

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.09.003

引用格式:温昊,王晓荣,侯波,等.杂交狼尾草重离子辐射诱变体系及耐寒种质筛选[J].草地学报,2026,34(9):3164—3171
WEN Hao, WANG Xiao-rong, HOU Bo, et al. Heavy-Ion Radiation Mutagenesis System and Screening of Cold-Tolerant Germplasm in Hybrid *Pennisetum*[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(9):3164—3171

杂交狼尾草重离子辐射诱变体系及耐寒种质筛选

温昊,王晓荣,侯波,陈曦,张蕴薇,倪成成,毕晓静*

(中国农业大学草业科学与技术学院,北京100193)

摘要:杂交狼尾草(*Pennisetum glaucum* × *P. purpureum*)是重要的高产优质牧草,但耐寒性差,限制了其在北方及高纬度地区的推广应用。重离子是一种较新型的诱变源,在牧草育种中的应用尚不多。本研究以杂交狼尾草‘邦得1号’种子为材料,设50,100,150,200,300 Gy重离子辐射处理,系统分析苗期生长表型及低温胁迫下生理指标,进行综合评价。旨在探讨其诱变效应,建立狼尾草种子重离子辐射诱变技术体系,创制耐寒新种质。结果显示,重离子辐射对杂交狼尾草表现出明显剂量效应,其中100 Gy处理下能在保证成苗率的同时显著提高可溶性糖含量和超氧化物歧化酶、过氧化物酶活性,降低膜损伤水平,半致死温度最低,表现出最优耐寒性并且诱变效率较高。本研究通过实验室和大田2个尺度、结合主成分分析、隶属函数分析、田间存活率和大田越冬率等多个维度综合评价,筛选出3株诱变当代潜在耐寒突变体。

关键词:杂交狼尾草;重离子辐射;诱变育种;耐寒种质;诱变技术体系

中图分类号:S543.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)09-3164-08

Heavy-Ion Radiation Mutagenesis System and Screening of Cold-Tolerant Germplasm in Hybrid *Pennisetum*

WEN Hao, WANG Xiao-rong, HOU Bo, CHEN Xi, ZHANG Yun-wei, NI Cheng-cheng, BI Xiao-jing*

(College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Hybrid *Pennisetum* (*Pennisetum glaucum* × *P. purpureum*) is an important high-yield and high-quality forage grass; however, its poor cold tolerance restricts its cultivation and utilization in northern and high-latitude regions. Heavy-ion irradiation is a relatively new mutagenic approach and has been rarely applied in forage breeding. In this study, seeds of the hybrid *Pennisetum* cultivar ‘Bangde No. 1’ were treated with heavy-ion irradiation at doses of 50, 100, 150, 200, and 300 Gy. Seedling growth traits and physiological responses under low-temperature stress were systematically evaluated to investigate the mutagenic effects of heavy-ion irradiation, establish a heavy-ion mutagenesis system for hybrid *Pennisetum* seeds, and develop novel cold-tolerant germplasm. The results showed that heavy-ion irradiation exerted a clear dose-dependent effect on hybrid *Pennisetum*. Among the treatments, 100 Gy not only maintained a high seedling establishment rate but also significantly increased soluble sugar content and the activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD), reduced membrane damage, and resulted in the lowest semi-lethal temperature (LT₅₀) of plant mutants, indicating the strongest cold tolerance and relatively high mutagenic efficiency. Based on a comprehensive evaluation integrating laboratory and field assessments, principal component analysis, membership function analysis, field survival rate, and field overwintering rate, three potential cold-tolerant mutants were identified from the M₁ generation.

Key words: Hybrid *Pennisetum*; Heavy-ion irradiation; Mutation breeding; Cold-tolerant germplasm; Mutagenesis system

杂交狼尾草(*Pennisetum glaucum* × *P. purpureum*)是由美洲狼尾草与象草种间杂交育成的多年

生牧草,兼具高产、再生能力强和适口性好等优良特性,是我国热带亚热带地区重要的优质饲用牧草

收稿日期:2026-04-17;修回日期:2026-06-08

作者简介:温昊(1998-),男,汉族,内蒙古呼和浩特人,博士研究生,主要从事草地植物育种研究,E-mail:13664748968@163.com;*通信作者
Author for correspondence, xiaojing.bi@cau.edu.cn

之一^[1]。开展其耐寒性育种,拓展自然越冬区域,有助于进一步扩大其应用范围。然而杂交狼尾草品种遗传背景相对单一^[2],新种质创制是育种工作中的难点。辐射诱变育种是能够在较短周期内诱导遗传变异、提高种质多样性的有效方法。相较于传统辐射方式,重离子辐射具有线性能量传递高、诱变效率高和突变类型丰富等特点,在多种作物遗传改良中展现出良好应用潜力^[3-4]。例如通过对水稻(*Oryza sativa* L.)种子进行重离子辐射处理,获得了多株耐旱性较强的突变体^[5];在小麦(*Triticum aestivum* L.)中,利用重离子辐射诱变获得了一批抗盐碱能力显著增强的突变体^[6];在番茄(*Solanum lycopersicum* L.)育种中,通过重离子辐射诱导获得了具有更强低温耐受性的突变体^[7]。但是,目前重离子诱变在牧草中的研究较少,尤其在狼尾草属中,围绕适宜辐射剂量、生物学效应响应规律及突变材料创制效率等方面尚缺乏系统研究,相关诱变技术体系仍未建立。上述不足在一定程度上限制了重离子辐射在牧草种质创新中的应用,也使杂交狼尾草耐寒育种缺少高效的技术支撑。

