胁迫下黄花苜蓿幼苗株高的变化 由图1可知,随着干旱胁迫强度的增加,供试10份黄花苜蓿的株高呈下降趋势,6份黄花苜蓿的株高呈先上升后降低趋势,4份黄花苜蓿的株高呈上升趋势。轻度干旱处理下,A2Z594,A2Z491,A2Z423,A2Z353,A2Z622和A2Z525这6份材料均与对照相比有显著性降低($P < 0.05$);重度干旱处理下,A2Z311,A2Z317,A2Z599,A2Z528,A2Z594,A2Z491,A2Z316,A2Z350,A2Z600,A2Z353和A2Z525这11份材料均与对照相比有显著性降低($P < 0.05$);其他材料之间无显著变化。且重度干旱与对照组相比,A2Z588材料增幅最大达到71.66%,A2Z534增幅最小仅9.56%;A2Z528降幅最大为81.16%,同时A2Z599降幅为68.85%,A2Z353降幅为41.16%,降幅最小为9.56%是A2Z355材料。

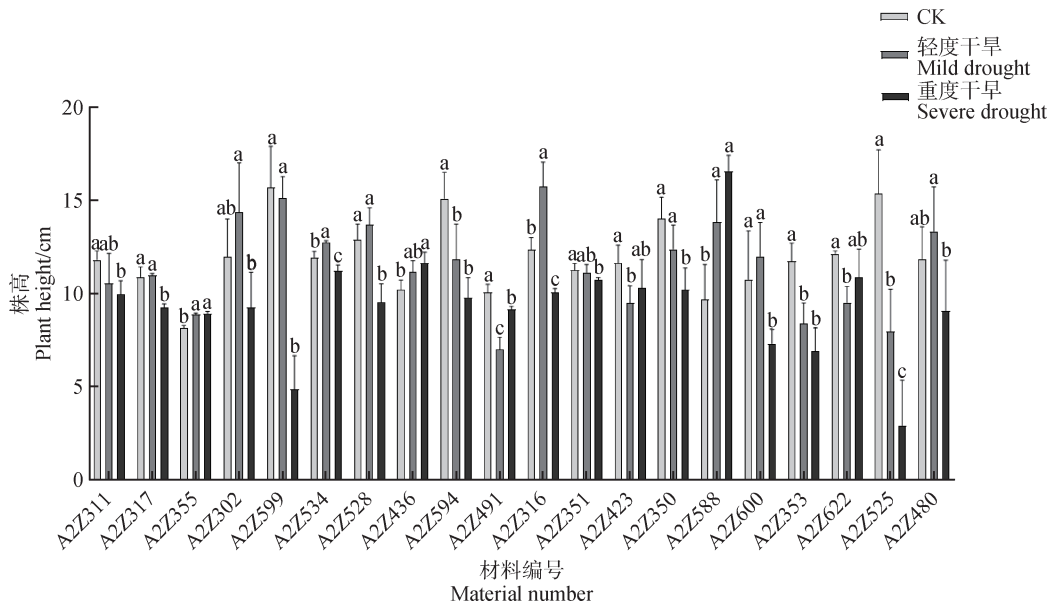


图 1 同种黄花苜蓿幼苗材料在不同干旱胁迫程度下的株高

Fig. 1 Plant height of the same resources *Medicago falcata* seedling material under different drought stress levels

注:不同小写字母表示相同干旱处理下不同黄花苜蓿材料间差异显著($P < 0.05$)。下同

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among alfalfa materials under the same drought treatment ($P < 0.05$). The same applies below

2.1.2 不同干旱胁迫下黄花苜蓿幼苗叶面积的变化
由图 2 可知,随着干旱胁迫强度的增加,供试 15 份黄花苜蓿的叶面积呈下降趋势,5 份黄花苜蓿的叶面积呈先上升后降低趋势。轻度干旱处理下, A2Z317, A2Z302, A2Z599, A2Z528, A2Z436, A2Z594, A2Z491, A2Z351, A2Z588, A2Z353, A2Z622 和 A2Z525 这 12 份材料均与对照相比有显著性降低 ($P < 0.05$); 重度干旱处理下,

A2Z317, A2Z355, A2Z302, A2Z599, A2Z528, A2Z436, A2Z594, A2Z491, A2Z316, A2Z351, A2Z423, A2Z350, A2Z588, A2Z600, A2Z353, A2Z622, A2Z525 和 A2Z480 均与对照相比有显著性降低 ($P < 0.05$); 其他材料无显著性变化。且重度干旱与对照组相比 A2Z353 下降幅度最大为 85.25%, 仅 A2Z311 材料为增幅, 上升 4.15%。

