

DOI:10.11686/cyxb2024301

<http://cyxb.magtech.com.cn>

曾燕霞, 陈志龙, 尚继红, 等. 太空诱变对 PEG-6000 模拟干旱胁迫下紫花苜蓿材料苗期生长的影响. 草业学报, 2025, 34(6): 59—69.

ZENG Yan-xia, CHEN Zhi-long, SHANG Ji-hong, *et al.* Effects of space mutagenesis on the growth of alfalfa (*Medicago sativa*) seedlings under PEG-6000 simulated drought stress. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(6): 59—69.

太空诱变对 PEG-6000 模拟干旱胁迫下紫花苜蓿材料苗期生长的影响

曾燕霞, 陈志龙, 尚继红, 沙晓弟, 吴娟, 陈彩锦*

(宁夏农林科学院固原分院, 宁夏 固原 756000)

摘要:为探讨太空诱变对聚乙二醇 6000(PEG-6000)模拟干旱胁迫下紫花苜蓿材料苗期生长的影响,以 14 份诱变和 14 份未诱变材料为研究对象,以蒸馏水处理作为对照,采用 PEG-6000 模拟干旱胁迫处理方式,测定处理后生长相关指标,并利用隶属函数法进行综合评价。结果表明,干旱胁迫处理降低了大部分材料的株高、基茎粗、根长、单株鲜重、叶面积、叶周长、叶长和叶宽,而 SPAD 值反而升高。与未诱变材料相比,部分材料太空诱变后可缓解干旱胁迫引起的生长指标降低,而促进 SPAD 值升高。其中,巨能 7 诱变材料除株高外,其余生长指标均显著高于未诱变材料($P<0.05$);除此,诱变材料中,WL354 的基茎粗和叶长,DS310FY 的叶面积、叶周长、叶长和 SPAD 值,盐宝的叶面积、叶宽和 SPAD 值,WL343 的叶面积、叶长、叶宽和 SPAD 值,甘农 3 号的叶长和 SPAD 值,皇冠的叶宽,中苜 1 号、南苜 501 和阿迪娜的 SPAD 值均显著高于其未诱变材料($P<0.05$);而未诱变材料中,阿迪娜的基茎粗,甘农 6 号的单株鲜重,甘农 4 号的叶面积、叶周长、叶长及 WL354 的叶宽和 SPAD 值均显著高于其诱变材料($P<0.05$)。将各材料苗期耐旱性生长指标进行隶属函数综合分析得出,经 PEG-6000 干旱胁迫后,甘农 3 号、DS310FY、巨能 7、南苜 501、皇冠、盐宝、WL343 和阿迪娜这 8 份材料的太空诱变材料生长指标隶属函数平均值较其未诱变材料高,说明从生长指标来看,这 8 份材料经太空诱变后耐旱性能得到提升。

关键词:太空诱变;PEG-6000;干旱胁迫;紫花苜蓿;苗期;生长

Effects of space mutagenesis on the growth of alfalfa (*Medicago sativa*) seedlings under PEG-6000 simulated drought stress

ZENG Yan-xia, CHEN Zhi-long, SHANG Ji-hong, SHA Xiao-di, WU Juan, CHEN Cai-jin*

Guyuan Branch of Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Guyuan 756000, China

Abstract: The aim of this work was to explore the effects of space mutagenesis on the growth of alfalfa (*Medicago sativa*) seedlings under simulated drought stress. An experiment was conducted in which 14 mutated and 14 non-mutated alfalfa materials were treated with polyethylene glycol 6000 (PEG-6000) to impose drought stress or with distilled water as the control. Growth-related indexes were measured for all the plant materials, and the membership function method was used for multivariate data evaluation. The results showed that the plant height, base stem diameter, root length, fresh weight per plant, leaf area, leaf circumference, leaf length, and leaf width of most materials was lower under drought stress than in the control, whereas the SPAD value was higher in the drought-

收稿日期:2024-07-31;改回日期:2024-09-20

基金项目:宁夏自然科学基金项目(2023AAC03439),宁夏科技基础条件建设专项“宁夏农业种质资源库基础条件建设(2022DPC05001)”和宁夏生态农业产业专家服务基地项目资助。

作者简介:曾燕霞(1990—),女,甘肃榆中人,助理研究员,硕士。E-mail: nxnkyzyx@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: ccj401224@126.com

stressed plants than in the control plants. Compared with the non-mutated materials, the most mutated materials showed lower levels of inhibition under drought stress, and higher SPAD values. With the exception of plant height, the growth indexes of mutated Juneng 7 were significantly higher than those of its non-mutated counterpart ($P < 0.05$). In addition, the base stem diameter and leaf length of mutated WL354, the leaf area, leaf circumference, leaf length, and SPAD value of mutated DS310FY, the leaf area, leaf width, and SPAD value of mutated Yanbao, the leaf area, leaf length, leaf width, and SPAD value of mutated WL343, the leaf length and SPAD value of mutated Gannong No. 3, the leaf width of mutated Huangguan, and the SPAD value of mutated Zhongmu No. 1, Nanmu 501, and Adina were all significantly higher than those of their respective non-mutated counterparts ($P < 0.05$). The base stem diameter of Adina, fresh weight per plant of Gannong No. 6, leaf area, leaf circumference, leaf length of Gannong No. 4, and leaf width and SPAD value of WL354 were significantly higher than those of their respective mutated counterparts ($P < 0.05$). We conducted a membership function analysis based on the growth indexes of the materials at the seedling stage under drought stress, and obtained a comprehensive score for each material. The average scores of eight mutated materials (Gannong No. 3, DS310FY, Juneng 7, Nanmu 501, Huangguan, Yanbao, WL343 and Adina) were higher than those of their non-mutated counterparts. These results indicate that the drought resistance of these eight materials was improved by space mutagenesis.

Key words: space mutagenesis; PEG-6000; drought stress; alfalfa; seedling stage; growth

紫花苜蓿(*Medicago sativa*)是我国重要的豆科牧草之一,是草食动物重要的优质饲料来源,它的优质高产与养殖业的健康发展息息相关^[1]。但紫花苜蓿具有异花授粉特性,遗传背景复杂,育种难度大,且周期较长。太空诱变育种是利用返回式航天器等诱发植物产生变异,在地面选育新种质、新材料,培育新品种的作物育种新技术^[2]。与其他育种方法相比,其具有诱变频率高、变异幅度大、育种时间短等特点^[3]。杨红善^[4]对太空诱变紫花苜蓿材料进行研究,筛选出了多叶、高产等正向变异的单株44株,并成功选育出紫花苜蓿新种质航苜2号。任卫波等^[5]研究发现,经卫星搭载后,紫花苜蓿茎粗、分枝数和产草量有所增加。因此,开展太空诱变紫花苜蓿材料的相关研究,可为紫花苜蓿航天育种及种质资源创制奠定基础。