基于此,本研究以‘邦得1号’杂交狼尾草种子为诱变材料,设置不同剂量重离子辐射处理,系统评估发芽期和苗期的诱变效应,旨在建立狼尾草种子重离子辐射诱变技术体系,创制耐寒变异材料。

1 材料与方法

1.1 实验材料与重离子辐射处理

本研究以杂交狼尾草品种‘邦得1号’成熟干种子为试验材料,选取籽粒饱满、大小一致且无机械损伤的种子作为诱变材料。辐照前,种子保持干燥状态,未进行浸种或催芽处理。诱变装置为HIRFL,离子种类为碳离子($^{12}\text{C}^{6+}$)。辐射剂量分别为0, 50, 100, 150, 200, 300 Gy。初始能量为80.55 MeV $\cdot\text{u}^{-1}$,剂量率为60 Gy $\cdot\text{min}^{-1}$ 。CK组种子不接受辐照处理,但与辐照组种子经历相同的包装、运输、放置和保存条件,以保证除辐照剂量外其他处理条件一致。种子置于种子贮藏柜中保存备用。M1代植株用于种苗生理指标测定,其扦插无性系(C1)用于田间存活率及后续越冬鉴定。

1.2 种子发芽与苗期性状测定方法

采用直径90 mm培养皿进行种子发芽试验。每

皿铺设双层滤纸,并加入适量无菌蒸馏水保持湿润。每个辐射剂量处理设置4次重复,每重复50粒种子。将种子置于人工气候箱中培养,培养条件为25℃,光照/黑暗周期8 h/16 h,相对湿度60%,光照强度为12 000 Lux。发芽过程中每日观察种子萌发情况,并根据滤纸湿润程度补充无菌蒸馏水。发芽7 d后统计发芽率,并测定胚根长和胚芽长等发芽相关指标^[8]。

随后,将各处理萌发一致、生长状态相近的幼苗移栽至营养钵中,在25℃条件下继续培养1个月,统计幼苗成活率并测定苗期生长指标。采用直尺测量株高,测量基准为植株基部至最高叶尖的自然垂直高度;采用游标卡尺测定基部直径,测定幼苗基部上方约2 cm处由叶鞘包裹形成的假茎直径;叶片长度与宽度均选取植株自上而下第2片完全展开的功能叶测定;叶长测量叶颈至叶尖长度,叶宽测量该叶片中部最宽处^[9-10]。

1.3 冷胁迫处理及生理指标测定

(1)冷胁迫处理:

种苗置于人工气候箱中培养,培养条件与种子发芽条件相同。培养45 d后,将材料分为对照组和冷胁迫组,对照组继续在正常条件下培养2 d,冷胁迫组在4℃条件下处理2 d^[11]。

(2)相对电导率和半致死温度测定:

取新鲜叶片剪成等长小段,置于去离子水中测定初始电导率,沸水浴后冷却测定终止电导率,以二者比值表示相对电导率^[12]。

半致死温度(Lethal temperature of 50%, LT_{50})测定时,选取各辐射剂量处理下生长状态一致、叶龄一致的45日龄植株,采集同一叶位的完全展开功能叶,分别置于2, 0, -2, -4, -6和-8℃条件下进行低温处理。各温度处理结束后,按照上述方法测定叶片相对电导率,并以处理温度为自变量,相对电导率为因变量进行Logistic方程拟合:

$$y = \frac{K}{1 + ae^{-bx}}$$

根据拟合曲线拐点对应的温度计算半致死温度 LT_{50} ^[13]:

$$LT_{50} = \frac{\ln a}{b}$$

(3)叶绿素含量测定:取自顶端向下第1片完全展开叶0.05 g,采用分光光度法测定^[14]。

(4)其他生理指标测定:可溶性糖含量、脯氨酸含量、超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)

活性和过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性的测定均取自植株顶端向下第1片完全展开叶,并采用苏州科铭生物技术有限公司试剂盒,按说明书操作。

1.4 田间生理指标和存活率测定

将植株扦插扩繁,形成无性C1代,于2024年9月15日移栽至试验地点,试验地点位于河北省涿州市中国农业大学实验站(39°29' N, 115°59' E),属典型温带大陆性季风气候。年均温度11.6℃,极端温差达32.0℃(1月均温-5.2℃,7月均温26.8℃),年均降水量(600±20)mm。扦插移栽后及时浇透定根水,后续进行常规田间管理,保持土壤适宜水分,并及时清除杂草。于扦插移栽后30 d进行生理指标测定,用试剂盒测定超氧化物歧化酶活性、可溶性糖含量。另外,10月夜间气温为4~8℃,受低温影响,扦插材料地上部完全枯死、基部坏死的植株判定为死亡。田间存活率按成活株数占移栽总株数的百分比计算,并筛选不同剂量处理下田间存活率大于CK的株系为候选耐寒材料^[15]。

1.5 耐寒性综合评价与统计分析方法

基于冷胁迫后测定的相对电导率、可溶性糖含

量及抗氧化酶活性等指标,对不同处理植株耐寒性进行综合评价。采用Excel 2010整理数据,SPSS 27.0进行显著性分析、主成分分析和隶属函数分析^[16],根据各指标隶属函数值计算综合评价D值,并据此进行耐寒性评价和指标筛选。