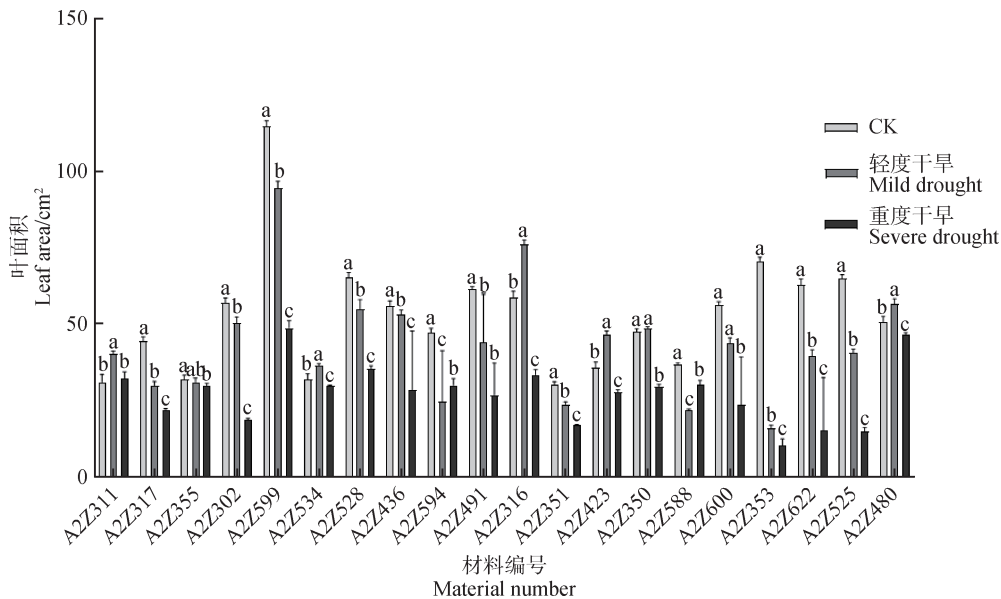


图 2 同种黄花苜蓿幼苗材料在不同干旱胁迫程度下的叶面积

Fig. 2 Leaf area of the same resources *Medicago falcata* seedling material under different drought stress levels

2.1.3 不同干旱胁迫下黄花苜蓿幼苗茎粗的变化
茎粗是评估植物生长状态的重要指标之一。由图3可知,随着干旱胁迫强度的增加供试9份黄花苜蓿的茎粗呈上升趋势;5份黄花苜蓿的茎粗呈先上升后降低趋势;6份黄花苜蓿的茎粗呈下降趋势。轻度干旱处理下,A2Z317,A2Z594,A2Z350,A2Z600

与对照相比有显著性降低($P<0.05$);重度干旱处理下,A2Z317,A2Z316,A2Z351,A2Z350,A2Z600份材料均与对照相比有显著性降低($P<0.05$);其他材料无显著性变化。且重度干旱与对照组相比,A2Z534材料增幅最大为92.5%,A2Z317降幅最大为22.83%。

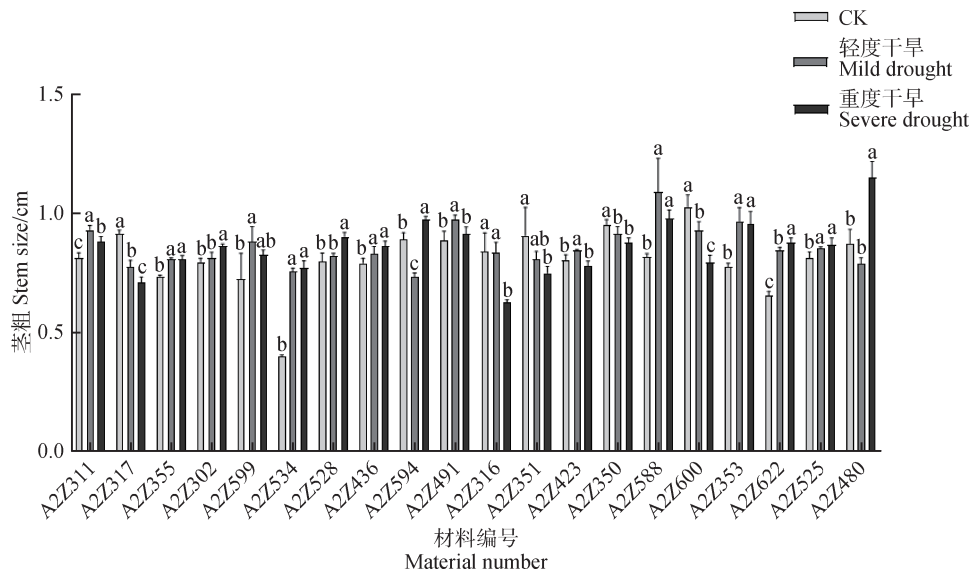


图3 同种黄花苜蓿幼苗材料在不同干旱胁迫程度下的茎粗

Fig. 3 Stem size of the same resources *Medicago falcata* seedling material under different drought stress levels

2.1.4 不同干旱胁迫下黄花苜蓿幼苗分枝数的变化
分枝数是表征苜蓿根系发育的形态学指标分枝数与主根直径、侧根重量存在极显著正相关^[14]。由图4可知,随着干旱胁迫强度的增加,供试8份黄花苜蓿的分枝数呈下降趋势,8份黄花苜蓿的分指数呈先上升后降低趋势,4份黄花苜蓿的分指数呈上升趋势。轻度干旱处理下,A2Z311,A2Z599,A2Z436,A2Z594,

A2Z588和A2Z480无显著性变化;重度干旱处理下,A2Z311,A2Z302,A2Z599,A2Z436,A2Z594,A2Z316,A2Z423,A2Z353,A2Z622和A2Z525均与对照相比有显著性降低($P<0.05$);其他材料无显著性变化。且重度干旱与对照组相比,A2Z525材料分枝数降幅最大为56.49%,A2Z534材料仅降低0.76%;A2Z480材料增幅最大为33.73%。