干旱胁迫是影响植物生长的重要自然因素之一。在植物的生长阶段中,种子的萌发和幼苗生长阶段对于干旱最为敏感^[6]。曾泽堂^[7]研究了干旱环境对紫花苜蓿苗期生长的影响,表明干旱胁迫可影响其苗期分枝数、株高和叶面积等生长指标。聚乙二醇6000(polyethylene glycol 6000, PEG-6000)是一种亲水性非常强的大分子聚合物,可阻塞植物系统的输导组织,常作为渗透调节剂应用到模拟干旱胁迫中^[8]。程波等^[9]利用PEG-6000模拟干旱胁迫环境,分析了5种紫花苜蓿种子萌发期的抗旱性强弱。另有研究发现,利用太空搭载技术对各种植物种子进行空间诱变处理,在许多植物中实现了抗逆性的提高^[10-11]。李晶等^[12]研究也表明,卫星搭载后提高了紫花苜蓿过氧化物酶活性,并进一步影响其抵抗外界胁迫的能力。因此,本研究以航天搭载和未搭载的紫花苜蓿种子材料为对象,研究太空诱变对PEG-6000模拟干旱胁迫下紫花苜蓿材料苗期生长的影响,为紫花苜蓿太空诱变育种和耐旱性研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

参试材料为2020年5月搭载由CZ-5B火箭发射的新一代载人飞船试验船的14份太空诱变种子和14份未诱变种子材料(共28份),名称分别为甘农6号、甘农4号、阿迪娜、劲能、WL354、甘农3号、WL343、南苜501、中苜3号、中苜1号、巨能7、DS310FY、盐宝和皇冠。试验材料均由宁夏农林科学院动物科学研究所提供。

1.2 试验方法

1.2.1 幼苗的培养 本试验于2023年9月在宁夏农林科学院固原分院实验室进行。试验选择颗粒饱满、均匀一致的紫花苜蓿种子,种植于装有普通花土(花土:蛭石:珍珠岩=3:1:1)的塑料花盆中(高15.5 cm,底径12 cm,外口径15 cm),每盆10株,室温下采用常规统一管理,培养1月左右每个处理选取长势一致的30株幼苗进行

试验。

1.2.2 PEG-6000 模拟干旱胁迫处理 将配制好的 PEG-6000 溶液倒入容器中,将长势一致的幼苗从土里挖出,迅速将根清洗干净,用滤纸吸干水分后放入 PEG-6000 溶液中,叶片在溶液之上,防止全部浸入溶液中,进行干旱胁迫处理^[13]。太空诱变材料和未诱变材料分别以蒸馏水处理相同的时间为对照,处理结束后测定各组试验材料的相关生长指标。试验处理具体分为 4 组,CK₁:未诱变材料蒸馏水处理;T₁:未诱变材料干旱处理;CK₂:诱变材料蒸馏水处理;T₂:诱变材料干旱处理。[备注:试验前期已根据叶片感应干旱胁迫的敏感点筛选出了各材料干旱胁迫的最适浓度和时间(表 1)。为了诱变和未诱变材料后期比较相一致性,选择其材料中最先出现感应干旱胁迫的时间进行试验。]

1.3 指标测定及方法

每个处理选取 10 株植株,利用直尺(精度 0.1 cm)测量株高和根长,用游标卡尺(精度 0.02 mm)测定基茎粗。每个处理选 9 株(每组 3 株,3 次重复),利用电子天平(精度 0.001 g)测定整株鲜重,并计算单株鲜重。每个处理选取 9 片成熟的叶片(每组 3 片,3 次重复),利用 YMJ-CH 智能叶面积测定仪系统(中国)测量叶面积、叶周长、叶长和叶宽,并计算单个叶片数值。每个处理选取 10 片成熟的叶片利用便携式叶绿素测定仪(SPAD-502,日本)测定 SPAD 值。

1.4 数据统计方法

采用 Excel 2016 初步整理试验数据,采用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析,Duncan's 法进行多重比较,以 $P<0.05$ 作为差异显著性判断标准,利用 GraphPad Prism 8 对相关指标进行作图。利用隶属函数法对生长指标进行综合评价^[14]。

表 1 各材料 PEG-6000 模拟干旱胁迫最佳浓度和时间

Table 1 The optimal concentration and time of PEG-6000 simulated drought stress for each material

序号 Serial number	材料名称 Material name	未诱变材料 Unmutagenic materials		诱变材料 Mutagenic materials	
		胁迫浓度	胁迫时间	胁迫浓度	胁迫时间
		Stress concentration (%)	Stress time (h)	Stress concentration (%)	Stress time (h)
1	劲能 Jinneng	30	2.0	30	2.0
2	中苜 1 号 Zhongmu No. 1	30	2.0	30	2.0
3	甘农 3 号 Gannong No. 3	30	2.0	30	3.0
4	WL354	30	2.0	30	2.0
5	DS310FY	30	2.0	30	3.0
6	甘农 6 号 Gannong No. 6	30	2.0	30	2.0
7	甘农 4 号 Gannong No. 4	30	2.5	30	2.0
8	中苜 3 号 Zhongmu No. 3	30	2.0	30	2.0
9	巨能 7 Juneng 7	30	2.0	30	3.0
10	南苜 501 Nanmu 501	30	2.0	30	2.0
11	皇冠 Huangguan	20	2.0	20	2.0
12	盐宝 Yanbao	30	2.0	30	2.5
13	WL343	20	2.0	20	2.0
14	阿迪娜 Adina	30	2.0	30	2.0

2 结果与分析

2.1 太空诱变对 PEG-6000 模拟干旱胁迫下紫花苜蓿材料苗期株高的影响

由图 1 可知,除阿迪娜诱变材料外,干旱胁迫处理降低了各材料株高,且未诱变材料中苜 1 号、WL354、DS310FY、阿迪娜和诱变材料中劲能、甘农 3 号、WL343 分别与对照差异显著($P<0.05$)。干旱胁迫处理后,诱变材料劲能、中苜 3 号、巨能 7、皇冠、WL343 和阿迪娜株高较未诱变材料高,但差异未达到显著水平($P>0.05$)。

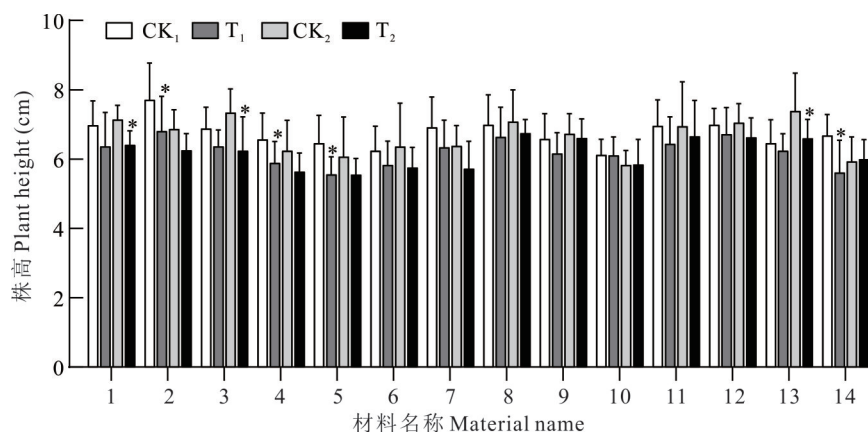


图1 太空诱变对PEG模拟干旱胁迫下紫花苜蓿材料苗期株高的影响

Fig. 1 Effect of space mutagenesis on plant height of alfalfa materials at seedling stage under PEG simulated drought stress