1.6 越冬性鉴定

将成活率和D值都高于CK的植株标记为耐寒潜力再生苗,于2025年5月13日将所有植株从涿州移栽至重庆山王坪试验基地(29°10' N, 107°36' E, 海拔1362.33 m, 年均温16.6℃, 2026年1月最低气温-6℃)。翌年春季能够返青并产生分蘖的材料被鉴定为耐寒新种质。

2 结果与分析

2.1 重离子辐射对杂交狼尾草种子萌发与种苗生长的影响

随着重离子辐射剂量的增加,植株生长表型有所差异,但整体差异不大,种子发芽相关指标总体呈下降趋势。与对照(CK)相比,150,200和300 Gy处理下发芽率显著下降(图1)。

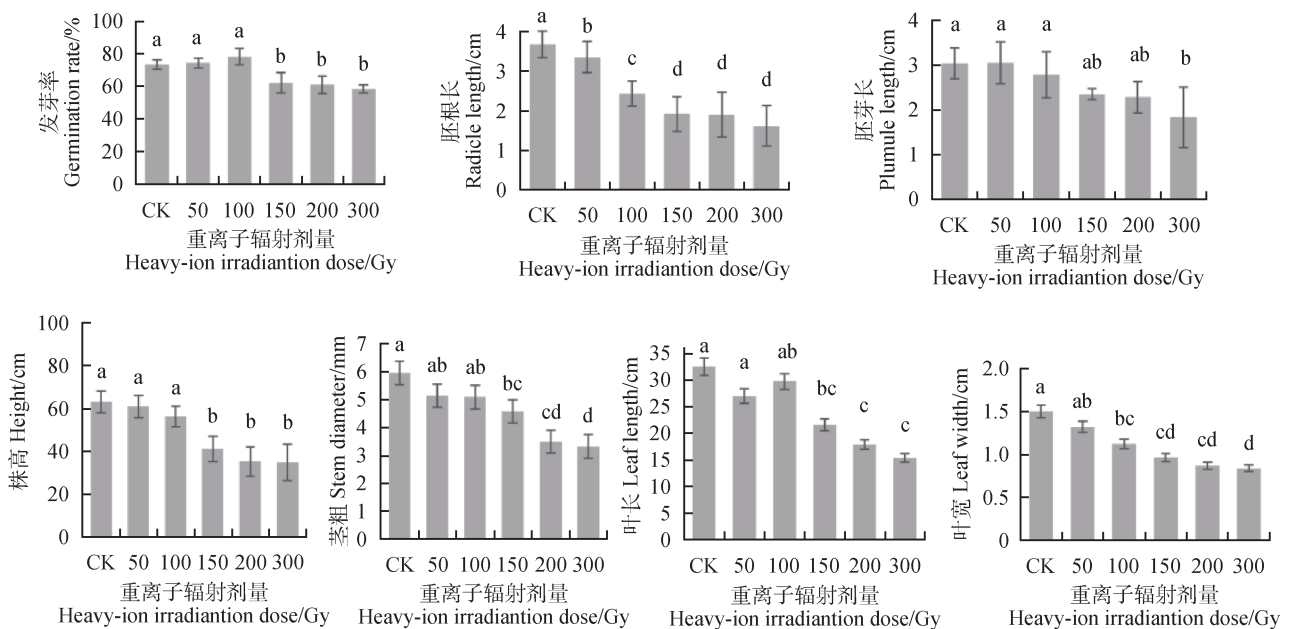


图1 不同辐射剂量下杂交狼尾草发芽率与种苗生长

Fig. 1 Germination rate and seedling phenotypes of hybrid *Pennisetum* under different radiation doses

注:CK为未经重离子辐射处理的对照;不同小写字母表示同一指标不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同

Note: CK, non-irradiated control; different lowercase letters indicate significant differences among treatments for the same trait at $P < 0.05$. The same as below