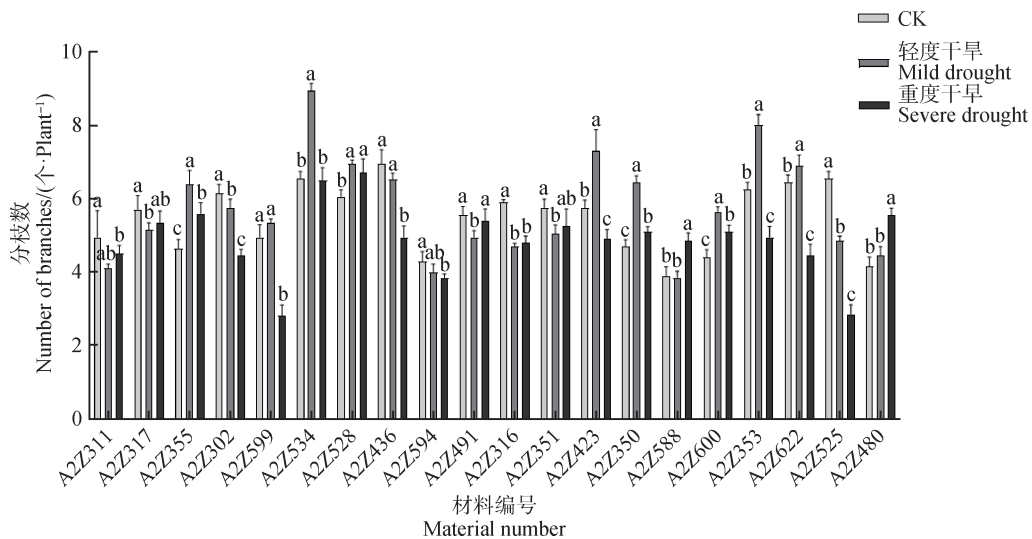


图4 同种黄花苜蓿幼苗材料在不同干旱胁迫程度下的分枝数

Fig. 4 Branch number of the same resources *Medicago falcata* seedling material under different drought stress levels

在图4中还可以看出A2Z355,A2Z534,A2Z528,A2Z423,A2Z350,A2Z600,A2Z353,A2Z622这8份材料在轻度干旱下的分枝数增多。这可能是在干旱条件下,植物通过增加分枝数来增加叶片表面积,这样可以更有效地吸收土壤中的水分和空气中的二氧化碳,同时增加光合作用的面积,提高光能利用率。这种分枝策略有助于植物在干旱环境中生存和繁衍。

2.1.5 不同干旱胁迫下黄花苜蓿幼苗存活率的变化 生存率乃指某生物种群内的每一个体经过一定时限以后生存的几率。在不同干旱胁迫下处理60 d,发现20份材料表现出不同程度的枯萎现象。在重度干旱胁迫下,A2Z302,A2Z599,A2Z480,A2Z525和A2Z622等材料出现严重枯黄,甚至死亡。而A2Z316,A2Z423,A2Z528和A2Z436材料在轻度干旱胁迫下整体长势良好,在重度干旱胁迫下仍能保

持少量绿叶。

由图5可知,随着干旱胁迫强度的增加,供试12份黄花苜蓿的存活率呈下降趋势,7份黄花苜蓿的存活率呈先上升后降低趋势,1份黄花苜蓿的存活率呈上升趋势。轻度干旱处理下,A2Z302,A2Z599,A2Z528,A2Z436,A2Z316,A2Z423,A2Z588,A2Z353,A2Z525无显著性变化;重度干旱处理下,A2Z317,A2Z355,A2Z302,A2Z599,A2Z534,A2Z436,A2Z594,A2Z351,A2Z423,A2Z350,A2Z588,A2Z600,A2Z353,A2Z622,A2Z525,A2Z480材料均与对照相比有显著性降低($P<0.05$);其他材料无显著性变化。且重度干旱与对照组相比,A2Z311材料增幅最大为88.89%,A2Z622材料降幅最大为64.29%。

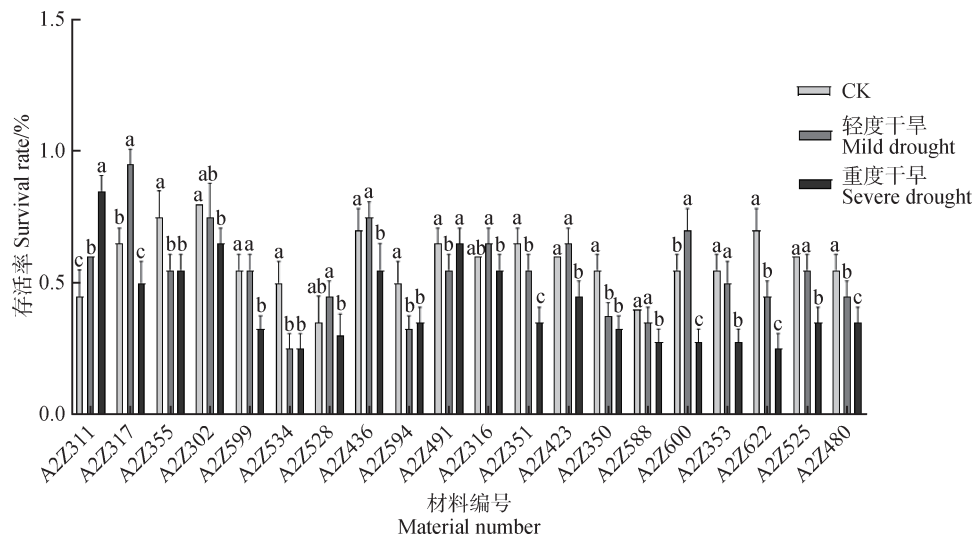


图5 同种黄花苜蓿幼苗材料在不同干旱胁迫程度下的存活率

Fig. 5 Survival rate of of the same resources *Medicago falcata* seedling material under different drought stress levels

2.1.6 不同干旱胁迫下黄花苜蓿幼苗地上生物量的变化 由图6可知,随着干旱胁迫强度的增加,供试15份黄花苜蓿的相对地上生物量呈下降趋势,5份黄花苜蓿的地上生物量呈先上升后降低趋势。轻度干旱处理下,材料A2Z317,A2Z302,A2Z528,A2Z436,A2Z594,A2Z491,A2Z316,A2Z351,A2Z350,A2Z353,A2Z622,A2Z525和A2Z480这13份材料与对照组相比有显著性降低($P<0.05$),其他材料无显著性变化;重度干旱处理下,这20份材料均与对照相比有显著性降低($P<0.05$)。且重度干旱与对照组相比,A2Z599材料降幅最大为77.78%,20份材料中均无增幅。