1: 劲能 Jinneng; 2: 中苜1号 Zhongmu No.1; 3: 甘农3号 Gannong No.3; 4: WL354; 5: DS310FY; 6: 甘农6号 Gannong No.6; 7: 甘农4号 Gannong No.4; 8: 中苜3号 Zhongmu No.3; 9: 巨能7 Juneng 7; 10: 南苜501 Nanmu 501; 11: 皇冠 Huangguan; 12: 盐宝 Yanbao; 13: WL343; 14: 阿迪娜 Adina. *代表未诱变或诱变材料干旱胁迫处理与其相应蒸馏水空白处理间差异显著 ($P < 0.05$), 未标记代表差异不显著。下同。* represents the significant difference between drought stress treatment of unmutagenic or mutagenic materials and the corresponding distilled water blank treatment ($P < 0.05$), and unlabeled represents no significant difference. The same below.

2.2 太空诱变对PEG-6000模拟干旱胁迫下紫花苜蓿材料苗期基茎粗的影响

由图2可知,干旱胁迫处理降低了各材料基茎粗,除劲能、中苜1号、甘农6号外的未诱变材料和除劲能、WL354、甘农6号和皇冠外的诱变材料与对照差异显著 ($P < 0.05$); 干旱胁迫处理后,诱变材料劲能、WL354、DS310FY、甘农6号、甘农4号、巨能7、南苜501、皇冠和盐宝的基茎粗较未诱变材料高,且WL354和巨能7诱变材料与未诱变材料基茎粗差异显著 ($P < 0.05$),而阿迪娜未诱变材料基茎粗显著高于诱变材料 ($P < 0.05$)。

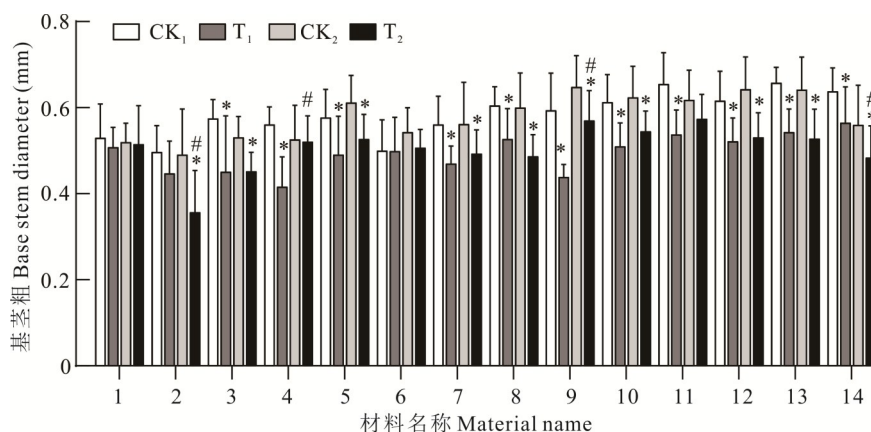


图2 太空诱变对PEG模拟干旱胁迫下紫花苜蓿材料苗期基茎粗的影响

Fig. 2 Effect of space mutagenesis on base stem diameter of alfalfa materials at seedling stage under PEG simulated drought stress

#代表干旱胁迫处理后未诱变和诱变材料间差异显著 ($P < 0.05$). 未标记代表差异不显著。下同。# represents the significant difference between non-mutagenic and mutagenic materials after drought stress treatment ($P < 0.05$), and unlabeled represents no significant difference. The same below.

2.3 太空诱变对PEG-6000模拟干旱胁迫下紫花苜蓿材料苗期根长的影响

由图3可知,干旱胁迫处理降低了部分材料根长,其中未诱变材料甘农3号、巨能7和诱变材料WL354的根长与对照差异显著 ($P < 0.05$),部分材料干旱胁迫后根长反而升高,但与对照差异均不显著 ($P > 0.05$); 干旱胁迫处理后,诱变材料劲能、甘农3号、甘农6号、巨能7、盐宝、WL343和阿迪娜的根长较未诱变材料高,且巨能7诱变材料与未诱变材料根长差异显著 ($P < 0.05$)。

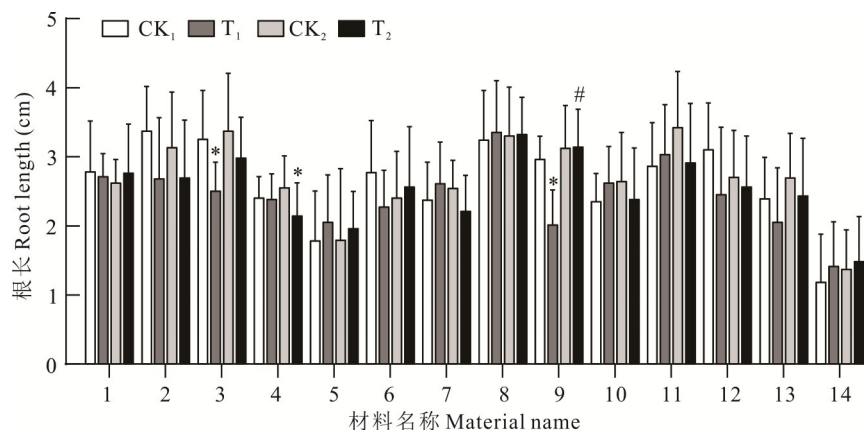


图3 太空诱变对PEG模拟干旱胁迫下紫花苜蓿材料苗期根长的影响

Fig. 3 Effect of space mutagenesis on root length of alfalfa materials at seedling stage under PEG simulated drought stress

2.4 太空诱变对PEG-6000模拟干旱胁迫下紫花苜蓿材料苗期单株鲜重的影响

由图4可知,干旱胁迫处理后,大部分材料单株鲜重降低,其中未诱变材料劲能、WL354、巨能7、南苜501、盐宝、WL343、阿迪娜和诱变材料中苜1号、WL354、甘农6号、南苜501、盐宝和WL343的单株鲜重与对照差异显著($P < 0.05$),部分材料干旱胁迫后单株鲜重反而升高,但与对照差异均不显著($P > 0.05$);干旱胁迫处理后,诱变材料甘农3号、巨能7、皇冠、盐宝和阿迪娜的单株鲜重较未诱变材料高,且巨能7诱变材料与未诱变材料的单株鲜重差异显著($P < 0.05$),而甘农6号未诱变材料单株鲜重显著高于诱变材料($P < 0.05$)。