重离子辐射对胚根与胚芽生长均表现出抑制作用(图1)。各辐射剂量处理下胚根长度均显著低于对

照,且高剂量处理的抑制效应显著强于低剂量处理。胚芽长度随辐射剂量增加而呈递减趋势;300 Gy处

理下胚芽长为对照的60%,与对照差异显著。

相较于对照,50 Gy与100 Gy处理对种苗株高、茎粗、叶长与叶宽影响幅度较小,150~300 Gy处理下,4项指标均显著低于对照(图1)。

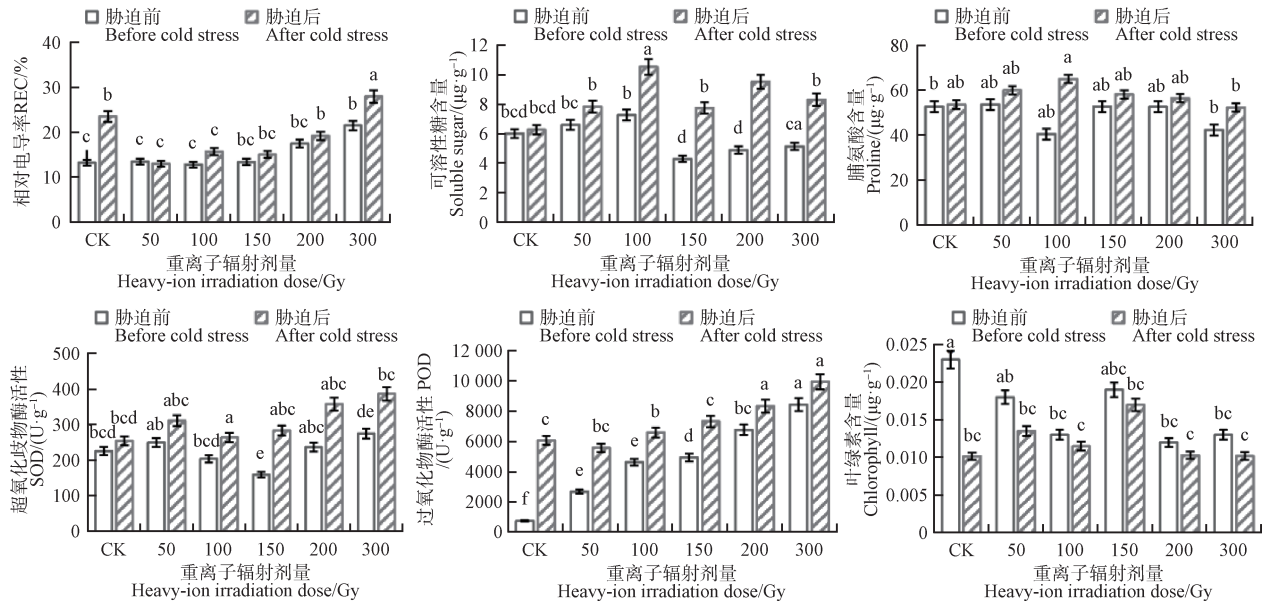


图2 冷胁迫对不同辐射剂量下‘邦得1号’杂交狼尾草生理指标的影响

Fig. 2 Effects of cold stress on physiological indices of 'Bangde No. 1' hybrid *pennisetum* under different radiation doses

冷胁迫后,除叶绿素外,所有处理组指标相较于胁迫前呈上升趋势,其中冷胁迫后CK的电导率显著高于胁迫前,而其他处理组变化幅度较小。另外,不同处理组的耐寒生理指标都高于冷胁迫前,其中CK的变化幅度较小,而经过重离子辐射处理的植株变化相对较大。

冷胁迫后,50和100 Gy的相对电导率显著低于CK,而300 Gy显著高于CK。可溶性糖含量在100 Gy下显著高于CK。100,150和200 Gy处理下植株可溶性糖含量显著高于冷胁迫前,其中100 Gy处理冷胁迫后可溶性糖含量最高,为10.54 μg·g⁻¹。冷胁迫后的脯氨酸含量在100 Gy时最大,为67.59 μg·g⁻¹。

不同辐射剂量下,冷胁迫后的叶绿素含量相较于胁迫前都有所降低,其中100 Gy重离子诱变后降幅最小,为12.03%。

抗氧化酶系统方面,在正常情况下,SOD活性在150 Gy下显著降低,而POD活性随着辐射剂量的增加呈逐渐升高的趋势。4℃冷胁迫处理后,SOD和POD活性均增加,SOD活性在100 Gy下为264.09 U·g⁻¹,相较于对照显著增加(P < 0.05),POD活性整体随辐射剂量升高而升高,在100,200和300 Gy下显著高于冷胁迫前(P < 0.05)。

2.2 冷胁迫下不同辐射剂量植株的生理响应

如图2所示,冷胁迫前,随着辐射剂量的增加,相对电导率增高;300 Gy下可溶性糖含量低于CK,脯氨酸含量也低于CK。

2.3 不同辐射剂量下半致死温度测定

为了进一步验证100 Gy为最适宜的辐射剂量,我们对苗期不同辐射剂量的植株进行半致死温度测定(图3),测定结果显示,CK半致死温度为-6.76℃,50 Gy和150 Gy处理下,半致死温度约为-9℃,而在100 Gy处理下,半致死温度最低,为-12.73℃,更耐寒。

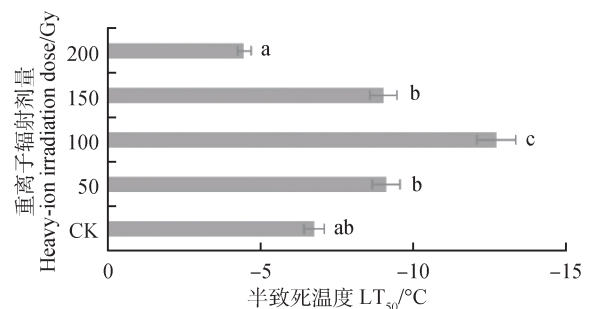


图3 不同辐射剂量处理下‘邦得1号’杂交狼尾草半致死温度(LT₅₀)

Fig. 3 LT₅₀ of 'Bangde No. 1' hybrid *pennisetum* under different irradiation doses

综上,通过对不同剂量下前期种子萌发、种苗生长表型、生理指标以及半致死温度的测定发现,50~100 Gy对种子发芽抑制最小;50,100,150 Gy

诱变效率较高;综合生理指标在 100~150 Gy 下优于对照;半致死温度在 100 Gy 下最低。

2.4 基于多指标综合评价的耐寒种质筛选

为了比较不同剂量的诱变效率,进行了大田表型测定。结合苗期生理指标主成分分析、隶属函数分析和田间扦插苗存活率三个维度进行比较,同时满足三个维度都大于 CK 的为耐寒潜力株。

