

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.08.033

引用格式:钟志花,卢茂金,王蓉,等.饲用燕麦高效EMS诱变技术优化与高产种质筛选[J].草地学报,2026,34(8):3113—3120

ZHONG Zhi-hua, LU Mao-jin, WANG Rong, et al. Optimization of High-Efficiency EMS Mutagenesis Technology for Forage Oat and Screening of High-Yield Germplasm[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(8):3113—3120

饲用燕麦高效EMS诱变技术优化与高产种质筛选

钟志花¹, 卢茂金¹, 王蓉¹, 杨国栋¹, 刘朝¹, 马祥², 闫明科¹, 王亚芳^{1*}, 郭欢^{1*}

(1. 西北农林科技大学草业与草原学院, 陕西杨凌 712100; 2. 青海大学畜牧兽医科学院, 青海西宁 810016)

摘要:本研究以‘中天4号’饲用燕麦(*Avena sativa* L.)种子为材料,通过去除稃皮和连续30 h种子含水量调节的前处理,不同浓度和时间的EMS诱变处理,以及赤霉素外源施加的后处理,优化饲用燕麦EMS诱变技术体系。构建M₂代突变群体,于乳熟期调查其农艺性状,评估诱变效率并筛选高产种质。结果表明:98%浓硫酸浸泡6 min可有效去除饲用燕麦稃皮障碍,调节种子含水量至50%(4 h浸泡)可促进EMS高效地进入种子,筛选出饲用燕麦EMS最佳诱变条件为1.0% EMS处理16 h,采用50 mg·L⁻¹外源赤霉素处理诱变种子可显著促进诱变后幼苗生长($P < 0.05$),与未添加赤霉素的对照相比,发芽率显著提高8.5%,苗长也恢复至未诱变幼苗水平。该EMS诱变技术系统性地克服了饲用燕麦种子渗透障碍、生理状态不一及诱变损伤等关键限制因素。M₂代获得高产潜力种质的诱变效率达到1.92%,筛选到13份表现优异的高产潜力种质。

关键词:饲用燕麦;EMS;诱变体系;赤霉素;含水量;高产种质

中图分类号:S324

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)08-3113-08

Optimization of High-Efficiency EMS Mutagenesis Technology for Forage Oat and Screening of High-Yield Germplasm

ZHONG Zhi-hua¹, LU Mao-jin¹, WANG Rong¹, YANG Guo-dong¹, LIU Chao¹, MA Xiang²,
YAN Ming-ke¹, WANG Ya-fang^{1*}, GUO Huan^{1*}

(1. College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi Province 712100, China; 2. Academy of Animal and Veterinary Science, Qinghai University, Xining, Qinghai Province 810016, China)

Abstract: In this study, the forage oat (*Avena sativa* L.) cultivar ‘Zhongtian No. 4’ was used as the experimental material to establish an optimized ethyl methanesulfonate (EMS) mutagenesis system. A series of pre-treatments steps were employed, including husk removal and a 30-hour seed moisture conditioning period, followed by EMS mutagenesis treatments at different concentrations and durations, and a post-treatment involving exogenous gibberellin application. An M₂ mutant population was constructed. Agronomic traits were investigated at the milk stage to evaluate the mutagenic effects and to screen the high-yielding germplasm. The results indicated that soaking seeds in 98% concentrated sulfuric acid for 6 minutes effectively removed the husk barrier of forage oat seeds. Adjusting seed moisture content to 50% via a 4-hour soaking facilitated efficient penetration of EMS into the seed. The optimal EMS mutagenesis conditions for forage oat were determined to be 1.0% EMS treatment for 16 hours. Treatment of mutagenized seeds with 50 mg·L⁻¹ exogenous gibberellin significantly improved seedling growth. Compared with the control without added gibberellin, the germination rate increased by 8.5%, and the seedling length also recovered to the level of the non-mutagenized seedlings. This EMS mutagenesis technique systematically addressed key limiting factors in forage oat, including seed permeability barriers, inconsistent physiological states, and mutagen-induced damage. In the M₂ generation, the mutagenic efficiency for obtaining high-yield potential germplasm reached 1.92%, and 13 elite high-yield

收稿日期:2026-02-23;修回日期:2026-03-26

作者简介:钟志花(2001-),女,汉族,青海海东人,硕士研究生,主要从事牧草种质资源与遗传育种研究,E-mail:zhizhua@nwfau.edu.cn;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail: yafang.wang@nwfau.edu.cn; huan.guo@nwfau.edu.cn

potential germplasms were successfully identified.

