

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.08.012

引用格式:石玉杰, 訾芝琳, 唐媛媛, 等. 羊草高效诱变育种体系的建立与高结实率新种质创制[J]. 草地学报, 2026, 34(8): 2877–2888

SHI Yu-jie, ZI Zhi-lin, TANG Yuan-yuan, et al. Establishment of an Efficient Mutagenesis Breeding Technology System and Innovation of High Seed-Setting Germplasm in *Leymus chinensis*[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(8): 2877–2888

羊草高效诱变育种体系的建立与高结实率新种质创制

石玉杰^{1#}, 訾芝琳^{2#}, 唐媛媛^{1#}, 朱梦娇^{2,3*}, 刘雷震^{2*}, 陈 军^{1*}

(1. 中国农业大学农学院, 北京 100193; 2. 中国农业大学草业科学与技术学院, 北京 100193;
3. 中国医学科学院北京协和医学院药用植物研究所, 北京 100193)

摘要:为突破羊草(*Leymus chinensis*)诱变育种体系不完善与高结实率种质缺乏的瓶颈,本研究建立了空间与常压室温等离子体复合(SP+ARTP)的高效诱变技术体系。利用基于YOLO算法构建的结实率自动识别模型,实现了对大规模诱变群体表型的高通量、精准鉴定。结果表明,‘西乌珠穆沁’为最适诱变受体,20% NaOH处理60分钟为最佳前处理方法;单一空间诱变可显著促进种子萌发与幼苗生长;SP+ARTP复合诱变的M₁代诱变效率达1.20%,并成功筛选出23份高结实率新种质,其结实率较对照均提升30%以上。该研究所建立的复合诱变与高通量表型鉴定体系,为羊草高结实率品种的定向选育及产业化应用提供了关键技术支撑与种质资源。

关键词:羊草;诱变育种;复合诱变;YOLO;高结实率种质

中图分类号:S813.3

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)08-2877-12

Establishment of an Efficient Mutagenesis Breeding Technology System and Innovation of High Seed-Setting Germplasm in *Leymus chinensis*

SHI Yu-jie^{1#}, ZI Zhi-lin^{2#}, TANG Yuan-yuan^{1#}, ZHU Meng-jiao^{2,3*}, LIU Lei-zhen^{2*}, CHEN Jun^{1*}

(1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3. Institute of Medicinal Plant Development, Chinese Academy of Medical Sciences & Peking Union Medical College, Beijing 100193, China)

Abstract: To overcome the limitations of an imperfect mutagenesis breeding system for *Leymus chinensis* and the shortage of germplasm with high seed setting rates, this study established an efficient mutagenesis technology using a combination of spatial and atmospheric pressure room-temperature plasma (SP+ARTP). A high-throughput, accurate phenotypic analysis of large-scale mutant populations was achieved by utilizing an automatic seed setting rate identification model based on the YOLO algorithm. The results indicated that cultivar ‘Xiwuzhumuqin’ was the most suitable material for mutagenesis; a 60-minute treatment with 20% NaOH was the optimal pretreatment method. Single-space mutagenesis significantly promoted seed germination and seedling growth. The mutagenesis efficiency of the M₁ generation using the SP+ARTP combination reached 1.20%, and 23 new germplasm lines with high seed setting rate were successfully selected. These lines exhibited a seed setting rate of 30% higher than that of the control group. The combined mutagenesis and high-throughput phenotyping system developed in this study provides key technical support and germplasm resources for the targeted breeding of high-seed-setting *L. chinensis* varieties and their industrial application.

Key words: *Leymus chinensis*; Mutagenesis breeding; Compound mutagenesis; YOLO; High seed setting rate germplasm

收稿日期:2026-03-17;修回日期:2026-04-27

作者简介:石玉杰(2000-),男,汉族,河北邢台人,博士研究生,主要从事饲草遗传育种研究,E-mail:1048971954@qq.com;訾芝琳(2002-),女,汉族,北京人,硕士研究生,主要从事草地智能管理研究,E-mail:Zhilin_zi@163.com;唐媛媛(2002-),女,汉族,重庆人,硕士研究生,主要从事饲草遗传育种研究,E-mail:2669705947@qq.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail: mjzhu@implad.ac.cn; leizhenliu@cau.edu.cn; chenjc@cau.edu.cn

羊草(*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvelev)是我国北方草原生态系统的优势建群种与关键乡土草种,广泛分布于欧亚大陆东部,在我国东北松嫩平原及内蒙古东部草原尤为集中^[1]。该草种不仅根系发达,具备显著的耐盐碱、抗旱、耐冷等综合抗逆特性,在防风固沙、水土保持等生态修复方面具有不可替代的功能^[2];同时,其营养丰富、适口性佳,粗蛋白含量高,被誉为“牲口细粮”,是我国草牧业不可或缺的优质饲草资源,兼具突出的生态与经济价值^[3]。尽管羊草全基因组已成功解析,为其育种工作进入基因组时代奠定了理论基础^[4],但其产业化与生态修复应用长期受限于发芽率低、抽穗率低与结实率低的“三低”瓶颈,导致种子生产能力严重不足^[5-6]。更为关键的是,羊草具有基因组庞大、遗传背景复杂、自交不亲和及多年生等生物学特性,使得依赖有性杂交的常规育种技术难度大、周期长^[7]。因此,整合与创新现代生物育种技术,快速创制高结实率新种质,已成为推动草原生态修复与草牧业可持续发展的迫切需求。

诱变育种作为一种能够直接、快速创造遗传变异、突破种质遗传瓶颈的技术途径,展现出巨大潜力。目前,主流诱变技术主要包括化学诱变剂EMS(乙基甲磺酸酯)^[8],以及物理诱变技术如ARTP(常压室温等离子体)^[9-11]、HIRFL(重离子束)^[12]和空间诱变^[13]等,这些技术已在水稻、小麦、玉米、燕麦等多种作物育种中成功应用^[14-20]。然而,单一诱变方式往往存在突变类型有限、诱变效率不高等局限;相比之下,复合诱变则能整合不同诱变源的优势,有助于拓宽突变谱、提高诱变效率,因而成为一种更具潜力的育种策略。

目前,与紫花苜蓿等牧草及主要禾谷类作物相比,羊草的诱变育种研究仍处于起步阶段^[21-22]。其系统性研究较为滞后,不仅缺乏对不同诱变技术条件与效率的系统比较,也尚未开展将多种诱变技术进行复合应用的研究。在众多物理诱变技术中,ARTP诱变具有突变率高、操作相对安全的特点;空间诱变则能利用空间特殊环境诱导独特变异。因此,通过筛选最优受体材料与预处理方法,系统建立并优化ARTP、空间诱变及其复合诱变技术体系,并结合基于深度学习的结实率高通量识别模型,以创制与筛选高结实率羊草新种质,最终为羊草的遗传改良提供完整的技术方案与宝贵的种质资源。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为6个国审羊草品种,包括‘中科1号’‘中科5号’‘中科7号’‘中草26号’‘中草27号’以及‘西乌珠穆沁’。其中,‘中科1号’‘中科5号’和‘中科7号’、由中国科学院植物研究所刘公社研究员团队提供;‘中草26号’‘中草27号’和‘西乌珠穆沁’由中国农业科学院草原研究所武自念研究员团队提供。

1.2 试验方法

1.2.1 羊草种子前处理 选取籽粒饱满的羊草种子,分别进行如下处理:20% NaOH溶液浸泡1 h;清水浸泡24 h与48 h;0.2、0.5及1 g·L⁻¹赤霉素(GA₃)溶液浸泡24 h;2% KNO₃溶液浸泡24 h;中档功率微波分别处理15、30和45 s。液体处理过程中定期轻微搅拌。发芽试验在铺有双层滤纸的培养皿中进行,每皿50粒种子,加5 mL蒸馏水或对应处理液,每种处理3次重复。培养皿置于变温培养室,条件为30℃(光照8 h)/20℃(黑暗16 h)。