2.4.1 主成分分析筛选耐寒材料 通过对不同剂量下冷胁迫后的植株生理指标进行主成分分析发现,第一主成分贡献率为 79.980%,载荷较大的生理指标为 SOD,POD,可溶性糖和脯氨酸。结合生理指标实验数据,主成分分析结果显示,SOD,可溶性糖对 F_1 贡献较大,为 0.98 和 0.972,对植株的耐寒性贡献较大,因此 SOD 和可溶性糖可作为筛选耐寒材料的主要指标(表 1)。

表 1 因子载荷与方差贡献率

Table 1 Factor loading matrix

成分 Component	F_1 (方差贡献率	F_2 (方差贡献率	F_3 (方差贡献率
	Variance contribution: 79.980%)	Variance contribution: 16.097%)	Variance contribution: 3.818%)
超氧化物歧化酶 SOD	0.980	0.019	0.096
过氧化物酶 POD	0.954	0.051	-0.247
可溶性糖 Soluble sugar	0.972	0.112	-0.035
相对电导率 REC	-0.651	0.743	-0.016
脯氨酸 Proline	0.852	-0.456	-0.164
叶绿素 Chlorophyll	-0.069	-0.131	0.987
相对含水量 RWC	0.233	0.95	-0.186

由于重离子诱变产生的变异具有随机性和个体差异性,本研究在完成不同剂量处理群体平均水平分析后,进一步对各剂量处理中的单株再生后代进行测定,以筛选具有优良耐寒性状的变异个体。如图 4 所示,100-6,150-9,100-1,200-4,100-7,200-7

的 SOD 活性显著高于对照($P<0.05$)。100-7,200-6,200-9,100-8,200-8,50-9,300-3 的可溶性糖含量显著高于对照($P<0.05$)。其中 200-7 的 SOD 活性最大,为 $583.95 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$,300-3 的可溶性糖含量最高,为 $28.64 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

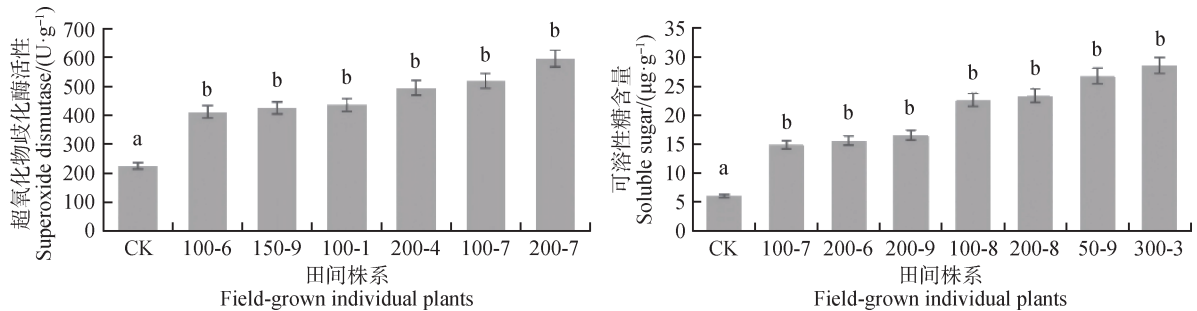


图 4 杂交狼尾草候选耐寒材料超氧化物歧化酶、可溶性糖含量

Fig. 4 Superoxide dismutase activity and soluble sugar content of ‘Bangde No. 1’ hybrid *pennisetum* mutants

注:100-6、150-9 等编号分别表示对应辐射剂量处理获得的候选单株,其中前者表示重离子辐射剂量(Gy),后者表示单株编号

Note: Codes such as 100-6 and 150-9 represent candidate individual plants, where the first number indicates the heavy-ion irradiation dose (Gy) and the second number indicates the individual plant number

2.4.2 隶属函数与田间存活率筛选耐寒材料 对田间杂交狼尾草生理指标进行测定并分析隶属函数,以综合评价值 D 值对辐射材料进行耐寒性排序, D 值越大表示其耐寒性越强。对照的 D 值为 0.370,由表 2 可知,共有 15 株狼尾草材料 D 值大于 CK。

为全面、准确评价各材料的耐寒性,在经历自然低温胁迫后 1 个月,对移栽植株的存活株数、半枯

萎株数和死亡株数进行统计,并调查其生长状况。由表 2 可知,100-7 的存活率最高,为 77.78%,对照组存活率为 50%,共有 15 株存活率比对照值高,可能为候选耐寒植株(表中为部分株系存活率)。

在 D 值高于 CK 的候选材料中,100 Gy 处理材料占比最高,为 46.67%,表明该剂量处理更有利于诱导耐寒相关正向变异,是杂交狼尾草耐寒材料创制的较适宜剂量。综合隶属函数 D 值和大田扦插

表 2 不同重离子辐射剂量处理下杂交狼尾草隶属函数 D 值与存活率

Table 2 Factor scores and attribute function values of hybrid *Pennisetum* under different heavy-ion irradiation doses

材料编号 Material ID	隶属函数综合评价 D 值 Comprehensive evaluation (D value)	排序 Rank	平均存活率 Mean survival rate	存活率排序 Survival rate rank
200-9	0.762	1	23.00%	19
200-4	0.751	2	60.00%	6
100-8	0.669	3	57.14%	9
100-6	0.584	4	66.67%	2
100-9	0.553	5	53.33%	15
100-10	0.526	6	66.67%	3
200-6	0.517	7	60.00%	7
100-1	0.495	8	55.00%	12
100-7	0.483	9	77.78%	1
300-3	0.482	10	32.00%	18
150-9	0.479	11	54.16%	13
200-8	0.461	12	20.23%	20
50-9	0.442	13	62.50%	5
100-3	0.416	14	56.25%	11
200-7	0.394	15	36.89%	17
CK	0.37	16	50.00%	16