2.2 干旱胁迫对苜蓿生理指标的影响

2.2.1 不同干旱胁迫下黄花苜蓿幼苗 F_v/F_m 的变化 叶绿素荧光参数是一组用于描述植物光合作用机理和光合生理状况的变量或常数值。由图7可知,随着干旱胁迫强度的增加,供试15份黄花苜蓿的 F_v/F_m 呈下降趋势,1份黄花苜蓿的 F_v/F_m 呈先上升后降低趋势,2份黄花苜蓿的 F_v/F_m 呈上升趋势,2份黄花苜蓿的 F_v/F_m 呈先降低后上升的趋势。轻度干旱处理下,A2Z534,A2Z491,A2Z600,A2Z622这4份材料无显著性变化;重度干旱处理下,A2Z355,A2Z302,A2Z599,A2Z534,A2Z528,A2Z436,A2Z594,A2Z491,A2Z316,A2Z423,A2Z350,A2Z588,A2Z353,A2Z622,A2Z525和A2Z480这16份材料均与对照

相比有显著性降低($P<0.05$);其他材料无显著性变化。且重度干旱与对照组相比,A2Z317材料无增减

幅度;A2Z311材料增幅最大为80%,降幅最大的是材料A2Z525,降幅为42.25%。

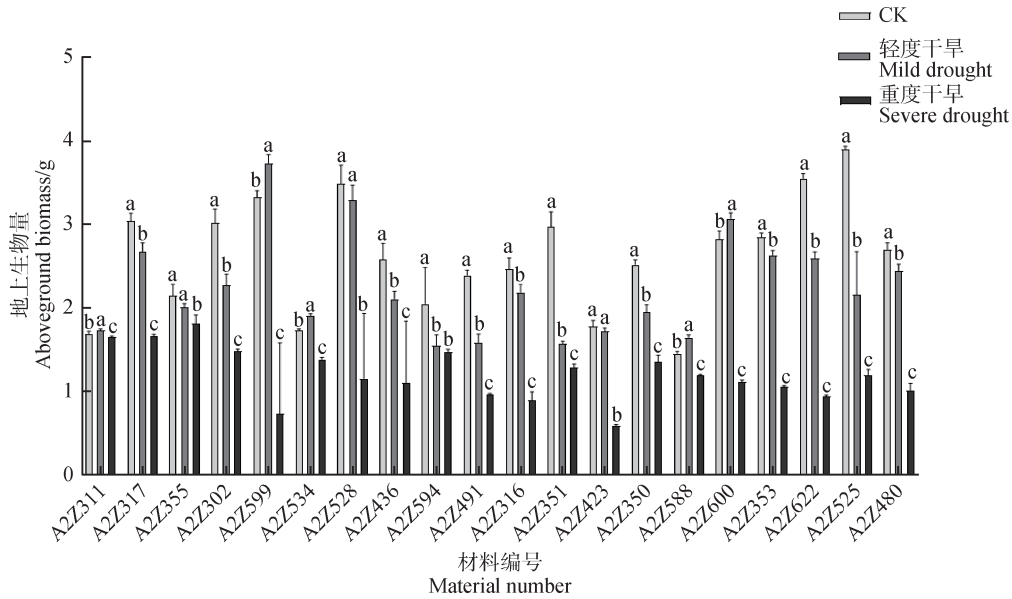


图6 同种黄花苜蓿幼苗材料在不同干旱胁迫程度下的地上生物量

Fig. 6 Above-ground biomass of the same resources *Medicago falcata* seedling material under different drought stress levels

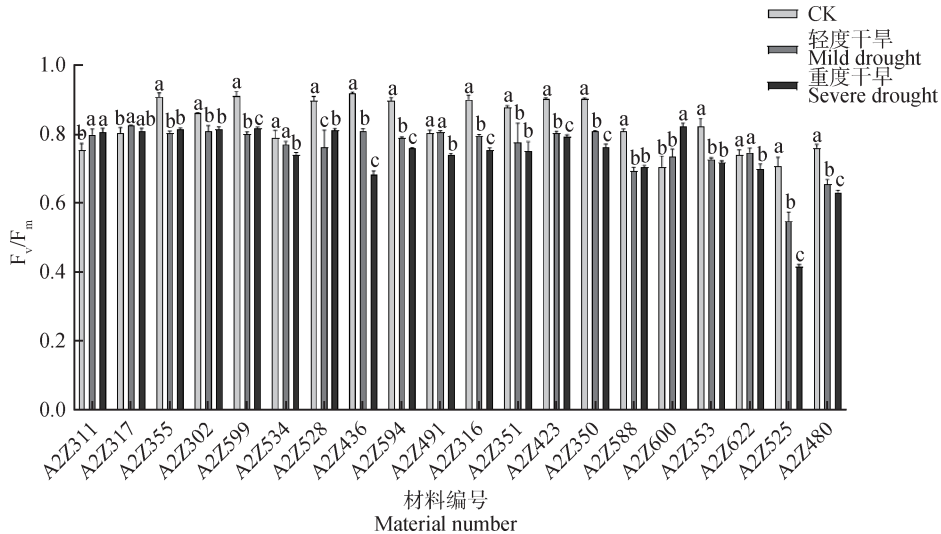


图7 同种黄花苜蓿幼苗材料在不同干旱胁迫程度下的 F_v/F_m

Fig. 7 F_v/F_m of *Medicago falcata* seedlings under different drought stress levels