1.2.2 EMS诱变 以‘西乌珠穆沁’种子为材料,种子经20% NaOH预处理1 h、清水浸泡8 h吸胀后,用pH值是7.0的磷酸缓冲液配制不同浓度的EMS溶液(0%,0.5%,1.0%,1.2%,1.5%,2.0%)分别浸泡处理8,12,16 h。处理后流水冲洗2 h,置于铺有滤纸的培养皿中(每皿50粒,3次重复),于30℃/20℃(光照8 h/黑暗16 h)条件下发芽培养。

1.2.3 ARTP诱变 ‘西乌珠穆沁’种子经20% NaOH预处理1 h后,于培养皿中在30℃/20℃(2 h光照/1 h黑暗循环)条件下进行2~3 d露白培养。取露白种子,使用天木生物ARTP诱变仪进行处理:样品距发生器约2 mm,功率360 W,气量15 SLM,分别处理20,30,40,50 min(长时间处理在25 min时停机降温)。处理后种子于30℃/20℃(8 h光照/16 h黑暗)条件下发芽培养。

1.2.4 HIRFL诱变 利用兰州重离子研究装置(HIRFL)提供的碳离子束对‘西乌珠穆沁’种子进行辐照。束流能量约80 MeV·u⁻¹,平均线性能量转移(LET)约34 keV·μm⁻¹,剂量率60 Gy·min⁻¹。设置剂量梯度为0,10,20,30,40,75,100,125,200,300 Gy。辐照后种子进行标准发芽培养。

1.2.5 空间诱变与复合诱变 ‘西乌珠穆沁’种子

搭载于神舟十五号航天飞船进行空间诱变,历时186天。复合诱变以空间诱变后的种子为材料,分别采用上述确定的最佳EMS(1.2%, 8 h)、ARTP(50 min)和HIRFL(<30 Gy)条件进行二次处理。

1.2.6 诱变材料种植 所有诱变处理后种子按1.2.1条件进行标准发芽。培养20 d后,将幼苗移栽至100孔穴盘(基质为蛭石:营养土:草炭=1:2:2),温室育苗。待幼苗长至约20 cm,移栽至中国农业大学上庄实验站羊草诱变基地的PVC管容器(直径40 cm,深50 cm,间距1 m)中进行田间培育与观测。

1.2.7 结实率识别模型构建 采集成熟羊草种子,经20% NaOH浸泡1.5~2 h及清水浸泡12~24 h预处理以透明化种皮。将种子平铺于发光板进行成像,构建包含3000张标注图像的数据集,类别包括“结实”“未结实”与“其他”3类。其中,“结实”定义为种皮内肉眼明显可见深色物质且其长度大于周围半透明区域长度的1/3;“未结实”定义为种皮内无肉眼明显可见深色物质,或深色物质长度小于周围半透明区域长度的1/3;“其他”则包括非种子结构、种皮破损严重、明显杂质以及因成像异常无法判定完整种皮的区域。将全部标注图像按8:1:1的比例随机划分为训练集、验证集与测试集。使用YOLOv8目标检测算法进行模型训练与优化。在标准YOLOv8默认检测头(P3-P5)基础上,增加1个高分辨率检测头(P2层),构建面向微小目标的专用检测支路,以提升羊草等微小种子目标的识别能力,实现羊草结实种子的自动识别与计数。

1.2.8 高结实率种质鉴定 在种子成熟期,从每个单株(PVC管)选取10个代表性穗子进行脱粒,并利用上述构建的结实率识别模型,对各材料的结实率表型进行识别与筛选。根据对照组与诱变后M₁代植株结实率的分布特征,并结合羊草生产上对高结实率种质的定义以及羊草产业化的实际需求,最终将高结实率种质的筛选标准确定为:单株平均结实率高于对照组平均结实率30%以上。

1.3 数据分析

实验数据采用单因素方差分析(One-way ANOVA),并用Tukey多重比较检验进行差异显著性检验($P<0.05$)。图表绘制使用GraphPad Prism软件。

2 结果与分析

2.1 最适诱变受体材料与前处理方法的筛选

为筛选适于诱变处理的羊草基因型并优化前处理条件,本研究对6个国审品种进行了多种前处理方法(包括清水浸泡、NaOH、KNO₃、GA₃及微波处理等)的比较。发芽实验结果表明,在未处理(对照)条件下,‘西乌珠穆沁’品种的发芽率最高,约为45%;经20% NaOH溶液处理60 min后,其发芽率显著提升至60%(图1)。发芽率的高低及发芽整齐度是影响诱变群体规模与处理一致性的关键因素,高发芽率及整齐萌发有利于获得足量且生理状态一致的试验材料,从而提高诱变处理的可靠性与重复性。基于上述结果,本研究确定‘西乌珠穆沁’为后续诱变研究的最适受体材料,并确定20% NaOH处理60 min为最佳前处理方式,为后续诱变体系的建立提供了一致的材料基础。

2.2 单一诱变技术体系的建立与条件优化

2.2.1 EMS诱变 为探究EMS诱变对羊草的最适处理条件,本研究通过设置不同浓度(0, 0.5%, 1.0%, 1.2%, 1.5%, 2.0%)与时间(8 h, 12 h, 16 h)梯度,系统分析了EMS对羊草种子萌发与幼苗生长的剂量-时间效应,在8 h处理下,0.5% EMS对种子发芽有轻微促进作用;随着EMS浓度升高,发芽率呈逐步下降趋势,当浓度 $\geq 1.5\%$ 时几乎完全抑制发芽。延长处理时间至12 h和16 h后,发芽率随浓度升高持续降低,仅在0.5%浓度下与对照相近,浓度 $\geq 1.0\%$ 即显著下降。幼苗生长指标(苗长与根长)变化趋势与发芽率基本一致,低浓度短时处理对生长影响较小,而高浓度或长时间处理则显著抑制幼苗建成(图2)。根据半致死剂量原则,即筛选既能诱发足够突变、又可保持植株一定存活与生长潜力的处理条件,综合发芽与生长数据,最终确定1.2% EMS处理8 h为羊草EMS诱变的最佳条件。

2.2.2 ARTP诱变 为探究ARTP对羊草种子的诱变效应,本研究以露白处理的‘西乌珠穆沁’羊草种子为材料,设置了0, 20, 30, 40, 50 min等5个辐照时间梯度。通过对不同处理组种子在土壤栽培与滤纸培养条件下的成活率,以及幼苗苗长与根长的系统测定,明确了ARTP处理对羊草种子活力及早期生长的剂量效应。结果表明,随着ARTP辐照时间延长,种子的成活率与幼苗生长指标均呈逐步下