Key words: Forage oat; EMS; Mutagenesis system; Exogenous gibberellin; Moisture content; High-yield germplasm

燕麦(*Avena sativa* L.)是禾本科燕麦属一年生草本植物,一般分为带稃型(皮燕麦)和裸粒型(裸燕麦)两大类^[1]。皮燕麦通常作为饲用燕麦,具有抗寒抗旱、耐贫瘠、耐盐碱、产量高及营养价值高等优良特性^[2]。但其作为异源六倍体遗传背景复杂,传统杂交育种周期长、效率低,生物技术育种也受限于基因型依赖性^[3-4]。

甲基磺酸乙酯(Ethyl methane sulfonate, EMS)诱变育种是作物获得优良性状并加速创制新种质的有效途径之一,具有操作简便、产生点突变频率高、较短时间内获得优良性状的突变体等优点,已在作物遗传改良中发挥重要作用^[5-6]。目前,有关饲用燕麦EMS诱变的研究主要集中于针对不同燕麦品种单一半致死浓度的筛选,诱变效率低下^[7],且多以抗逆性、光合性能等性状改良为筛选目标,而针对饲用燕麦迫切需求的“高产”目标性状的定向诱变与系统筛选研究不足,高产种质缺乏^[8-11]。

鉴于此,本研究拟去除燕麦稃皮以克服渗透障碍;通过浸种精确调控种子含水量,优化种子生理状态;筛选EMS诱变的最佳半致死剂量;利用外源赤霉素处理缓解诱变损伤、提高幼苗成活率;并筛选具有高产潜力的饲用燕麦种质材料,丰富其种质资源遗传多样性,为饲用燕麦高效化学诱变及高产种质创制提供了理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试皮燕麦品种为‘中天4号’,由中国农业科学院兰州畜牧与兽药研究所提供。挑选大小均匀、饱满的去稃皮(根据我们前期研究采用98% H_2SO_4 处理6 min高效去除种子稃皮)燕麦种子备用。

1.2 试验方法

1.2.1 种子含水量测定 参照刘备等^[12]的方法进行种子初始含水量测定。称取 (4.5 ± 0.1) g的成熟饱满的燕麦种子放入50 mL离心管中,记录初始质量。加入蒸馏水后置于4℃冰箱,记录种子在30 h内的质量变化,计算吸水率,共3次重复。

1.2.2 EMS诱变条件筛选 试验设置4个EMS浓度(0%, 0.50%, 0.75%, 1.00%)和3个时间(8 h,

12 h, 16 h),以0% EMS为对照。去稃皮燕麦种子用蒸馏水4℃浸泡4 h,沥干后加入不同浓度EMS溶液(采用pH值为7.0的PBS为溶剂配制)处理,置于摇床避光震荡诱变。沥干EMS后用5%的 $Na_2S_2O_3$ 溶液震荡解毒,随后将诱变种子流水冲洗2 h用于发芽试验。

1.2.3 种子发芽试验 用蒸馏水湿润发芽袋,将诱变后的燕麦种子腹沟朝下放置其中。在2000 lx, 25℃/20℃, 16 h/8 h光周期下萌发,期间保持发芽袋湿润。分别于培养7 d和10 d后计算发芽势和发芽率,并进一步计算相对发芽率以确定半致死剂量,每处理50粒种子,3次重复。发芽试验结束后,每处理的各重复随机选取10株幼苗拍照,使用Image J软件测量根长与苗长。发芽相关指标计算公式如下:

发芽率=第10 d种子发芽数/种子总数 $\times 100\%$;

相对发芽率=处理种子发芽率/对照种子发芽率 $\times 100\%$;

发芽势=第7 d种子发芽数/种子总数 $\times 100\%$;

相对发芽势=处理种子发芽势/对照种子发芽势 $\times 100\%$ 。

1.2.4 外源赤霉素(GA_3)后处理条件筛选 设置0, 50, 100, 150 $mg \cdot L^{-1}$ 四个 GA_3 浓度梯度,每处理50粒种子,3次重复。种子放入发芽袋后,加入相应浓度 GA_3 溶液至完全浸润,记录初始质量。每日称重,用蒸馏水补足水分至初始质量,并逐日观察记录发芽情况。

1.2.5 不同浸种时间前处理与EMS诱变组合处理 根据燕麦种子30 h内含水量变化曲线,选取6个去稃皮燕麦种子的含水量变化时间点结合1.2.2中筛选出的最佳EMS诱变条件进行发芽试验。

1.2.6 EMS诱变与外源赤霉素后处理组合处理 选取大小均匀、饱满的去稃皮燕麦种子,采用最佳EMS条件进行诱变处理,将诱变种子置于种子发芽袋中,并用1.2.4中筛选出的适宜赤霉素浓度进行外源处理,以未进行赤霉素处理的诱变种子为对照。发芽试验与测定指标同上。

1.2.7 田间种植与农艺性状调查 将不同浸泡时间结合最佳EMS诱变条件后用适宜外源赤霉素处理燕麦种子,除0 h处理因发芽率较低而诱变处理358粒种子外,其余各处理组合均处理208粒种子,