注: D 值为基于隶属函数分析计算得到的综合评价, D 值越大表示材料综合耐寒性越强; CK 为未经重离子辐射处理的对照; 100-8 等编号表示对应重离子辐射剂量处理获得的单株, 其中前者表示辐射剂量(Gy), 后者表示单株编号。表中仅列出 D 值高于 CK 的 15 份材料以及其存活率

Note: D value represents the comprehensive evaluation value calculated by the membership function analysis, and a higher D value indicates stronger cold tolerance. CK represents the non-irradiated control. Codes such as 100-8 indicate individual plants derived from different heavy-ion irradiation treatments, where the first number represents the irradiation dose (Gy) and the second number represents the individual plant number. Only the 15 materials with D values higher than that of CK and their corresponding survival rates are presented in the table

存活率大于 CK 的数据, 共有 50-9, 100-1, 100-3, 100-6, 100-7, 100-8, 100-9, 100-10, 150-9, 200-4, 200-6 等 11 株材料为候选耐寒材料。

100-7, 100-8, 150-9, 200-4 和 200-6 共 8 株材料表现均优于 CK, 可作为候选耐寒材料用于后续越冬鉴定(图 5)。

2.4.3 越冬鉴定耐寒新种质 将筛选得到的 8 株具有耐寒潜力的材料以及它们扦插获得的材料于 2025 年 5 月 13 日移栽至重庆高海拔山区。耐寒潜力株无性扩繁后代 C1 田间管理方式与涪州大田相同, 所有材料分蘖数在 25~64 之间, 其中, 150-9 分蘖最多, 为 64, 200-6 最少, 为 25。

返青测定时间为翌年 4 月越冬后, 20 株 CK 植株全部枯黄, 无植株返青, 而 3 份种质生出新分蘖, 为耐寒种质, 编号分别为 50-9, 100-8 与 150-9。三者返青期均为四月中旬, 50-9 最先返青(图 6)。

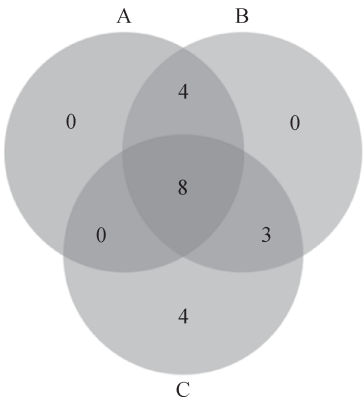


图 5 三维度筛选耐寒材料韦恩图

Fig. 5 Venn diagram of cold-tolerant mutants identified through three-dimensional screening

注: A 为 PCA 指标显著大于 CK 的株数; B 为隶属函数综合评价 D 值显著大于 CK 的株数; C 为存活率显著大于 CK 的株数

Note: A, number of plants with PCA scores significantly higher than CK; B, number of plants with membership-function comprehensive evaluation D values significantly higher than CK; C, number of plants with survival rates significantly higher than CK

综合主成分分析、隶属函数分析和田间扦插苗存活率 3 个维度的筛选结果表明, 50-9, 100-1, 100-6,

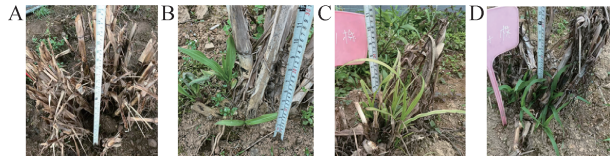


图 6 越冬后 3 份新种质返青表现

Fig. 6 Overwintering regrowth performance of three new germplasm accessions

注: A 为对照 CK; B 为 50-9; C 为 100-8; D 为 150-9

Note: A, control (CK); B, 50-9; C, 100-8; D, 150-9

3 讨论

3.1 重离子辐射对植株表型生理诱变效应

重离子辐射的诱变效应具有显著的剂量依赖性,其本质在于不同水平的辐射能量沉积对植物细胞遗传结构和生理稳态产生差异化影响^[17]。已有研究表明,在多种植物中,随着辐射剂量增加,种子萌发、幼苗成活率及营养生长通常呈现由轻度刺激或弱抑制向显著抑制转变的规律。例如,在拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)中,50 Gy重离子辐射可提高萌发指数,而200 Gy则显著抑制幼苗生长^[18];在藏黄连(*Coptis teeta*)和水稻等植物中,重离子辐射同样表现出对株高和早期生长的剂量依赖性抑制效应^[19]。本研究结果显示,重离子辐射对杂交狼尾草种苗生长亦具有明显的剂量效应,主要表现为50 Gy低剂量处理影响较小,100~150 Gy中等剂量处理能够诱导较为明显的变异,而200 Gy及以上高剂量处理则对生长产生显著抑制作用。这一结果与前人关于重离子辐射生物学效应的研究结论总体一致^[20]。