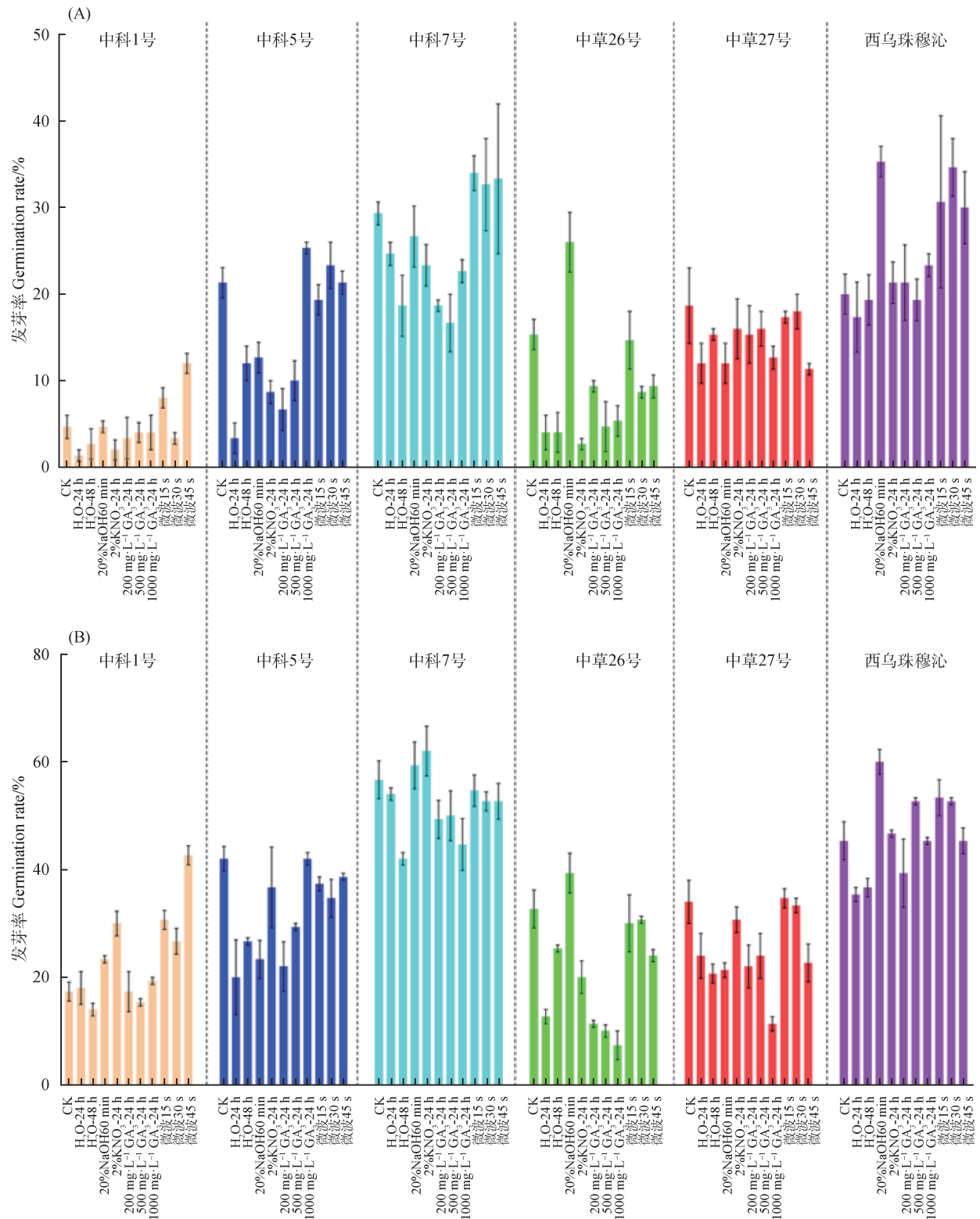


图 1 诱变前处理与底盘品种筛选

Fig. 1 Mutagenesis pretreatment and suitable material screening

降趋势。当处理时间达到 50 min 时,种子在土培与纸培条件下的成活率均降至对照的 50% 左右;幼苗的苗长与根长也相应降至对照的约 50% (图 3)。50 min 的 ARTP 处理可在诱发显著生物学效应的

同时,使植株成活与生长指标保持在半致死水平附近,符合诱变育种中“半致死剂量”的筛选原则。因此,本研究确定 50 min 为羊草 ARTP 诱变的最适处理时间。

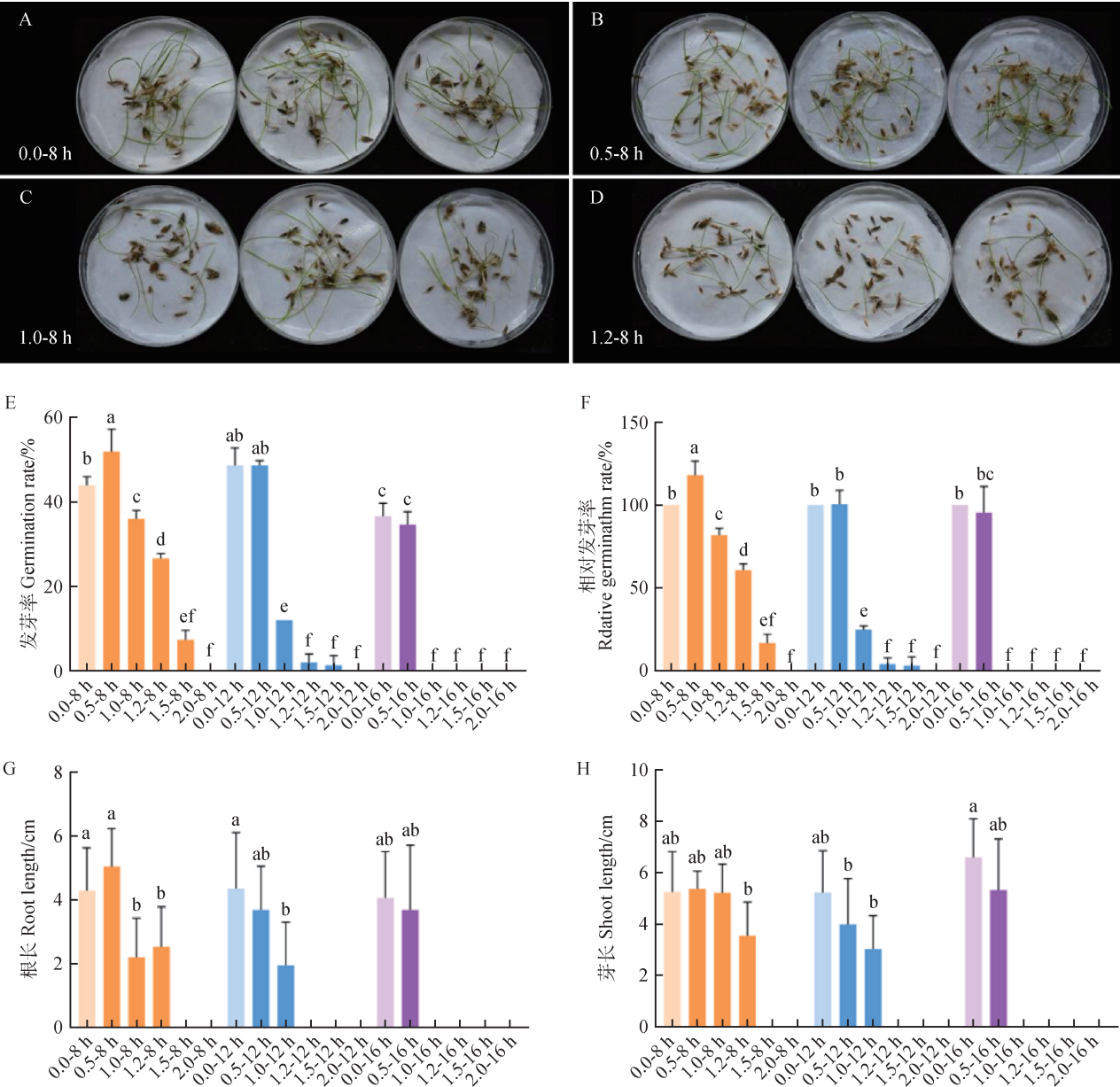


图 2 EMS 处理对羊草种子发芽率及幼苗生长的影响

Fig. 2 The effect of EMS treatment on the germination rate of *Leymus* grass seeds and seedling growth