2.3 黄花苜蓿种质的综合评价

本研究对20份苜蓿材料进行抗旱性评价的结果见表2。表中的综合评价指数是通过分别计算该指标在各处理下的隶属函数值,然后结合相应的权重进行加权求和,得到一个综合的D值,代表各材料的抗旱性。其中,材料A2Z311的D值最大,表明该材料抗旱性最强;材料A2Z525的D值最小,抗旱性最差。

2.4 聚类分析

通过聚类分析(图8)可将20份黄花苜蓿幼苗的

抗旱性分为7类(表3)。Ⅰ类为抗旱性极强的材料,有A2Z311;Ⅱ类为抗旱性较强的材料,有A2Z588和A2Z353;Ⅲ类为抗旱性强的材料,有A2Z317和A2Z600;Ⅳ类为抗旱性中的材料,有A2Z534;Ⅴ类为抗旱性较弱的材料,有A2Z594, A2Z599, A2Z302, A2Z491, A2Z351, A2Z436, A2Z316, A2Z350, A2Z480, A2Z423和A2Z528;Ⅵ类为抗旱性弱的材料,有A2Z353和A2Z622;Ⅶ类为抗旱性极弱的材料,有A2Z525。

表 2 20 份黄花苜蓿种质的综合评价指数

Table 2 Comprehensive evaluation index of 20 *Medicago falcata* germplasm

材料编号 Material number	隶属函数值 Membership function value							D 值 D value	排序 Sort
	株高 Plant height/ cm	分枝数 Branch number/ (个·plant ⁻¹)	存活率 Survival rate/ %	茎粗 Stem diameter/ cm	叶面积 Leaf area/ cm ²	F_v/F_m	地上生物量 Aboveground biomass/g		
A2Z311	0.422	0.400	1.000	0.275	1.000	1.000	1.000	0.791	1
A2Z317	0.472	0.474	0.491	0.000	0.406	0.869	0.498	0.601	5
A2Z355	0.605	1.000	0.099	0.258	0.779	0.549	0.809	0.705	3
A2Z302	0.520	0.344	0.245	0.218	0.428	0.682	0.337	0.474	13
A2Z599	0.232	0.335	0.163	0.332	0.446	0.537	0.423	0.333	17
A2Z534	0.532	0.842	—0.140	1.000	0.869	0.716	0.914	0.554	8
A2Z528	0.448	0.769	0.446	0.244	0.518	0.511	0.364	0.547	9
A2Z436	0.627	0.338	0.300	0.235	0.553	0.342	0.339	0.485	12
A2Z594	0.296	0.463	0.040	0.134	0.399	0.473	0.541	0.393	16
A2Z491	0.368	0.491	0.294	0.231	0.397	0.730	0.180	0.432	14
A2Z316	0.566	0.309	0.373	0.055	0.759	0.467	0.341	0.546	10
A2Z351	0.505	0.438	0.057	0.043	0.494	0.493	0.090	0.429	15
A2Z423	0.406	0.673	0.288	0.180	0.871	0.532	0.382	0.559	7
A2Z350	0.370	0.912	0.000	0.117	0.648	0.489	0.395	0.519	11
A2Z588	1.000	0.751	0.149	0.412	0.528	0.476	0.962	0.757	2
A2Z600	0.445	0.902	0.256	0.025	0.420	1.097	0.546	0.677	4
A2Z353	0.244	0.638	0.070	0.390	0.000	0.512	0.384	0.295	19
A2Z622	0.398	0.416	—0.140	0.457	0.252	0.770	0.120	0.303	18
A2Z525	0.000	0.000	0.117	0.226	0.245	0.000	0.000	0.020	20
A2Z480	0.484	0.878	0.093	0.268	0.845	0.428	0.368	0.561	6

表 3 20 份黄花苜蓿系统聚类分析

Table 3 Systematic cluster analysis of 20 *Medicago falcata* samples

	材料编号 Material number	D 值 D value	耐旱性 Drought resistance
I	A2Z311	0.791	极强 Extremely strong
II	A2Z588, A2Z355	0.731	较强 Comparatively strong
III	A2Z317, A2Z600	0.639	强 Strong
IV	A2Z534	0.554	中 Moderate
V	A2Z594, A2Z599, A2Z302, A2Z491, A2Z351, A2Z436, A2Z316, A2Z350, A2Z480, A2Z423, A2Z528	0.480	较弱 Weaker
VI	A2Z353, A2Z622	0.299	弱 Weak
VII	A2Z525	0.020	极弱 Extremely weak

3 讨论

3.1 干旱胁迫对黄花苜蓿生长的影响

在干旱胁迫条件下,植物的生长发育受到显著影响^[15]。植物的抗旱性由多种复杂机制共同调控,选择适当的抗旱性评价方法和指标是至关重要的。本研究依据先前研究成果^[16-17],选择了株高、分枝数、存活率、叶面积、茎粗以及地上生物量这 6 个形态指标,对干旱胁迫下的黄花苜蓿苗期的生长状态进行了详细分析。针对 20 份不同的黄花苜蓿种质,本研究发现在轻度到重度干旱条件下,形态指标如株高、分枝数、存活率、地上生物量等均表现出不同程度的下降趋势。特别是在重度干旱胁迫下,与对

照组相比所有指标均显著降低。部分材料在统计上也显示出显著差异,尤其是材料 A2Z316, A2Z351 和 A2Z600,在所有检测的指标上均表现出降低的趋势。轻度干旱胁迫下,材料 A2Z525, A2Z594 和 A2Z351 的相应指标逐渐减少,而重度干旱下,材料 A2Z599, A2Z525 和 A2Z622 的叶面积、存活率和地上生物量的显著降低趋势与之前的研究结果一致。此研究结果支持并扩展了王赫等^[18]及李源等^[19]的研究,证实了不同苜蓿种质在面对干旱胁迫时的反映存在显著差异。这些发现不仅有助于理解黄花苜蓿的干旱响应机制,同时也为筛选和培育抗旱性能强的苜蓿种质提供了科学依据。