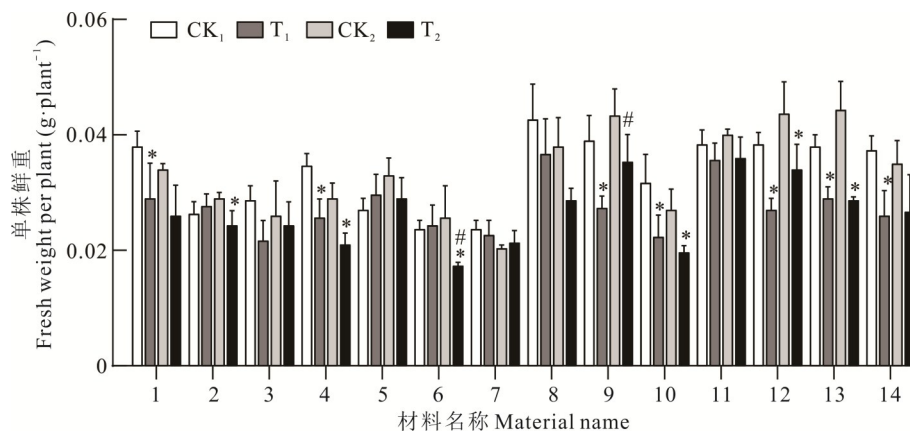


图4 太空诱变对PEG模拟干旱胁迫下紫花苜蓿材料苗期单株鲜重的影响

Fig. 4 Effect of space mutagenesis on fresh weight per plant of alfalfa materials at seedling stage under PEG simulated drought stress

2.5 太空诱变对PEG-6000模拟干旱胁迫下紫花苜蓿材料苗期叶面积的影响

由图5可知,干旱胁迫处理降低了各材料的叶面积,未诱变材料中除甘农6号、南苜501、阿迪娜外和诱变材料劲能、甘农3号、WL354、甘农4号、中苜3号、南苜501、WL343的叶面积与对照差异显著($P < 0.05$);干旱胁迫处理后,诱变材料除甘农4号和中苜3号外均较未诱变材料高,且DS310FY、巨能7、盐宝和WL343诱变材料与未诱变材料的叶面积差异显著($P < 0.05$),而甘农4号未诱变材料的叶面积显著高于诱变材料($P < 0.05$)。

2.6 太空诱变对PEG-6000模拟干旱胁迫下紫花苜蓿材料苗期叶周长的影响

由图6可知,干旱胁迫处理降低了各材料叶周长,其中未诱变材料劲能、甘农3号、DS310FY、甘农6号、中苜3号、皇冠、盐宝、WL343、阿迪娜和诱变材料劲能、甘农3号、DS310FY、甘农6号、甘农4号、皇冠、盐宝、WL343、阿迪娜的叶周长与对照差异显著($P < 0.05$);干旱胁迫处理后,诱变材料甘农3号、WL354、DS310FY、巨能7、南

苜 501、皇冠、盐宝、WL343和阿迪娜的叶周长较未诱变材料高,且DS310FY和巨能7诱变材料与未诱变材料的叶周长差异显著($P<0.05$),而甘农4号未诱变材料的叶周长显著高于诱变材料($P<0.05$)。

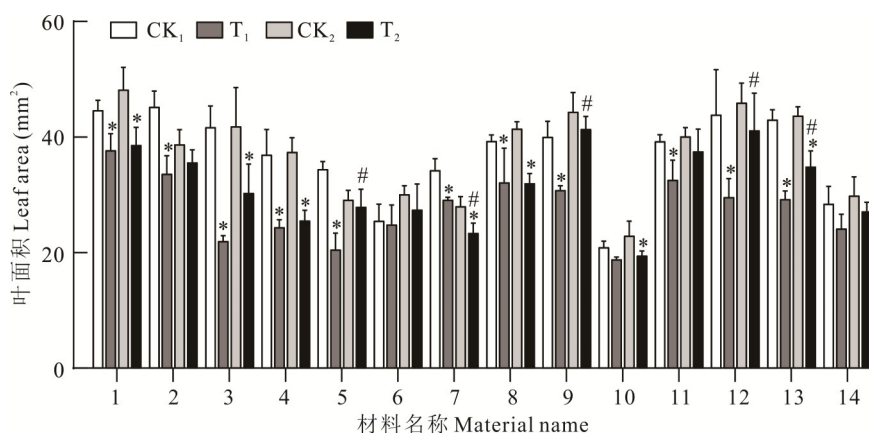


图5 太空诱变对PEG模拟干旱胁迫下紫花苜蓿材料苗期叶面积的影响

Fig. 5 Effect of space mutagenesis on leaf area of alfalfa materials at seedling stage under PEG simulated drought stress

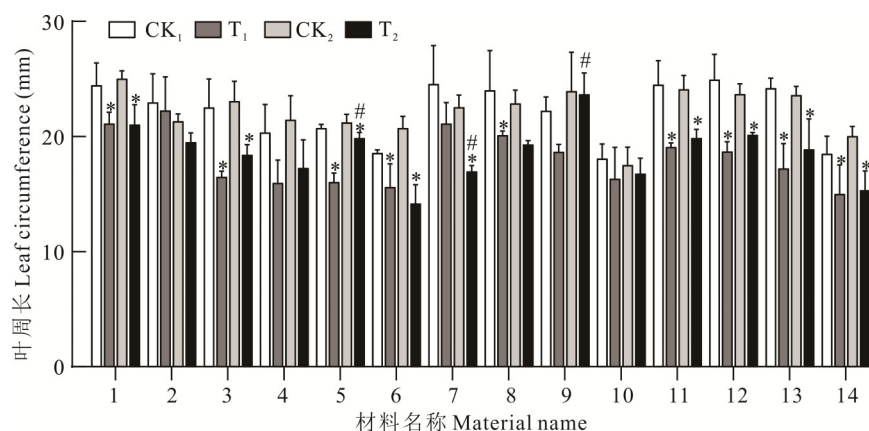


图6 太空诱变对PEG模拟干旱胁迫下紫花苜蓿材料苗期叶周长的影响

Fig. 6 Effect of space mutagenesis on leaf circumference of alfalfa materials at seedling stage under PEG simulated drought stress

2.7 太空诱变对PEG-6000模拟干旱胁迫下紫花苜蓿材料苗期叶长的影响

由图7可知,干旱胁迫处理降低了各材料叶长,其中未诱变材料劲能、甘农3号、WL354、DS310FY、甘农4号、巨能7、皇冠、盐宝、WL343和诱变材料劲能、DS310FY、甘农6号、甘农4号、中苜3号的叶长与对照差异显著($P<0.05$);干旱胁迫处理后,诱变材料甘农3号、WL354、DS310FY、巨能7、南苜501、皇冠、盐宝、WL343和阿迪娜的叶长较未诱变材料高,且甘农3号、WL354、DS310FY、巨能7和WL343诱变材料与未诱变材料的叶长差异显著($P<0.05$),而甘农4号未诱变材料的叶长显著高于诱变材料($P<0.05$)。