2.2.3 HIRFL 诱变 为明确 HIRFL 辐照对羊草种子萌发及幼苗生长的剂量效应,本研究以含水量约为 13% 的“西乌珠穆沁”羊草干燥种子为材料,设置了 0~300 Gy 的辐照剂量梯度。通过对不同剂量处理下种子发芽率、苗长与根长的系统测定,发现 HIRFL 辐照对羊草早期生长发育具有显著的剂量依赖性抑制效应。具体而言,发芽率随辐照剂量增加而持续下降:在 0 Gy 时发芽率约为 50%,至 40 Gy 时降至约 15%,100 Gy 时仅为约 2%,当剂量达到 125 Gy 及以上时发芽被完全抑制。幼苗生长指标呈现同步下降趋势,在 0 Gy 条件下苗长与根长分别约为 6.0 cm 和 3.0 cm,随着剂量升高逐渐降低,至

75 Gy 时分别约为 1.0 cm 和 0.5 cm(图 4)。依据半致死剂量原则,并结合发芽与生长数据的综合评估,本研究确定羊草 HIRFL 诱变的适宜辐照剂量应低于 30 Gy。

2.3 空间及复合诱变效应分析

为探究空间(SP)诱变对羊草种子的生物学效应及其与其它诱变方式的复合作用,本研究利用神舟十五号飞船搭载“西乌珠穆沁”羊草种子进行空间诱变处理(飞行周期 186 天),并以此为基础,进一步开展了空间分别与 EMS(SP+EMS)、ARTP(SP+ARTP)及 HIRFL(SP+HIRFL)的复合诱变

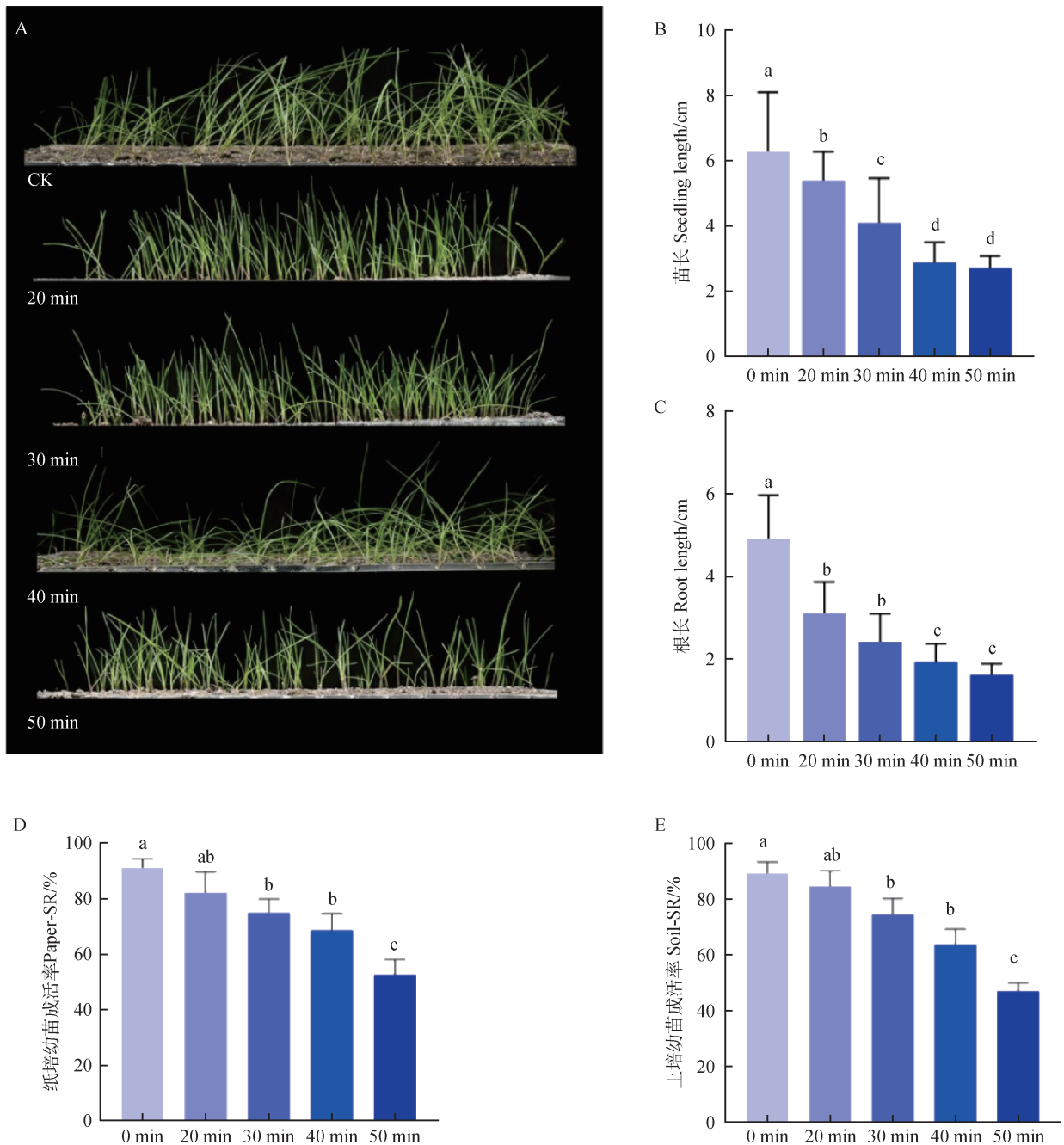


图3 ARTP辐照对羊草种子发芽率及幼苗生长的影响

Fig. 3 The effect of ARTP irradiation on the germination rate of *Leymus* grass seeds and seedling growth

研究,发现单一空间诱变可显著促进羊草种子的萌发与幼苗生长,其发芽率约达70%(对照约为50%),苗长与根长亦显著高于对照,体现出空间环境特有的生物学促进效应。然而,当空间诱变分别与EMS、ARTP或HIRFL复合后,多数处理表现出叠加的生理损伤,导致种子发芽率与幼苗生长均受到不同程度抑制。值得注意的是,在所有复合处理中,空间与ARTP复合(SP+ARTP)表现出相对最优的协同效应:其发芽率约为单一空间诱变的50%,幼苗苗长与根长分别保持在5.96和5.37 cm,生

长抑制程度显著低于其他复合处理(图5),表明SP+ARTP可能是羊草诱变育种领域一种具有较高应用潜力的复合诱变技术。

2.4 羊草结实率识别模型的构建

针对羊草种子体积小、人工考种效率低、主观误差大等制约规模化表型鉴定的瓶颈,本研究构建了一种基于YOLO深度学习算法的羊草种子结实率自动识别模型(图6A)。模型训练与验证结果表明,其核心性能指标均呈现良好的收敛与稳定趋