另一方面,适宜的重离子辐射剂量往往能够维持较高的存活率,并获得有利变异,从而为性状改良提供材料基础。已有研究报道,在诱变后代抗逆材料筛选中,常以胁迫条件下发芽率、存活状态或生长表现优于野生型为候选突变体初筛依据^[15]。采用低能氮离子束处理泰国香米可获得抗旱突变体^[5];在大豆(*Glycine max*)中,碳离子束于100~140 Gy剂量范围内可诱导丰富的表型和生理变异,并提高抗氧化相关酶活性^[21]。本研究结果表明,100 Gy处理组植株表现出较强的糖积累能力,显示出较好的耐寒适应性。适宜的诱变剂量不仅能决定诱变材料的存活率和变异程度,也是获得耐寒正向变异的关键前提。可溶性糖是植物低温胁迫响应中的重要渗透调节物质,其积累有助于维持细胞渗透平衡、稳定膜系统并减轻低温伤害^[22]。在100 Gy诱变处理下,植株抗氧化酶活性、可溶性糖含量明显提高,提示其具有较强的抗氧化和防御能力。

3.2 重离子诱变在杂交狼尾草耐寒育种中的应用

杂交狼尾草作为典型的暖季型多年生牧草,其耐寒性不足在一定程度上限制了其在寒冷或高纬度地区的推广应用。传统育种方式受限于遗传背景和育种周期,难以在短期内获得耐寒性显著提高

的新材料。已有研究表明,重离子束辐射凭借其高线性能量传递(Linear energy transfer, LET)特性,可在相对较低剂量下诱导复杂而稳定的遗传变异,在多种作物抗逆育种中表现出良好的应用前景^[23]。有研究对水稻进行200 Gy重离子辐射诱变得到产量高、耐盐碱性强的东稻122^[24];拟南芥通过50 Gy预处理可降低活性氧积累与膜脂过氧化水平^[25],提示其能够显著提高冷胁迫下的生长表现。总体来看,中等剂量重离子辐射更容易诱导植物产生与生长和抗逆性相关的有利变异,具有较高的诱变效率^[26]。通过总结前人研究,本研究针对杂交狼尾草设置了不同水平的重离子辐射剂量。研究结果表明,中等剂量100 Gy在维持较高成苗能力的同时,更有利于诱导与耐寒性相关的正向生理变异。

4 结论

本研究基于重离子辐射诱变,系统分析了不同剂量对杂交狼尾草种子发芽、苗期生长及耐寒性改良的影响,并构建了适用于杂交狼尾草的耐寒诱变筛选技术体系。以各剂量处理的初始诱变种子数为基数计算,50,100和150 Gy处理分别获得1株经越冬鉴定的耐寒新种质,诱变效率均为5.0%;而200和300 Gy处理未获得经越冬鉴定的耐寒新种质,诱变效率为0。该结果表明,中低剂量重离子辐射更有利于在维持材料成活的基础上获得耐寒正向变异材料。具体结果如下:

(1)通过多指标综合评价体系,结合半致死温度测定,经海拔越冬鉴定后确认的3株为耐寒新种质。

(2)建立杂交狼尾草种子耐寒突变体重离子诱变技术体系:以干种子作为底盘材料,100 Gy辐射剂量,4℃苗期冷胁迫2 d,可溶性糖为速筛指标。

参考文献

- [1] 高龙,张娟,戈辰妍,等. 添加植物乳杆菌、布氏乳杆菌对杂交狼尾草青贮发酵品质及有氧稳定性的影响[J]. 草地学报, 2023,31(12):3867-3875
GAO L,ZHANG J,GE C Y, et al. Effects of adding *Lactiplantibacillus plantarum* and *Lactobacillus buchneri* on silage fermentation quality and aerobic stability of *Pennisetum glaucum* × *P. purpureum*[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023,31(12):3867-3875
- [2] 武炳超,童磊,杜昭昌,等. ⁶⁰Co-γ射线对2种狼尾草属牧草的诱变效应[J]. 中国农业科学, 2019,52(3):414-427
WU B C,TONG L,DU Z C, et al. Mutagenic effects of ⁶⁰Co-γ-rays on two species of *Pennisetum* genus forages[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019,52(3):414-427