2.8 太空诱变对PEG-6000模拟干旱胁迫下紫花苜蓿材料苗期叶宽的影响

由图8可知,干旱胁迫处理降低了各材料叶宽,其中未诱变材料甘农3号、WL354、DS310FY、甘农6号、甘农4号、巨能7、南苜501、皇冠、盐宝、WL343和诱变材料甘农3号、WL354、DS310FY、甘农6号、甘农4号、中苜3号、南苜501、皇冠、WL343、阿迪娜的叶宽与对照差异显著($P<0.05$);干旱胁迫处理后,诱变材料甘农3号、巨能7、皇冠、盐宝和WL343的叶宽较未诱变材料高,且巨能7、皇冠、盐宝和WL343诱变材料与未诱变材料的叶宽差异显著($P<0.05$),而WL354未诱变材料的叶宽显著高于诱变材料($P<0.05$)。

2.9 太空诱变对PEG-6000模拟干旱胁迫下紫花苜蓿材料苗期SPAD值的影响

由图9可知,干旱胁迫处理后,大部分材料的SPAD值升高,其中未诱变材料巨能7、南苜501和诱变材料劲

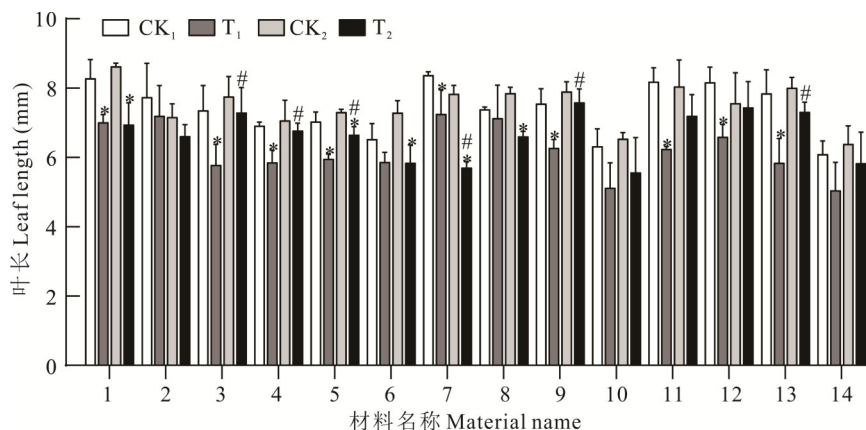


图 7 太空诱变对 PEG 模拟干旱胁迫下紫花苜蓿材料苗期叶长的影响

Fig. 7 Effect of space mutagenesis on leaf length of alfalfa materials at seedling stage under PEG simulated drought stress

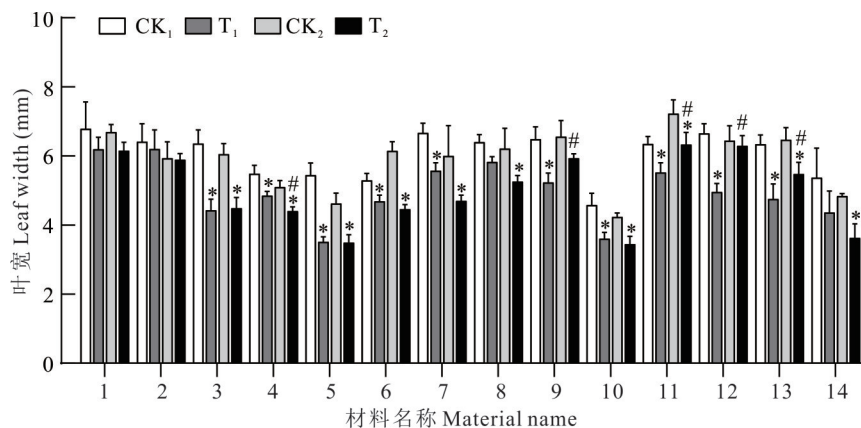


图 8 太空诱变对 PEG 模拟干旱胁迫下紫花苜蓿材料苗期叶宽的影响

Fig. 8 Effect of space mutagenesis on leaf width of alfalfa materials at seedling stage under PEG simulated drought stress

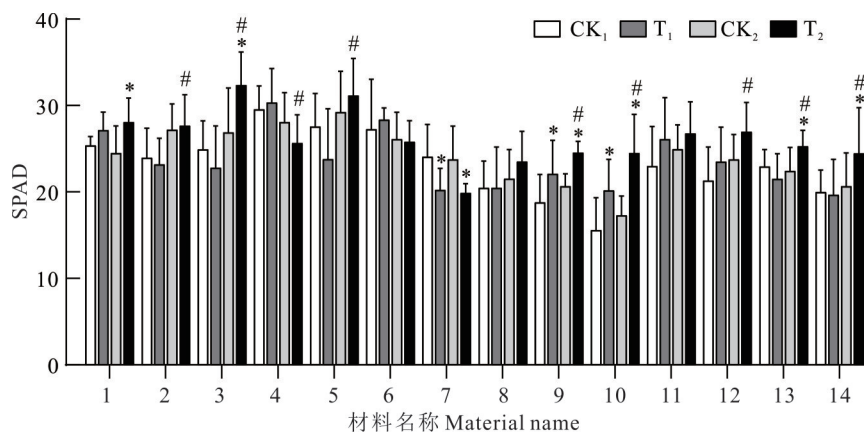


图 9 太空诱变对 PEG 模拟干旱胁迫下紫花苜蓿材料苗期 SPAD 值的影响

Fig. 9 Effect of space mutagenesis on SPAD of alfalfa materials at seedling stage under PEG simulated drought stress

能、甘农 3 号、巨能 7、南苜 501、WL343、阿迪娜的 SPAD 值与对照差异显著 ($P < 0.05$), 而甘农 4 号未诱变和诱变材料干旱胁迫处理后均显著低于对照 ($P < 0.05$); 干旱胁迫处理后, 诱变材料劲能、中苜 1 号、甘农 3 号、DS310FY、中苜 3 号、巨能 7、南苜 501、皇冠、盐宝、WL343 和阿迪娜的 SPAD 值较未诱变材料高, 且中苜 1 号、甘农 3 号、DS310FY、巨能 7、南苜 501、盐宝、WL343 和阿迪娜诱变材料与未诱变材料的 SPAD 值差异显著 ($P < 0.05$), 而 WL354 未诱变材料的 SPAD 值显著高于诱变材料 ($P < 0.05$)。

2.10 各指标隶属函数综合分析

将各材料苗期耐旱性生长指标进行隶属函数分析(表2),平均隶属函数值越大,说明综合表现越好。结果显示,经 PEG-6000 干旱胁迫后,甘农3号、DS310FY、巨能7、南苜501、皇冠、盐宝、WL343和阿迪娜这8份材料的太空诱变材料生长指标隶属函数平均值较其未诱变材料高,说明从生长指标来看,这8份材料经太空诱变后耐旱性能得到提升。

表2 各材料生长指标隶属函数值及排名

Table 2 The subordinative function values and ranking of growth indicators of each material