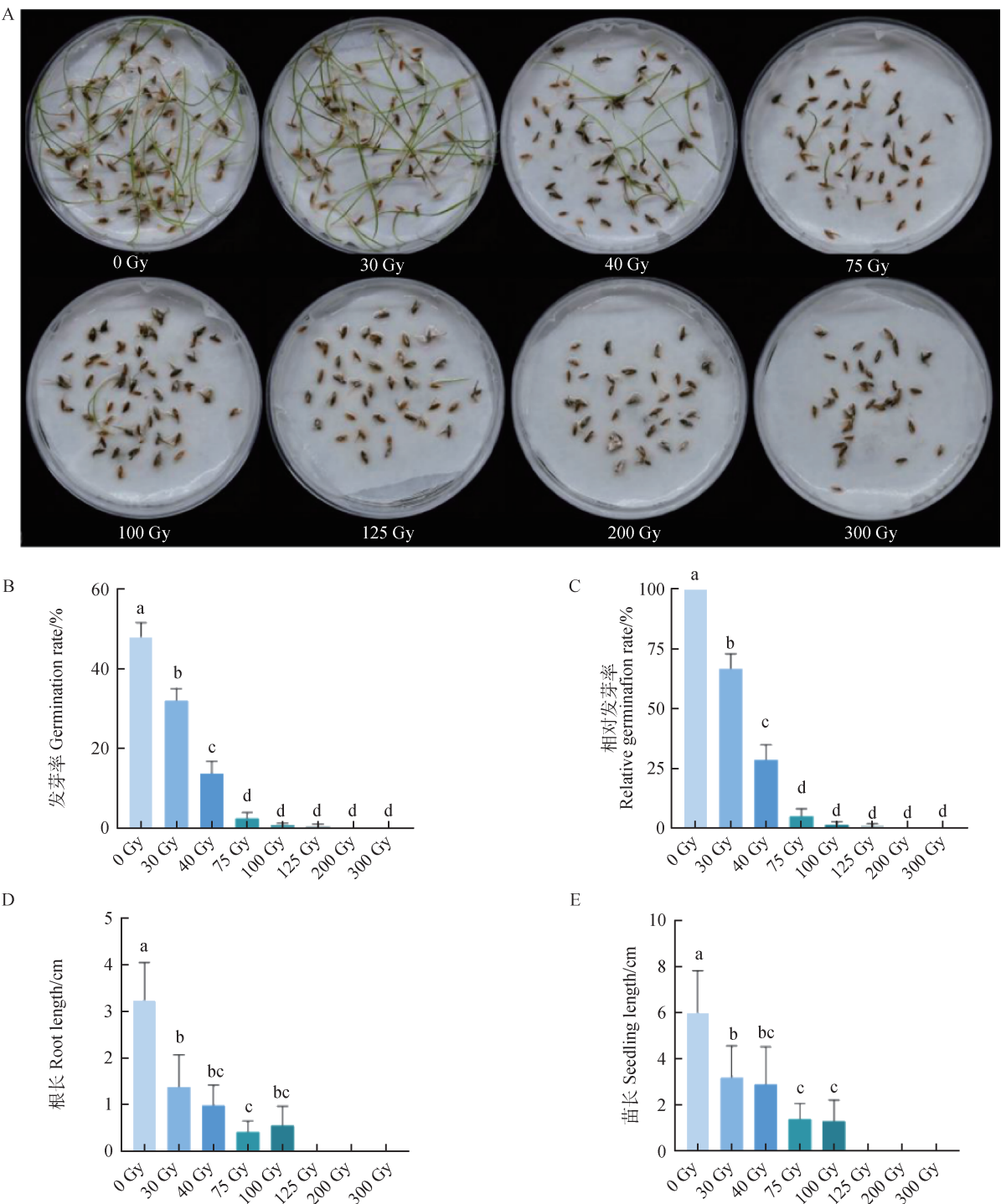


图 4 HIRFL 辐照对羊草种子发芽率及幼苗生长的影响

Fig. 4 The effect of HIRFL irradiation on the germination rate of *Leymus* grass seeds and seedling growth

势:精确率由训练初期约 0.8 经波动上升后稳定在 0.8~0.9 之间;召回率从约 0.65 逐步提升至 0.8 左右并趋于稳定。在交并比阈值为 0.5 的条件下, mAP@50 值在训练初期快速上升后平稳维持在 0.8 左右,显示模型在常规检测标准下具备优良的识别性能。在更严格的 IoU 阈值范围(0.5~0.95)内, mAP@50-95 由初始约 0.3 逐渐上升至 0.3~0.4 区

间,表明模型对高度重叠目标的判别能力仍有提升空间(图 6B,C)。鉴于本研究的实际目标为对“结实”“未结实”与“其他”3 类种子实现快速、准确分类,而无需极端精细的重叠检测,该模型在 IoU=0.5 的条件下已达到较高的识别精度与稳定性(图 6D),能够充分满足羊草大规模群体结实率的鉴定需求。

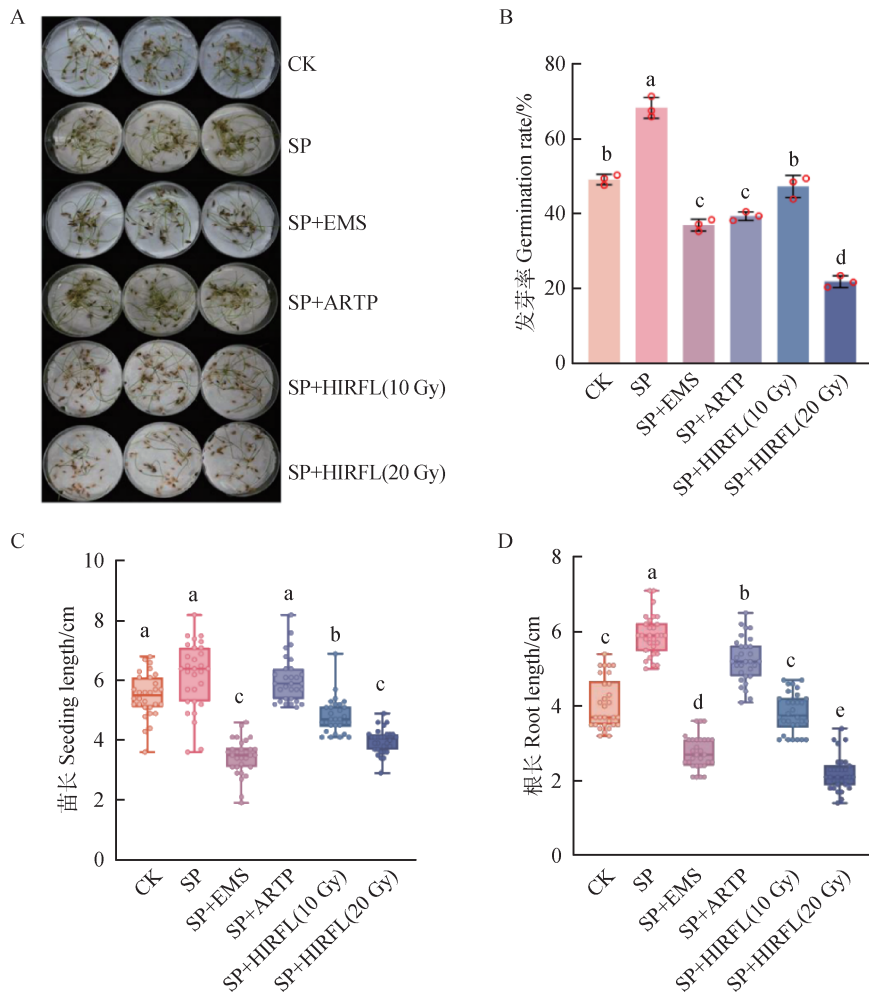


图5 空间及复合诱变对羊草种子发芽率及幼苗生长的影响

Fig. 5 The effect of space and combined mutagenesis on the germination rate of *Leymus* grass seeds and seedling growth