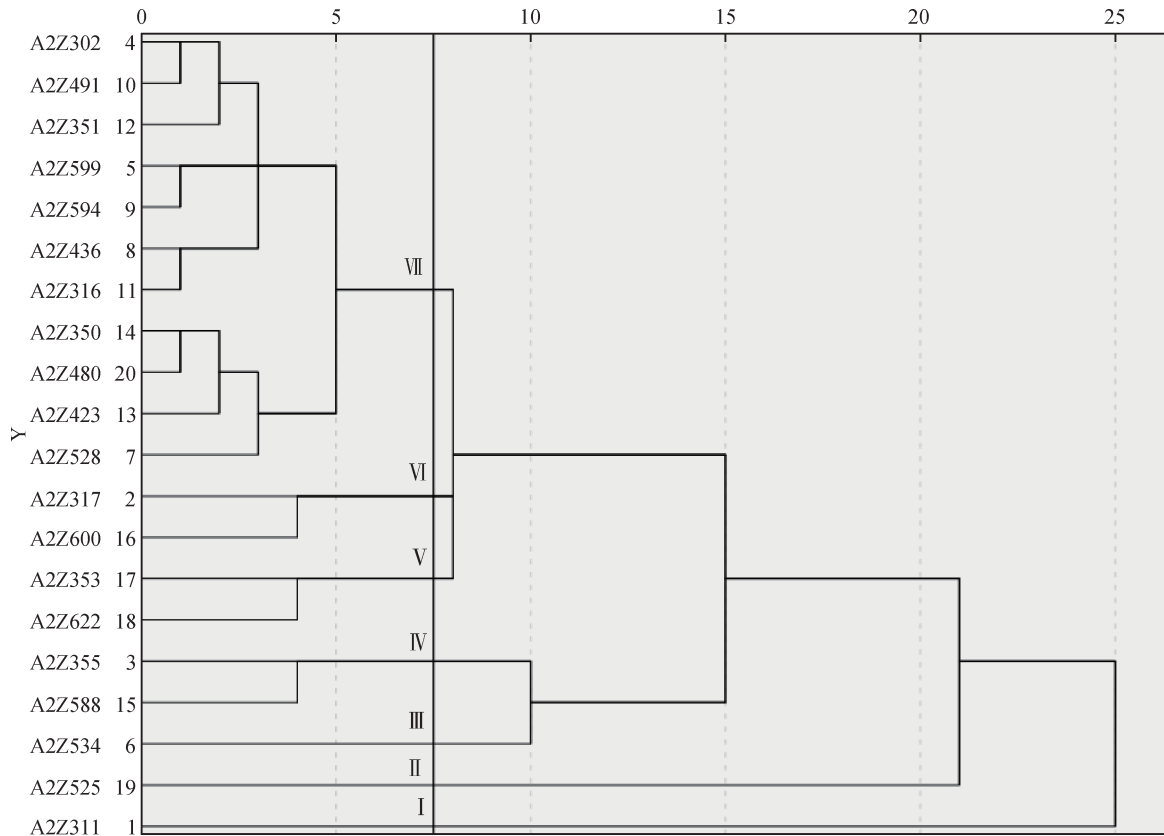


图8 20份黄花苜蓿抗旱性评价系统聚类分析

Fig. 8 Cluster analysis of drought resistance evaluation system of 20 *Medicago falcata* samples

3.2 干旱胁迫下黄花苜蓿生理的变化

F_v/F_m 值的降低反映了光合作用效率的下降,一些种质可能通过降低光合效率来减少光损伤,从而提高在长期干旱条件下的生存率。干旱胁迫下,植物为了减少水分散失会部分关闭气孔,这会限制二氧化碳的进入,从而影响光合作用的进行。正常情况下 F_v/F_m 值低于0.75则意味着光合作用受到抑制^[20]。本实验中,虽然有6种黄花苜蓿在干旱中未显示出光抑制现象,但这可能是由于干旱胁迫导致叶绿体类囊体膜上的蛋白复合体部分失活造成的^[21]。缺水环境下,苜蓿的抗逆能力由复杂的调控机制所决定,仅从外部形态评估其适应性通常不够准确^[22]。苜蓿内部生理生化过程也会受到影响^[23]。姚宇恒^[24]的研究表明,在红豆草(*Onobrychis viciaefolia*)中,干旱胁迫下红豆草叶片的PSII结构受到损伤,且叶绿素大量分解,叶绿素荧光参数降低。这与本研究的结果一致,进一步证实了干旱胁迫对光合作用的普遍影响。但本研究还发现不同黄花苜蓿种质在 F_v/F_m 值的变化幅度上存在显著差异,这与周宇飞等^[25]和王萍等^[26]在高粱(*Sorghum bicolor* L.)和沙芥(*Pugionium cornutum* L.)中的研

究结果有所不同。他们发现作物的 F_v/F_m 值在干旱条件下普遍下降,但并未提及种质间的差异。这表明不同种质在光合作用调控方面存在差异,黄花苜蓿可能具有更复杂的抗旱生理机制。抗旱性强的种质(如材料A2Z311)在重度干旱条件下仍能维持较高的 F_v/F_m 值和较好的生长状态,这可能与其高效的光保护机制和抗氧化能力有关。这些种质可能通过调节光合作用相关的基因表达,增强光系统对干旱胁迫的耐受性。而抗旱性弱的种质(如材料A2Z525)表现出显著的 F_v/F_m 值下降和生长抑制的状态,这可能是由于光保护机制不足,不能有效应对干旱胁迫所导致的光损伤。