材料名称 Material name	各指标隶属函数值 The subordinative function values of each index										排序 Rank
	株高	基茎粗	根长	单株鲜重	叶面积	叶周长	叶长	叶宽	SPAD值	平均	
	Plant height	Stem size	Root length	Fresh weight per plant	Leaf area	Leaf circumference	Leaf length	Leaf width	SPAD value	Average	
劲能(未诱变)Jinneng (unmutagenesis)	0.3796	0.5000	0.6830	0.4362	0.6426	0.6409	0.5480	0.7293	0.6881	0.5831	1
劲能(诱变)Jinneng (mutagenesis)	0.3981	0.5167	0.7054	0.3253	0.6740	0.6339	0.5296	0.7178	0.7423	0.5826	2
中苜1号(未诱变)Zhongmu No. 1 (unmutagenesis)	0.5833	0.2900	0.6696	0.3909	0.5050	0.7452	0.6001	0.7310	0.4518	0.5519	1
中苜1号(诱变)Zhongmu No. 1 (mutagenesis)	0.3241	0.0000	0.6741	0.2840	0.5713	0.4923	0.4369	0.6486	0.7179	0.4610	2
甘农3号(未诱变)Gannong No. 3 (unmutagenesis)	0.3796	0.3033	0.5893	0.1636	0.1070	0.2146	0.2053	0.2618	0.4286	0.2948	2
甘农3号(诱变)Gannong No. 3 (mutagenesis)	0.3194	0.3067	0.8036	0.2572	0.3916	0.3909	0.6266	0.2773	0.9982	0.4857	1
WL354(未诱变)WL354 (unmutagenesis)	0.1574	0.1867	0.5357	0.3086	0.1887	0.1665	0.2244	0.3735	0.8774	0.3354	1
WL354(诱变)WL354 (mutagenesis)	0.0417	0.5367	0.4286	0.1379	0.2283	0.2846	0.4820	0.2551	0.5982	0.3326	2
DS310FY(未诱变)DS310FY (unmutagenesis)	0.0046	0.4367	0.3884	0.4568	0.0583	0.1725	0.2536	0.0188	0.4869	0.2530	2
DS310FY(诱变)DS310FY (mutagenesis)	0.0000	0.5567	0.3482	0.4444	0.3102	0.5240	0.4466	0.0132	0.9256	0.3966	1
甘农6号(未诱变)Gannong No. 6 (unmutagenesis)	0.1296	0.4633	0.4866	0.2531	0.2046	0.1327	0.2286	0.3298	0.7595	0.3320	1
甘农6号(诱变)Gannong No. 6 (mutagenesis)	0.0972	0.4900	0.6161	0.0021	0.2931	0.0000	0.2224	0.2695	0.6077	0.2887	2
甘农4号(未诱变)Gannong No. 4 (unmutagenesis)	0.3657	0.3667	0.6384	0.1975	0.3512	0.6418	0.6159	0.5641	0.2750	0.4463	1
甘农4号(诱变)Gannong No. 4 (mutagenesis)	0.0787	0.4433	0.4598	0.1523	0.1554	0.2574	0.1833	0.3336	0.2548	0.2576	2
中苜3号(未诱变)Zhongmu No. 3 (unmutagenesis)	0.5046	0.5567	0.9688	0.7160	0.4538	0.5482	0.5814	0.6316	0.2899	0.5834	1
中苜3号(诱变)Zhongmu No. 3 (mutagenesis)	0.5556	0.4233	0.9554	0.4177	0.4486	0.4732	0.4339	0.4807	0.4720	0.5178	2
巨能7(未诱变)Juneng 7 (unmutagenesis)	0.2824	0.2633	0.3705	0.3827	0.4085	0.4152	0.3420	0.4738	0.3863	0.3694	2
巨能7(诱变)Juneng 7 (mutagenesis)	0.4907	0.7000	0.8750	0.6790	0.7677	0.8753	0.7086	0.6610	0.5327	0.6989	1
南苜501(未诱变)Nanmu 501 (unmutagenesis)	0.2593	0.5000	0.6429	0.1965	0.0000	0.1991	0.0196	0.0434	0.2732	0.2371	2
南苜501(诱变)Nanmu 501 (mutagenesis)	0.1343	0.6167	0.5357	0.1029	0.0220	0.2395	0.1432	0.0012	0.5292	0.2583	1
皇冠(未诱变)Huangguan (unmutagenesis)	0.4120	0.5933	0.8259	0.6996	0.4688	0.4542	0.3330	0.5510	0.6256	0.5515	2
皇冠(诱变)Huangguan (mutagenesis)	0.5139	0.7133	0.7723	0.7130	0.6364	0.5256	0.6009	0.7634	0.6643	0.6559	1
盐宝(未诱变)Yanbao (unmutagenesis)	0.5417	0.5400	0.5670	0.3673	0.3667	0.4168	0.4315	0.4002	0.4708	0.4558	2
盐宝(诱变)Yanbao (mutagenesis)	0.5000	0.5700	0.6161	0.6276	0.7605	0.5502	0.6685	0.7549	0.6756	0.6359	1
WL343(未诱变)WL343 (unmutagenesis)	0.3171	0.6100	0.3884	0.4516	0.3550	0.2812	0.2210	0.3473	0.3524	0.3693	2
WL343(诱变)WL343 (mutagenesis)	0.4861	0.5600	0.5580	0.4321	0.5465	0.4333	0.6330	0.5391	0.5762	0.5294	1
阿迪娜(未诱变)Adina (unmutagenesis)	0.0278	0.6833	0.1027	0.3230	0.1813	0.0780	0.0000	0.2440	0.2429	0.2092	2
阿迪娜(诱变)Adina (mutagenesis)	0.2083	0.4133	0.1339	0.3539	0.2830	0.1080	0.2183	0.0500	0.5274	0.2551	1

3 讨论

水分胁迫是限制植物生长发育与形态指标的重要因子^[15]。植物受到干旱胁迫时,常表现出叶片失水,甚至干枯死亡等现象,轻度的干旱胁迫会导致叶片萎蔫,严重时会使植物停止生长,甚至发生萎蔫干枯,且抗旱性不同的