2.5 高结实率新种质的创制与筛选

本研究前期结果表明,SP+ARTP 复合诱变技术在羊草诱变育种中具备较高的应用潜力(图5)。为创制与筛选高结实率羊草新种质,本研究利用已建立的诱变体系处理‘西乌珠穆沁’种子,构建了包含 ARTP、SP 及其复合(SP+ARTP)诱变处理的羊草突变体资源圃(图7A-B)。基于前期建立的结实率自动识别模型,对 M_1 代诱变群体进行高通量表型筛选,共获得 23 份结实率高于对照 30% 以上的高结实率新种质。其中包括 4 份来自 SP 处理(SP-1~4)、7 份来自 ARTP 处理(ARTP-1~7)(图7C;表1),以及 12 份来自 SP+ARTP 复合处理(SP+ARTP-1~12)的材料(图7D;表2)。进一步对诱变效率的比较分析显示,SP 与 ARTP 复合诱变(SP+ARTP)在创制高结实率突变体方面表现最佳,其 M_1 代高结实率突变频率达到 1.20%,显著优于单一 ARTP 或 SP 处理(图7E),体现了该复合诱变技

术在羊草遗传改良中的突出潜力。

因此,为系统解决羊草诱变育种技术体系不完善及高结实率种质缺乏的核心问题,本研究成功建立并验证了1套整合“空间诱变材料创制-ARTP 二次诱变-高通量表型鉴定-高结实率种质筛选”的 SP+ARTP 复合诱变育种技术体系(图7F)。该体系通过复合诱变有效拓宽遗传变异谱,并结合高效、客观的表型鉴定方法,为羊草高结实率性状的定向遗传改良提供了完整、可靠的技术方案。

3 讨论

本研究针对羊草育种中诱变技术体系不完善、高结实率种质缺乏的瓶颈,通过系统性技术优化与集成,建立了1套高效的高结实率种质创制体系。该体系首先以‘西乌珠穆沁’为最优受体,确立了 20% NaOH 处理 60 分钟的标准化前处理方法,为后

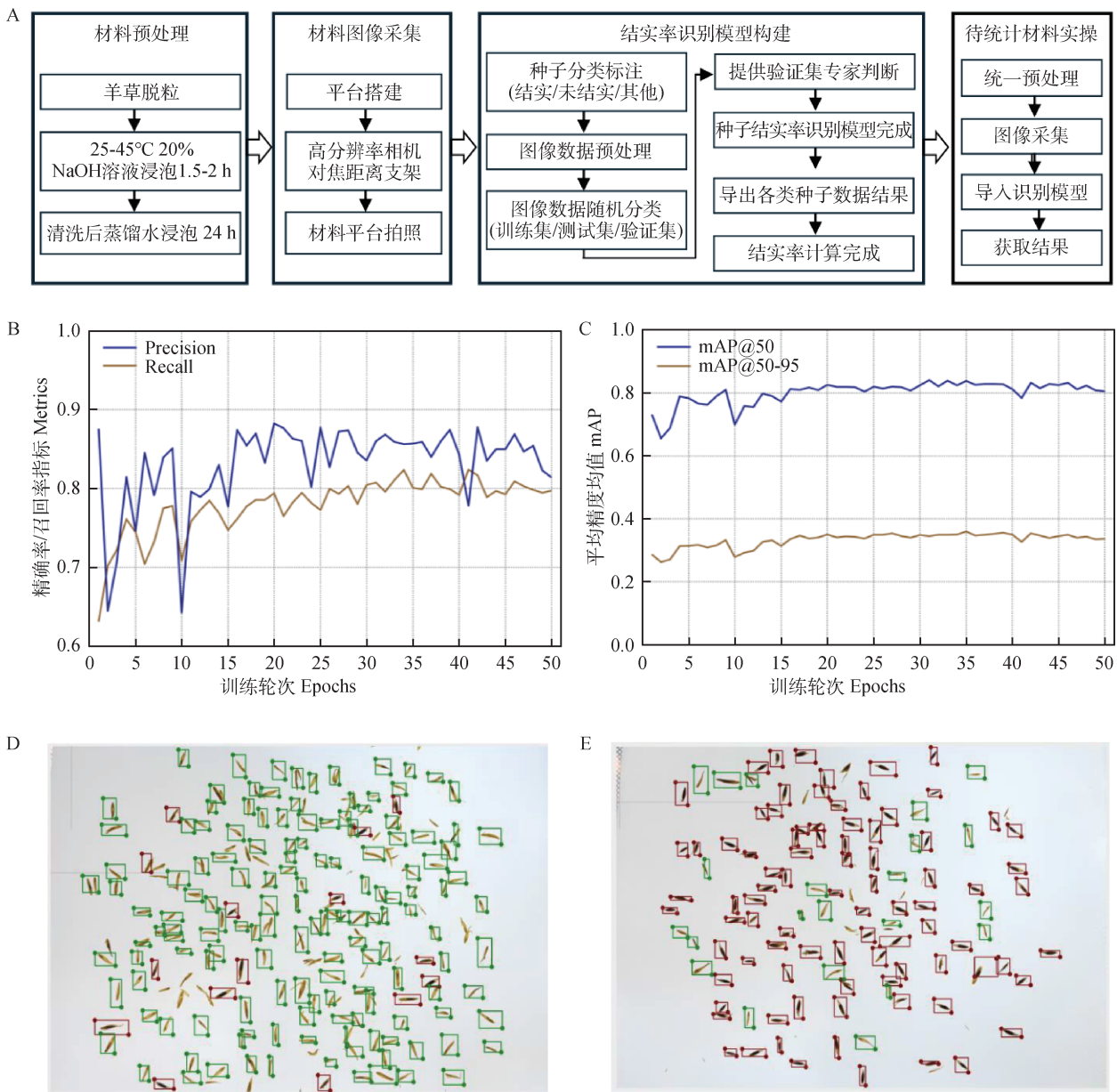


图 6 羊草种子结实率识别模型构建

Fig. 6 Construction of a model for identifying the seed setting rate of *Leymus grass*

续诱变提供了高活力、均一的材料基础,并验证了 EMS、ARTP、HIRFL 等多种单一诱变技术在羊草中遵循“半致死剂量”原则的最适条件。本研究的核心创新在于构建了“空间诱变(SP)+常压室温等离子体(ARTP)”复合诱变新策略,该组合表现出显著的协同效应,其 M_1 代高结实率突变频率达 1.20%,显著优于单一处理,表明空间环境可能使种子基因组进入不稳定的“预适应”状态,从而大幅提升后续诱变效率。为支撑大规模筛选,本研究开发了基于 YOLO 深度学习算法的结实率自动识别模型,实现了表型的高通量、精准鉴定。依托上述技术体系,成功从 M_1 代群体中筛选出 23 份高结实

率新种质,其中 12 份来源于 SP+ARTP 处理,显著提升了育种整体效率。

尽管本研究在羊草诱变技术方面取得了阶段性进展,但与其他牧草诱变育种研究之间仍存在一定的差距^[23],这也为后续研究指明了方向。首先,目前所获得的高结实率种质尚处于 M_1 代,其性状的遗传稳定性及在后代中的分离与固定规律,仍需通过连续多世代的种植与系统鉴定来验证,这是突变材料走向育种应用的前提。在高效创制变异的基础上,未来可进一步发展羊草单倍体技术体系(如研发羊草的花粉离体培养技术体系),以实现有利变异的快速固定,从而加速诱变材料的育种应用进

表 1 SP 和 ARTP 单一诱变获得的新种质结实率数据

Table 1 Seed setting rate data of new germplasm obtained by single mutagenesis with SP and ARTP