3.3 干旱胁迫下黄花苜蓿的综合性评价方法

本试验采用了室内的盆栽苗期抗旱评估的方法,此试验是在理想状态下的生长模式,其结果与大田试验有一定差距,但就大量种质资源抗旱性评价而言,目前依然是一种快速而准确有效的方法^[27]。不同的苜蓿种质以及不同的生长阶段所表现出的抗旱能力是不同的,仅仅凭借单一指标评价抗旱性不具有科学性^[28]。

隶属函数法是一种基于模糊数学的综合评价方法,其原理是将多个指标的实测值通过一定的数学变换,转换为在 $[0,1]$ 区间内的隶属度值,以此来反映各个指标对特定属性(如抗旱性)的隶属程度。本研究中,隶属函数法有效地整合了多种形态和生理指标,通过计算各指标的隶属函数值并得到每个黄花苜蓿种质的综合隶属函数D值。隶属函数D值越大,表明该种质的抗旱性越强。这种方法不仅能够避免单一指标评价的片面性,还能更加全面地反映不同种质的抗旱特性,同时隶属函数分析在处理这类多指标综合评价问题时能够有效地将不同指标纳入统一的评价框架中,充分考虑各指标对黄花苜蓿抗旱性的影响。与其他一些综合评价方法相比,隶属函数分析在确定各指标权重时,减少了人为主观因素的干扰。在本研究中,通过计算各指标的标准差系数来确定权重系数,使得评价结果更加客观、准确地反映黄花苜蓿种质的实际抗旱能力。

4 结论

在不同程度的干旱胁迫下,20份黄花苜蓿种质在形态和生理指标上均受到不同程度的抑制。综合评价结果显示,本试验所选20份黄花苜蓿种质的抗旱性强弱顺序为:A2Z311>A2Z588>A2Z355>A2Z600>A2Z317>A2Z480>A2Z423>A2Z534>A2Z528>A2Z316>A2Z350>A2Z436>A2Z302>A2Z491>A2Z351>A2Z594>A2Z599>A2Z622>A2Z353>A2Z525。其中材料A2Z311表现出更强的抗旱性,因此,在干旱地区可优先选择A2Z311作为黄花苜蓿种植材料。

参考文献

- [1] 龙思宇,李萌,邓亚婷,等. ALA对干旱胁迫下绣球生理特性的影响[J]. 北方园艺,2022(10):63-69
LONG S Y, LI M, DENG Y T, et al. Effects of 5-aminolevulinic acid (ALA) on physiological characteristics of Hydrangea under drought stress [J]. Northern Horticulture, 2022 (10): 63-69
- [2] 李陈建,孙玉兰,王玉祥,等. 50份黄花苜蓿种质资源农艺性状的遗传多样性分析[J]. 新疆农业大学学报,2022,45(3):173-181
LI C J, SUN Y L, WANG Y X, et al. Genetic diversity of agronomic traits of 50 *Medicago falcata* L. germplasm [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2022, 45(3): 173-181
- [3] 赵世康,穆振侠,李刚,等. 新疆大气可降水量时空演变特征及其与降水转化关系[J]. 干旱区研究,2025,42(2):191-201
ZHAO S K, MU Z X, LI G, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of atmospheric precipitable water vapor in Xinjiang and its relationship with precipitation conversion [J]. Arid Zone Research, 2025, 42(2): 191-201
- [4] 张慧琴,陈春艳,马红,等. 1981—2020年新疆地区夏季降水时空分布特征分析[J]. 内蒙古气象,2025(1):27-31
ZHANG H Q, CHEN C Y, MA H, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of summer precipitation in Xinjiang from 1981 to 2020 [J]. Inner Mongolia Meteorology, 2025(1): 27-31
- [5] 侯敏. 30个苜蓿材料生长特性与品质的比较及综合评价[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2010:1-97
HOU M. Comparison and comprehensive evaluation of growth characteristics and quality of 30 alfalfa materials [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2010: 1-97
- [6] 王俊杰. 中国黄花苜蓿野生种质资源研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2008:215-219
WANG J J. Studies on the wild germplasm resources of yellow clover in China [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008: 215-219
- [7] 陈敏. 直立型黄花苜蓿的研究[J]. 中国草原,1980,2(3):38-42
CHEN M. Study on erect alfalfa [J]. Chinese Journal of Grassland, 1980, 2(3): 38-42
- [8] 朱新强,张新颖,师尚礼,等. 干旱胁迫下4个苜蓿品种根系抗旱性的比较[J]. 甘肃农业大学学报,2012,47(1):103-107
ZHU X Q, ZHANG X Y, SHI S L, et al. Comparison on the root drought resistance of four alfalfa cultivars under drought stress [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2012, 47(1): 103-107
- [9] 李贺洋,黄悠,陈超超,等. 黄花苜蓿种质资源苗期抗旱性鉴定评价[J]. 中国草地学报,2023,45(10):34-45
LI H Y, HUANG Y, CHEN C C, et al. Evaluation of drought resistance in seedling stage germplasm resources of *Medicago falcata* [J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(10): 34-45
- [10] 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[J]. 畜牧与饲料科学,2023,44(2):81-91
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 [J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2023, 44(2): 81-91
- [11] 王江银,徐婉宁,苏洋,等. 干旱胁迫下紫花苜蓿和黄花苜蓿实生苗叶片形态及解剖结构变化[J]. 华北农学报,2023,38(S1):228-236
WANG J Y, XU W N, SU Y, et al. Changes in leaf morphology and anatomical structure of seedlings of alfalfa and *Medicago falcata* L. under drought stress [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2023, 38(S1): 228-236
- [12] 汪莹,南丽丽,师尚礼,等. 干旱胁迫对不同根型苜蓿根系生长及根际土壤细菌的影响[J]. 生态学报,2021,41(19):7735-7742
WANG K, NAN L L, SHI S L, et al. Influence of root growth