材料对干旱的响应不同^[13]。本研究对14份太空诱变和14份未诱变紫花苜蓿材料用PEG-6000溶液进行胁迫,各试验材料植株叶片在不同浓度和时间呈现不同程度萎蔫,大部分材料在30%的PEG-6000溶液胁迫2 h感受到干旱胁迫,而皇冠和WL343的未诱变和诱变材料均在20%的PEG-6000溶液胁迫2 h感应干旱胁迫。陈奋奇等^[16]利用PEG模拟干旱胁迫环境,对23份紫花苜蓿种质材料苗期抗旱性进行评价,也得出不同的紫花苜蓿种质材料响应干旱胁迫程度不同,但不同的是其PEG-6000溶液胁迫浓度为15%,这可能与研究材料、材料来源及处理方法不同有关。本研究还发现,干旱胁迫处理不同程度地降低了各材料的叶面积、叶周长、叶长和叶宽等叶片形态特征指标。相关指标下降是由于干旱引起的叶片萎蔫所致,而不同材料的形态相关特征指标不一致也正是说明了不同的紫花苜蓿种质材料响应干旱胁迫的程度不同。韩瑞宏等^[17]研究表明,干旱胁迫下大部分苜蓿种质幼苗的苗长、根长、苗鲜重、苗干重等均受到不同程度的抑制,而对部分种质材料影响相对较小,本研究干旱胁迫降低了部分材料株高、基茎粗、根长和单株鲜重的结果与之相一致。此外,研究中有6份材料的根长和2份材料的单株鲜重经干旱胁迫后反而升高,这与张翠梅等^[18]的研究结果一致。分析可能是植物可通过增加根系长度等来抵抗干旱胁迫,说明不同苜蓿种质抵抗干旱胁迫的方式也不同。研究表明,植物的光合作用依赖于叶绿素对光能的吸收,干旱胁迫可使叶绿体超微结构被破坏,导致叶绿素合成减少,所以,植物叶绿素含量的变化一定程度上能够反映植物对干旱胁迫的抵抗力^[19]。陈力等^[20]研究表明,干旱胁迫显著降低了不同品种紫花苜蓿叶绿素含量,本研究大部分材料经干旱胁迫后,相对叶绿素含量升高与之不一致。对比分析发现,可能与干旱处理的程度有关,本研究利用PEG-6000溶液模拟干旱胁迫试验时间较短,植株幼苗短时间感应干旱胁迫,而上述研究采用自然干旱法,处理7 d后叶绿素含量显著降低。短时间的干旱胁迫下叶绿素的升高可能是其快速响应干旱胁迫的表现,而长时间的干旱可能使叶绿体超微结构被破坏,导致叶绿素含量下降。另有研究表明,适度的干旱条件可提高沙地云杉(*Picea mongolica*)的叶绿素含量^[21],这也正好说明了上述观点的可能性。

与农作物相比,草类植物的空间诱变育种相对滞后,但随着新型搭载工具的出现和农业科学的发展,草类植物太空诱变育种日益受到重视^[22-23]。徐云远等^[24]研究了空间诱变对红豆草(*Onobrychis viciaefolia*)、苜蓿和沙打旺(*Astragalus huangheensis*)3种牧草的影响。尹琼等^[25]对航天诱变黔草1号高羊茅(*Festuca arundinacea* Qiancao No. 1)形态多样性进行研究。本试验利用PEG-6000模拟干旱胁迫环境,对2020年载人航天飞船搭载的14份紫花苜蓿材料苗期生长指标进行了研究。结果表明,与未诱变材料相比,部分紫花苜蓿经太空诱变后,可缓解干旱胁迫导致相关生长指标的下降,并促进了相对叶绿素含量的升高,而部分材料结果相反。如巨能7诱变材料,干旱胁迫下其根长、单株鲜重、叶面积、叶周长和相对叶绿素含量等显著高于未诱变材料,太空诱变提高了植株抵抗干旱胁迫的能力。匡倩等^[26]研究表明,空间诱变提高了部分材料的叶长、叶面积、叶重、分枝数等指标,本研究结果与之一致。但本研究中,干旱胁迫后的诱变材料中,甘农4号叶面积、叶周长和叶长,甘农6号单株鲜重, WL354叶宽和相对叶绿素含量均显著低于其未诱变材料,说明太空诱变具有随机性,可以出现有利的变异,也可出现不利的变异。胡洁等^[27]对紫羊茅(*Festuca rubra*)空间诱变SP₁代单株材料田间农艺性状的变异进行分析,发现空间搭载后紫羊茅出苗率明显高于对照组,但植株变矮且叶长明显低于对照。隶属函数法是对植物抗性进行综合评价的有效方法之一。侯瑞虹等^[28]使用隶属函数法筛选出耐旱性更强的紫花苜蓿种质资源。本研究利用隶属函数法综合分析得出,干旱胁迫下,甘农3号、DS310FY、巨能7、南苜501、皇冠、盐宝、WL343和阿迪娜这8份材料的太空诱变材料生长指标综合评价较其未诱变材料高,说明从生长指标来看,这8份材料经太空诱变后耐旱性能得到提升。

4 结论

在本试验条件下,经PEG-6000干旱胁迫后,甘农3号、DS310FY、巨能7、南苜501、皇冠、盐宝、WL343和阿迪娜这8份材料的太空诱变材料生长指标综合评价较其未诱变材料高,说明从生长指标来看,这8份材料经太空诱变后耐旱性能得到提升。

参考文献 References:

- [1] Chen H Y, Huang R, Zhao L, *et al.* Effects of Cp2-EPS on the morphology and photosynthesis characteristics of alfalfa seedlings under salt stress. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(1): 229–238.
陈海雁, 黄荣, 赵亮, 等. Cp2-EPS对盐胁迫下紫花苜蓿苗期形态及光合特性的影响. *草地学报*, 2024, 32(1): 229–238.
- [2] Fu C M. Effect of spatial mutagenesis on drought resistance of *Medicago sativa* Deqin. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2023.
伏春美. 空间诱变对德钦紫花苜蓿抗旱性的影响. 昆明: 云南农业大学, 2023.
- [3] Yang H S, Wang Y R, Chang G Z, *et al.* A study on the space mutation of forages. *Chinese Journal of Grassland*, 2015, 37(1): 104–110.
杨红善, 王彦荣, 常根柱, 等. 牧草的航天诱变研究. *中国草地学报*, 2015, 37(1): 104–110.
- [4] Yang H S. Breeding of a new alfalfa variety with multifoliate traits by space mutation. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.
杨红善. 航天诱变多叶紫花苜蓿新品种选育研究. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [5] Ren W B, Wang M, Chen L B, *et al.* Effects of spaceflight on seed germination and seedling growth for different alfalfa lines. *Seed*, 2009, 28(1): 1–2, 6.
任卫波, 王蜜, 陈立波, 等. 卫星搭载对不同品系紫花苜蓿种子萌发及其幼苗生长的影响. *种子*, 2009, 28(1): 1–2, 6.
- [6] Zhang L Q, Jia X H, Zhao J W. Effects of PEG simulated drought stress on seed germination and seedling growth of alfalfa. *Molecular Plant Breeding*, 2020, 18(11): 3759–3764.
张立全, 贾旭慧, 赵静玮. PEG模拟干旱胁迫对紫花苜蓿种子发芽及幼苗生长的影响. *分子植物育种*, 2020, 18(11): 3759–3764.
- [7] Zeng Z T. Germination ability of 3 alfalfa under drought stress and response of alfalfa growth. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018.
曾泽堂. 模拟干旱胁迫环境下3种紫花苜蓿的萌芽能力与紫花苜蓿生长. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- [8] Hui Z L, Li Z L, Liu W Y, *et al.* Effects of seed soaking in fulvic acid solution on seed germination and seedling growth in *Medicago sativa* under PEG simulated drought stress. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2013, 33(8): 1621–1629.
回振龙, 李自龙, 刘文瑜, 等. 黄腐酸浸种对PEG模拟干旱胁迫下紫花苜蓿种子萌发及幼苗生长的影响. *西北植物学报*, 2013, 33(8): 1621–1629.
- [9] 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.
- [10] Li H X, Ye Z B, Liao X Y, *et al.* Effect of microgravity in the space on the growth and development of tomato. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 1994(3): 310–312.
李汉霞, 叶志彪, 廖祥云, 等. 空间微重力处理对番茄生长发育的影响. *华中农业大学学报*, 1994(3): 310–312.
- [11] Li S J, Zhu Y P, Sun K M, *et al.* The present status and prospect of space breeding in China. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005(1): 159–162.
李世娟, 诸叶平, 孙开梦, 等. 中国太空育种现状及其前景展望. *中国农学通报*, 2005(1): 159–162.
- [12] Li J, Ren W B, Guo H Q, *et al.* Effect of space flight factors on the peroxidase polymorphism and its activity of alfalfa. *Seed*, 2012, 31(4): 46–48.
李晶, 任卫波, 郭慧琴, 等. 空间诱变对紫花苜蓿过氧化物同工酶影响. *种子*, 2012, 31(4): 46–48.
- [13] Li Q. Identification of drought tolerance and expression analysis of related genes in seedlings of *Medicago falcata*. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2018.
李倩. 黄花苜蓿苗期耐旱性鉴定及相关基因表达分析. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2018.
- [14] Wang J Y, Xu W N, Su Y, *et al.* Effects of drought stress on drought resistance of different *Medicago falcata* L. germplasm at seedling stage. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2023, 51(11): 14–24.
王江银, 徐婉宁, 苏洋, 等. 干旱胁迫对不同苜蓿种质苗期抗旱性的影响. *贵州农业科学*, 2023, 51(11): 14–24.
- [15] Wu J X, Zeng R Q, Yin H L, *et al.* Mechanisms of plant response to water stress. *Modern Agricultural Research*, 2024, 30(10): 64–68.
吴佳芯, 曾冉琦, 尹会兰, 等. 植物对水分胁迫的响应机制. *现代农业研究*, 2024, 30(10): 64–68.
- [16] Chen F Q, Ha X, Li Y J, *et al.* Evaluation of drought resistance of 23 alfalfa germplasm materials during seedling stage under