- [3] 李景鹏,余丽霞,杨福. 重离子束(C)辐照诱变东北粳稻后代变异的初步研究[J]. 中国稻米,2019,25(1):58-61
LI J P, YU L X, YANG F. Preliminary investigation of offspring variation of the *Japonica* rice in Northeast China under heavy-ion beam radiation[J]. China Rice, 2019, 25(1): 58-61
- [4] ZILAIE M N, ARANI A M, ETESAMI H, et al. Halotolerant plant growth-promoting rhizobacteria-mediated alleviation of salinity and dust stress and improvement of forage yield in the desert halophyte *Seidlitzia rosmarinus* [J]. Environmental and Experimental Botany, 2022, 201: 104952
- [5] KHITKA B, PHANCHAISRI B, SUTIPATANASOMBOON A, et al. Low-energy heavy-ion-beam-induced mutation of novel high-yielding drought-tolerant Thai Jasmine rice [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2021, 492: 34-42
- [6] FAN H H, XUE Q W, XIONG H C, et al. The impact of carbon-ion beam irradiation on the phenotypic and molecular variation of wheat [J]. BMC Plant Biology, 2025, 25(1): 1110
- [7] WANG S, YANG R, SHU C, et al. Screening for cold-resistant tomato under radiation mutagenesis and observation of the submicroscopic structure [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2016, 38(11): 258
- [8] 傅蕾,李霞,高璐,等. 盐胁迫下泛菌属内生细菌对杂交狼尾草发芽及生理的影响[J]. 草业科学, 2017, 34(10): 2099-2108
FU L, LI X, GAO L, et al. Endophytic bacteria can mitigate salinity stress on seed germination and physiology in hybrid *Pennisetum* [J]. Pratacultural Science, 2017, 34(10): 2099-2108
- [9] SCHRADER J, SHI P J, ROYER D L, et al. Leaf size estimation based on leaf length, width and shape [J]. Annals of Botany, 2021, 128(4): 395-406
- [10] 丁海荣,杨智青,钟小仙,等. 13个杂交狼尾草苏北滩涂旱季农艺性状比较研究[J]. 江西农业学报, 2013, 25(8): 48-50, 54
DING H R, YANG Z Q, ZHONG X X, et al. Comparative study on agronomic traits of 13 hybrid *Pennisetum* varieties in dry season in beach saline of northern Jiangsu [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2013, 25(8): 48-50, 54
- [11] XU J C, ZHENG C H, XIE Q W, et al. Rapid and nondestructive identification of low-temperature stress severity in Juncao seedlings: Application of chlorophyll a fluorescence combined with visible-near infrared spectroscopy and machine learning [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2026, 230: 110896
- [12] 王洋,魏丹,张梅兰,等. 低温胁迫下羊蹄甲和洋紫荆家系叶片相对电导率的变化[J]. 林业与环境科学, 2021, 37(1): 105-109
WANG Y, WEI D, ZHANG M L, et al. Changes of relative conductance in strains of *Bauhinia purpurea* and *Bauhinia variegata* under cold stress [J]. Guangdong Forestry Science and Technology, 2021, 37(1): 105-109
- [13] LIN Y Z, DENG X Z, LI X, et al. Comparison of multinomial logistic regression and logistic regression: Which is more efficient in allocating land use? [J]. Frontiers of Earth Science, 2014, 8(4): 512-523
- [14] ARNON D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris* [J]. Plant Physiology, 1949, 24(1): 1-15
- [15] 赵哲,罗增铜,浦娜,等. 空间诱变与重离子诱变水稻萌发期耐盐突变体的筛选与鉴定[J]. 华南农业大学学报, 2025, 46(1): 25-33
ZHAO Z, LUO Z T, PU N, et al. Screening and identification of rice salt-tolerant mutants at germination stage induced by space mutagenesis and heavy-ion radiation [J]. Journal of South China Agricultural University, 2025, 46(1): 25-33
- [16] 李景伟,姜超,王小光,等. 基于主成分分析和隶属函数法对不同马铃薯种质资源农艺性状的综合评价[J]. 中国瓜菜, 2025, 38(9): 84-91
LI J W, JIANG C, WANG X G, et al. Comprehensive evaluation of agronomic traits in different potato germplasm resources based on principal component analysis and membership function method [J]. China Cucurbits and Vegetables, 2025, 38(9): 84-91
- [17] HIRANO T, KAZAMA Y, KUNITAKE H, et al. Mutagenic effects of heavy-ion beam irradiation to plant genome [J]. Cytologia, 2022, 87(1): 3-6
- [18] WANG L, MA R N, YIN Y, et al. Antioxidant response of *Arabidopsis thaliana* seedlings to oxidative stress induced by carbon ion beams irradiation [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2018, 195: 1-8
- [19] RAKWAL R, KIMURA S, SHIBATO J, et al. Growth retardation and death of rice plants irradiated with carbon ion beams is preceded by very early dose- and time-dependent gene expression changes [J]. Molecules and Cells, 2008, 25(2): 272-278
- [20] 朱道圩,符真珠,张慧英,等. ^{60}Co γ 射线种子辐射对大花高代组培苗的生长及诱变效应[J]. 中国农学通报, 2007, 23(9): 134-138
ZHU D W, FU Z Z, ZHANG H Y, et al. Effects of seed irradiation with ^{60}Co γ -rays on the growth and mutation of seedlings of *Godetia grandiflora* Lindl. in vitro [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(9): 134-138
- [21] WANG X, LIU C K, TU B J, et al. Effects of carbon ion beam irradiation on phenotypic variations and biochemical parameters in early generations of soybean plants [J]. Agriculture, 2021, 11(2): 98
- [22] WANNER L A, JUNTILA O. Cold-induced freezing tolerance in *Arabidopsis* [J]. Plant Physiology, 1999, 120(2): 391-400
- [23] 王圆梦,刘霄,杜艳,等. 高能重离子束辐射对黄芪幼苗的生物学效应研究[J]. 核农学报, 2024, 38(12): 2259-2269
WANG Y M, LIU X, DU Y, et al. Study on the biological effects of high-energy heavy ion beam irradiation on *Astragalus mongholicus* seedlings [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2024, 38(12): 2259-2269
- [24] 丁佳宁,周利斌. 我国水稻辐射诱变育种研究进展[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2024, 42(2): 1-17
DING J N, ZHOU L B. Progress on radiation-induced mutation breeding of rice in China [J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2024, 42(2): 1-17
- [25] WANG L, MA R N, YIN Y, et al. Role of carbon ion beams irradiation in mitigating cold stress in *Arabidopsis thaliana* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 162: 341-347
- [26] KAZAMA Y, SAITO H, YAMAMOTO Y Y, et al. LET-dependent effects of heavy-ion beam irradiation in *Arabidopsis thaliana* [J]. Plant Biotechnology, 2008, 25(1): 113-117