- and bacterial community in the rhizosphere of different root types of alfalfa under drought stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(19): 7735-7742
- [13] 韩瑞宏, 卢欣石, 高桂娟, 等. 紫花苜蓿(*Medicago sativa*)对干旱胁迫的光合生理响应[J]. *生态学报*, 2007, 27(12): 5229-5237
HAN R H, LU X S, GAO G J, et al. Photosynthetic physiological response of alfalfa (*Medicago sativa*) to drought stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5229-5237
- [14] 马其东, 高振生, 洪绶曾, 等. 不同苜蓿地方品种根系发育能力的评价与筛选[J]. *草业学报*, 1999, 8(1): 42-49
MA Q D, GAO Z S, HONG F Z, et al. Evaluation and selection of root development ability of different local alfalfa cultivars[J]. *Acta Pratacultural Science*, 1999, 8(1): 42-49
- [15] 白文明, 左强, 黄元仿, 等. 乌兰布和沙区紫花苜蓿根系生长及吸水规律的研究[J]. *植物生态学报*, 2001, 25(1): 35-41
BAI W M, ZUO Q, HUANG Y F, et al. Effect of water supply on root growth and water uptake of alfalfa in wulanbuhe sandy region[J]. *Acta Pratacultural Science*, 2001, 25(1): 35-41
- [16] 韩喆, 张永强, 张浩浩, 等. 干旱胁迫对伊犁绢蒿幼苗生长及叶片解剖结构的影响[J]. *草地学报*, 2024, 32(1): 105-112
HAN Z, ZHANG Y Q, ZHANG H H, et al. Effects of drought stress on growth and leaf anatomical structure of *Seriphidium transiliense* seedlings[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(1): 105-112
- [17] 张鹤山, 陈明新, 王凤, 等. 18个紫花苜蓿品种苗期抗旱性综合评价[J]. *江苏农业科学*, 2012, 40(3): 168-171
ZHANG H S, CHEN M X, WANG F, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of 18 alfalfa varieties at seedling stage[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2012, 40(3): 168-171
- [18] 王赫, 刘利, 周道玮. 4种苜蓿属植物幼苗的抗旱性研究[J]. *草地学报*, 2010, 18(2): 205-211
WANG H, LIU L, ZHOU D W. Study on drought resistance of 4 *Medicago* l. varieties[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(2): 205-211
- [19] 李源, 刘贵波, 高洪文, 等. 苗期干旱胁迫对苜蓿种质生长特性的影响[J]. *河北农业科学*, 2010, 14(7): 1-4, 41
LI Y, LIU G B, GAO H W, et al. Effects of drought stress on the growth characteristics of different alfalfa germplasms during seedling stage[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2010, 14(7): 1-4, 41
- [20] BJOKMAN O, DEMMIG B. Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins[J]. *Planta*, 1987, 170(4): 489-504
- [21] 段娜, 贾玉奎, 郝玉光, 等. 干旱胁迫对欧李叶绿素荧光特性的影响[J]. *西北林学院学报*, 2018, 33(6): 10-14
DUAN N, JIA Y K, HAO Y G, et al. Effects of drought stress on chlorophyll fluorescence characteristics of *Cerasus humilis* [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(6): 10-14
- [22] 李诗琴, 宋坤烺, 刘世超, 等. 16个苜蓿品种幼苗期抗旱性综合评价[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2019(15): 110-116
LI S Q, SONG K Y, LIU S C, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of 16 alfalfa varieties at seedling stage[J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2019(15): 110-116
- [23] 陈静, 宫文龙, 张尚雄, 等. 紫花苜蓿与蓝花苜蓿抗旱性比较研究[J]. *中国草地学报*, 2020, 42(2): 32-40
CHEN J, GONG W L, ZHANG S X, et al. Comparative study on drought resistance of two alfalfa subspecies[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(2): 32-40
- [24] 姚宇恒. 红豆草种质苗期抗旱性评价及代谢组学研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2024: 33-61
YAO Y H. Evaluating and metabolomics study on drought resistance of sainfoin germplasm during seedling stage [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2024: 33-61
- [25] 周宇飞, 王德权, 陆樟镛, 等. 干旱胁迫对持绿性高粱光合特性和内源激素ABA、CTK含量的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(4): 655-663
ZHOU Y F, WANG D Q, LU Z B, et al. Effects of drought stress on photosynthetic characteristics and endogenous hormone ABA and CTK contents in green-stayed sorghum[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(4): 655-663
- [26] 王萍, 张希吏, 石磊. 干旱胁迫下沙芥幼苗叶片光合特性和叶绿素荧光参数的变化[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(3): 159-163
WANG P, ZHANG X L, SHI L. Changes of photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of *Pugionium cornutum* (L.) Gaertn seedlings leaf under drought stress[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(3): 159-163
- [27] 李源, 刘贵波, 高洪文, 等. 紫花苜蓿种质苗期抗旱性综合评价研究[J]. *草地学报*, 2009, 17(6): 807-812
LI Y, LIU G B, GAO H W, et al. Study on comprehensive evaluation of drought resistance of *Medicago stiva* L. germplasm at seedling stage[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2009, 17(6): 807-812
- [28] 蔺豆豆, 赵桂琴, 琚泽亮, 等. 15份燕麦材料苗期抗旱性综合评价[J]. *草业学报*, 2021, 30(11): 108-121
LIN D D, ZHAO G Q, JU Z L, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of 15 oat varieties at the seedling stage[J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2021, 30(11): 108-121

(责任编辑 刘婷婷)