- PEG simulated drought stress. Grassland and Turf, 1—11 [2024-10-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1156.s.20240620.1602.012.html>.
- 陈奋奇, 哈雪, 李亚君, 等. PEG模拟干旱胁迫下23份紫花苜蓿种质材料苗期抗旱性评价. 草原与草坪, 1—11[2024-10-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1156.s.20240620.1602.012.html>.
- [17] Han R H, Jiang C, Dong Z X, *et al.* Comprehensive evaluation of drought resistance of 47 *Medicago* germplasm materials under drought stress. Chinese Journal of Grassland, 2017, 39(4): 27—35.
韩瑞宏, 蒋超, 董朝霞, 等. 47份苜蓿种质材料抗旱性综合评价. 中国草地学报, 2017, 39(4): 27—35.
- [18] Zhang C M, Shi S L, Liu Z, *et al.* Effects of drought stress on the root morphology and anatomical structure of alfalfa (*Medicago sativa*) varieties with differing drought-tolerance. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(5): 79—89.
张翠梅, 师尚礼, 刘珍, 等. 干旱胁迫对不同抗旱性苜蓿品种根系形态及解剖结构的影响. 草业学报, 2019, 28(5): 79—89.
- [19] Nan S R, Luo Y Z, Yu S M, *et al.* Effects of rewatering after drought stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of *Medicago sativa* cv. xingjiangdaye seedlings. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(5): 1141—1149.
南思睿, 罗永忠, 于思敏, 等. 干旱胁迫后复水对新疆大叶苜蓿幼苗光合和叶绿素荧光的影响. 草地学报, 2022, 30(5): 1141—1149.
- [20] Chen L, Wang J, Qiu X, *et al.* Difference of physiological responses and transcriptional regulation of alfalfa with different drought tolerances under drought stress. Acta Agronomica Sinica, 2023, 49(8): 2122—2132.
陈力, 王靖, 邱晓, 等. 不同耐旱性紫花苜蓿干旱胁迫下生理响应和转录调控的差异研究. 作物学报, 2023, 49(8): 2122—2132.
- [21] Zou C J, Han S J, Xu W D, *et al.* Eco-physiological responses of *Picea mongolica* ecotypes to drought stress. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(9): 1446—1450.
邹春静, 韩士杰, 徐文铎, 等. 沙地云杉生态型对干旱胁迫的生理生态响应. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1446—1450.
- [22] Hu H G, Liu J X, Guo H L. Spaceflight mutation breeding of China and its application in grass. Acta Prataculturae Sinica, 2006, 15(1): 15—21.
胡化广, 刘建秀, 郭海林. 我国植物空间诱变育种及其在草类植物育种中的应用. 草业学报, 2006, 15(1): 15—21.
- [23] Zhang Y W, Han J G, Ren W B, *et al.* Breeding by spaceflight mutagenesis and its application in forage breeding. Pratacultural Science, 2005, 22(10): 59—63.
张蕴微, 韩建国, 任卫波, 等. 植物空间诱变育种及其在牧草上的应用. 草业科学, 2005, 22(10): 59—63.
- [24] Xu Y Y, Jia J F, Niu B T. The influences of space condition on three legume forages. Chinese Journal of Space Science, 1996, 16(S1): 136—141.
徐云远, 贾敬芬, 牛炳韬. 空间条件对3种豆科牧草的影响. 空间科学学报, 1996, 16(S1): 136—141.
- [25] Yin Q, Wu J H, Chen C. The study on the morphological diversity of Qiancao No. 1 *Festuca arundinacea* with space mutation. Tillage and Cultivation, 2022, 42(4): 20—23.
尹琼, 吴佳海, 陈超. 航天诱变黔草1号高羊茅形态多样性研究. 耕作与栽培, 2022, 42(4): 20—23.
- [26] Kuang Q, Zong Y Q, Yang W, *et al.* The impact of spatial mutagenesis on agronomic traits and nutrient quality of Deqin alfalfa. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(6): 1962—1967.
匡倩, 宗亚倩, 杨文, 等. 空间诱变对‘德钦’紫花苜蓿农艺性状和营养品质的影响. 草地学报, 2024, 32(6): 1962—1967.
- [27] Hu J, Shi F L, Gao C P. Variation analysis of single plant agronomic traits of space-induced mutant SP₁ in *Festuca rubra*. Chinese Journal of Grassland, 2022, 44(8): 46—51.
胡洁, 石凤翎, 高翠萍. 紫羊茅空间诱变SP₁代单株材料田间农艺性状的变异分析. 中国草地学报, 2022, 44(8): 46—51.
- [28] Hou R H, Du K, Huang W Y, *et al.* Evaluation of 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.