材料编号 Material number	穗 1	穗 2	穗 3	穗 4	穗 5	穗 6	穗 7	穗 8	穗 9	穗 10	平均结实率 Average seed setting rate
SP-1	69.86	72.15	73.18	70.57	75.25	71.46	70.59	72.43	71.36	73.26	72.01
SP-2	73.19	77.59	79.36	74.26	74.68	73.94	77.68	75.62	74.92	78.57	75.98
SP-3	69.86	72.15	73.18	70.57	75.25	71.46	70.59	72.43	71.36	73.26	72.01
SP-4	71.43	70.37	66.83	68.24	70.47	66.82	71.42	69.52	70.41	72.37	69.79
ARTP-1	70.42	70.51	69.32	65.98	70.48	67.83	65.94	64.94	69.37	72.66	68.75
ARTP-2	63.95	61.35	66.27	65.93	68.36	64.84	66.68	68.92	64.42	64.94	65.57
ARTP-3	72.85	70.64	64.92	68.52	70.48	65.92	65.06	69.42	66.26	68.92	68.23
ARTP-4	69.93	72.32	70.19	68.57	68.75	71.58	72.6	71.35	69.32	67.84	70.25
ARTP-5	66.39	68.35	67.42	66.83	67.15	68.49	66.47	68.35	69.16	67.39	67.6
ARTP-6	69.05	74.07	70.35	71.29	69.53	71.48	68.27	70.45	72.13	70.47	70.71
ARTP-7	70.42	70.51	69.32	65.98	70.48	67.83	65.94	64.94	69.37	72.66	68.75
CK	46.24	51.39	44.8	47.6	53.4	45.65	49.15	53.25	54.63	48.47	49.46

表 2 SP+ARTP 复合诱变获得的新种质结实率数据

Table 2 Seed setting rate data of new germplasm obtained by SP+ARTP combinatorial mutagenesis

材料编号 Material number	穗 1	穗 2	穗 3	穗 4	穗 5	穗 6	穗 7	穗 8	穗 9	穗 10	平均结实率 Average seed setting rate
SP+ARTP-1	72.51	68.36	65.96	68.35	64.92	63.75	67.35	69.27	66.92	70.35	67.77
SP+ARTP-2	63.63	68.41	72.52	70.32	67.32	66.83	70.57	68.38	65.24	66.92	68.01
SP+ARTP-3	70.43	68.42	72.64	67.92	69.42	72.96	68.46	71.46	72.51	69.64	70.39
SP+ARTP-4	66.32	68.93	65.39	65.78	66.52	69.38	66.98	68.42	67.18	68.46	67.34
SP+ARTP-5	75.24	72.52	73.23	70.28	72.53	70.35	72.18	74.37	70.28	73.82	72.48
SP+ARTP-6	63.63	68.41	72.52	70.32	67.32	66.83	70.57	68.38	65.24	66.92	68.01
SP+ARTP-7	70.43	68.42	72.64	67.92	69.42	72.96	68.46	71.46	72.51	69.64	70.39
SP+ARTP-8	72.41	73.92	69.21	73.82	67.92	73.31	69.74	73.46	72.52	71.93	71.82
SP+ARTP-9	73.74	70.18	72.94	73.48	70.82	71.29	72.47	73.62	71.03	74.94	72.45
SP+ARTP-10	65.82	67.42	66.28	70.58	66.41	68.25	70.29	65.32	71.26	66.52	67.82
SP+ARTP-11	73.52	69.92	75.42	71.37	74.19	69.89	73.15	74.38	72.19	74.83	72.89
SP+ARTP-12	72.54	74.18	69.46	70.18	72.62	71.48	72.94	68.39	70.54	72.83	71.52
CK	48.28	47.29	51.05	46.31	50.02	44.36	49.17	47.92	43.54	44.18	47.21

程。其次,这些突变体高结实率表型的分子遗传机制尚未明确。后续研究可综合利用全基因组重测序、转录组分析等组学手段,并结合BSA-seq(集群分离分析法)与GWAS(全基因组关联分析),系统解析羊草籽粒发育与结实调控的遗传网络与关键通路。这不仅有助于阐明羊草高结实率的分子基础,也能为分子标记辅助选择及基因编辑等精准育种技术提供重要的理论靶点。

4 结论

本研究针对羊草结实率低与诱变育种技术体系不完善的瓶颈,建立了1套高效、完整的高结实率

种质创制技术体系,该体系以‘西乌珠穆沁’为最优受体,明确了标准化前处理与多种诱变(EMS, ARTP, HIRFL)的半致死剂量条件,并创新性地将空间诱变(SP)与常压室温等离子体(ARTP)诱变复合,产生了显著的协同效应,使高结实率突变频率显著提升至1.20%。同时,本研究构建了基于YOLO深度学习算法的结实率高通量表型鉴定平台,实现了大规模群体的快速精准筛选,同时,利用该集成技术体系成功创制了23份高结实率新种质(其中12份来自高效的SP+ARTP处理),为羊草遗传育种提供了直接的技术方案、创新方法与宝贵的亲本材料,对同类作物的遗传改良具有重要借鉴价值。

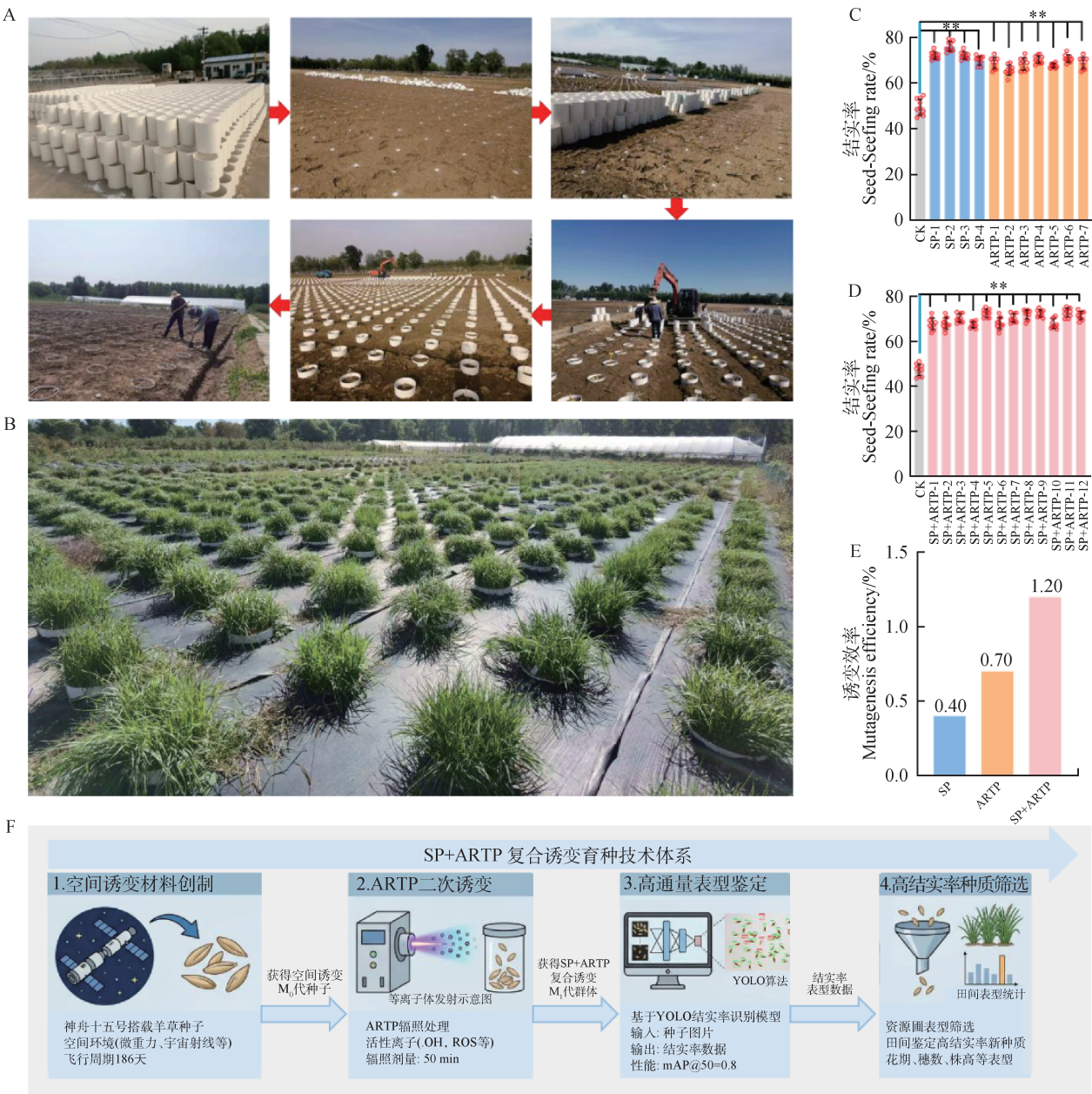


图 7 高结实率羊草种质创制与鉴定

Fig. 7 Creation and identification of high seed-setting rate *Leymus chinensis* germplasm

参考文献

[1] 刘公社,李晓霞,齐冬梅,等. 羊草种质资源的评价与利用[J]. 科学通报,2016,61(2):271-281
LIU G S, LI X X, QI D M, et al. Evaluation and utilization of *Leymus chinensis* germplasm resources [J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(2): 271-281

[2] 刘公社,王德利,石凤翎,等. 羊草种质资源研究历程及启示[J]. 中国草地学报,2022,44(4):1-9
LIU G S, WANG D L, SHI F L, et al. Review of study on germplasm resources of *leymnus chinensis* and its inspirations [J]. Chinese Journal of Grassland, 2022, 44(4): 1-9

[3] 邓海霞,王影. 羊草的特性及田间管理[J]. 养殖技术顾问, 2014(9):254
DENG H X, WANG Y. Characteristics and field management of *Leymus chinensis* [J]. Technical Advisor for Animal Husbandry, 2014(9): 254

[4] LI T, TANG S J, LI W, et al. Genome evolution and initial breeding of the Triticeae grass *Leymus chinensis* dominating the Eurasian Steppe [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2023, 120(44): 1-10

[5] 刘公社,李晓平,王赞文. 羊草生物学与资源利用的研究进展 [J]. 中国草地学报, 2017, 39(5): 1-8
LIU G S, LI X P, WANG Y W. Research progress on the biology and resource utilization of *Leymus chinensis* [J]. Chinese Journal of Grassland, 2017, 39(5): 1-8

- [6] 王显国,韩烈保,李青丰. 羊草育种研究现状与展望[J]. 草业科学,2012,29(8):1307-1313
WANG X G, HAN L B, LI Q F. Current status and prospects of *Leymus chinensis* breeding[J]. Pratacultural Science, 2012, 29(8):1307-1313
- [7] SUN S J, WANG J L, GUAN Y, et al. High-quality chromosome-level genomes reveal the structure and evolution of the S and Z self-incompatibility loci in *Leymus chinensis* [J]. Plant Biotechnology Journal, 2026, 24(5):3279-3281
- [8] KIM Y, SCHUMAKER K S, ZHU J K. EMS mutagenesis of *Arabidopsis* [J]. Methods in Molecular Biology, 2006, 323:101-103
- [9] ZHANG X, ZHANG X F, LI H P, et al. Atmospheric and room temperature plasma (ARTP) as a new powerful mutagenesis tool[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2014, 98(12):5387-5396
- [10] LI G, LI H P, WANG L Y, et al. Genetic effects of radio-frequency, atmospheric-pressure glow discharges with helium[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(22):221504
- [11] POETSCH A R. The genomics of oxidative DNA damage, repair, and resulting mutagenesis[J]. Computational and Structural Biotechnology Journal, 2020, 18:207-219
- [12] 李仁民,王菊芳,李文建. 重离子束在微生物诱变育种及生物能源开发中的应用[J]. 原子核物理评论,2007,24(3):234-237
LI R M, WANG J F, LI W J. Application of heavy ion beams to microbial mutation breeding and exploitation of biological energy[J]. Nuclear Physics Review, 2007, 24(3):234-237
- [13] 温贤芳,张龙,戴维序,等. 天地结合开展我国空间诱变育种研究[J]. 核农学报,2004,18(4):241-246
WEN X F, ZHANG L, DAI W X, et al. Study of space mutation breeding in China[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2004, 18(4):241-246
- [14] 黄群策,李玉峰. 离子束生物技术在水稻育种中的应用前景[J]. 杂交水稻,2002,17(5):5-8
HUANG Q C, LI Y F. Prospect of ion beam bio-technology in rice breeding[J]. Hybrid Rice, 2002, 17(5):5-8
- [15] 司婧,张红,武振华. 离子注入技术在植物育种中的应用与研究进展[J]. 辐射研究与辐射工艺学报,2012,30(6):321-327
SI J, ZHANG H, WU Z H. Applications and research progress of plant breeding with ion implantation technique[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2012, 30(6):321-327
- [16] 罗红兵,赵葵,周文新,等. 重离子辐射诱导玉米雄性不育突变系的遗传研究[J]. 核农学报,2008,22(3):296-299
LUO H B, ZHAO K, ZHOU W X, et al. Genetic study on male sterile mutant of maize induced by heavy ion irradiation[J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 2008, 22(3):296-299
- [17] 张宏军,肖钢,谭太龙,等. EMS处理甘蓝型油菜(*Brassica napus*)获得高油酸材料[J]. 中国农业科学,2008,41(12):4016-4022
ZHANG H J, XIAO G, TAN T L, et al. High oleate material of rapeseed (*Brassica napus*) produced by EMS treatment[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(12):4016-4022
- [18] SELVAM Y A, ELANGAIMANNAN R, VENKATESAN M, et al. Chemically induced mutagenesis in Blackgram (*Vigna mungo* (L.) Hepper) [J]. Electronic Journal of Plant Breeding, 2010, 1(4):921-924
- [19] 王健,刘荣堂,张蕴薇,等. 卫星搭载对白三叶光合特性的影响[J]. 草业科学,2010,27(12):107-112
WANG J, LIU R T, ZHANG Y W, et al. Effects of seeds carried by satellite on photosynthetic characteristics of *Trifolium repens* [J]. Pratacultural Science, 2010, 27(12):107-112
- [20] 杨红善,王彦荣,常根柱,等. 牧草的航天诱变研究[J]. 中国草地学报,2015,37(1):104-110
YANG H S, WANG Y R, CHANG G Z, et al. A study on the space mutation of forages [J]. Chinese Journal of Grassland, 2015, 37(1):104-110
- [21] 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[J]. 草地学报,2024,32(6):1962-1967
KUANG Q, ZONG Y Q, YANG W, et al. The impacts of spatial mutagenesis on agronomic traits and nutrient quality of ‘Deqin’ Alfalfa [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(6):1962-1967
- [22] 申晓慧. 两种诱变处理下紫花苜蓿全基因组DNA甲基化图谱分析[J]. 草地学报,2022,30(1):46-54
SHEN X H. Analysis of DNA methylation map of alfalfa whole genome under two kinds of mutagenesis treatments [J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(1):46-54
- [23] 顾启元,刘维康,刘梦亚,等. 牧草及草坪草航天诱变育种研究进展及展望 [J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1156.s.20250929.2048.002>, 2025-09-30/2026-04-27
GU Q Y, LIU W K, LIU M Y, et al. Research progress and prospects of space mutation breeding in forage and turfgrass [J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1156.s.20250929.2048.002>, 2025-09-30/2026-04-27

(责任编辑 彭露茜)