以4 h浸泡后EMS诱变处理未经赤霉素处理的燕麦种子作为处理对照(A),同时种植未经任何处理的种子作为参考对照(CK),种植于加代室(培养条件为2000 lx, 25℃/20℃, 16 h/8 h光周期),成熟后各处理按单株收获M₁代种子。M₂代按株行法于2025年5月种植于青海省湟中区鲁沙尔镇东村(101°59'E, 36°42'N),每个株行种植16粒,穴播,行距株距均40 cm。乳熟期各株系选择有代表性的4株测定农艺性状,测定参考对照94株。田间主要调查性状:株高、分蘖数、叶长、叶宽、主穗长、茎粗、鲜重。利用30%的阈值对表型突变体进行鉴定,将农艺性状低于对照70%的植株所占比例视为负向变异率,而农艺性状高于对照130%的植株所占比例视为正向变异率。采用各性状的正向与负向突变个数来评估诱变效率。诱变效率为某一性状的突变单株数占各处理M₀代初始诱变种子数的百分比。

1.3 数据处理

采用Microsoft Office Excel 2010和Prism软件进行数据处理及图表制作,采用SPSS 19.0统计软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 浸泡时间对燕麦种子含水量的影响

燕麦种子在1.5 h内迅速吸水,吸水率达到37.39%,为干种子的4倍,处于快速吸水阶段(图

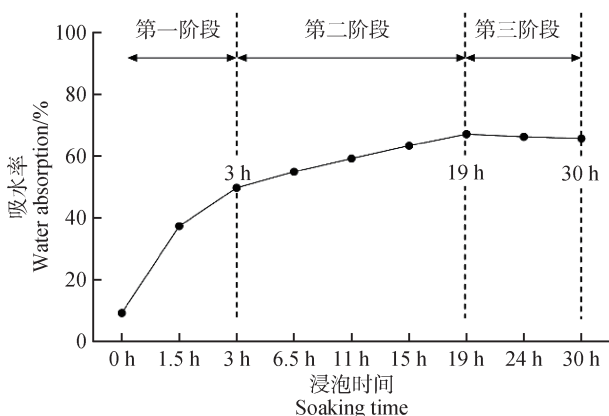


图1 ‘中天4号’燕麦种子连续30 h内吸水率变化曲线

Fig. 1 Water absorption rate change curve of ‘Zhongtian No. 4’ oat seeds over a continuous 30 hour period

1)。1.5~19 h其吸水速率放慢,吸水率由37.39%上升至67.19%,处于缓慢吸水状态。19 h后种子吸水率逐渐趋于稳定。因此,可将三个阶段分别视

为种子吸胀阶段、萌动阶段和萌发阶段(开始“露白”)。根据吸水率阶段性变化选择种子萌发阶段之前6个代表性的浸泡时间:0 h(9.2%),0.5 h(30.8%),2 h(49.1%),4 h(50.4%),8 h(56.2%),19 h(67.19%)作为调节燕麦种子含水量的前处理条件。

2.2 EMS诱变处理对燕麦种子发芽的影响

由图2可知,对照值种子发芽率为97%。与对照相比,除0.5% EMS不同时间处理组合对发芽势和发芽率无显著变化外,其余EMS处理均显著降低了燕麦种子的发芽势和发芽率($P < 0.05$)。其中,1% EMS处理16 h时,发芽率降至57%,相对发芽率为0.58,接近半致死处理条件。与对照组相比,EMS诱变后燕麦幼苗苗长和根长均显著降低,且浓度越高、抑制效应越明显($P < 0.05$)。1% EMS处理16 h时,幼苗苗长和根长接近对照的一半(图2)。因此,‘中天4号’饲用燕麦最佳EMS诱变条件为1% EMS处理16 h。

2.3 不同浓度赤霉素处理对燕麦种子发芽的影响

由图3可知,EMS诱变处理的种子,往往幼苗弱小,存活率低。为提高EMS诱变之后燕麦幼苗的生长状况,采用不同浓度的外源GA₃处理。50~150 mg·L⁻¹外源GA₃可显著提高燕麦种子发芽势($P < 0.05$)。同时,50 mg·L⁻¹和100 mg·L⁻¹ GA₃能显著促进幼根和幼苗生长($P < 0.05$)。综合发芽势、幼苗生长表现及经济性,50 mg·L⁻¹外源GA₃处理是EMS诱变种子后处理的适宜条件。

2.4 不同浸种时间前处理与EMS诱变组合对燕麦种子发芽的影响

EMS处理下,浸泡0 h(干种子)和浸泡19 h(种子露白时)的发芽指标显著低于其他浸泡时间($P < 0.05$),在0.5 h到8 h浸泡范围内,种子发芽势、发芽率和根长都随浸泡时间延长而增加(图4)。浸泡8 h时发芽势和发芽率最高,均达到70%以上,4 h浸泡处理的发芽指标仅次于8 h,但两种处理下根长和苗长无显著差异。浸泡19 h后进行EMS诱变,种子发芽率和苗长极低,所以筛选浸泡0 h,0.5 h,2 h,4 h和8 h的前处理条件与最佳EMS诱变条件(1% EMS 16 h)结合的复合处理开展田间诱变效率分析试验。

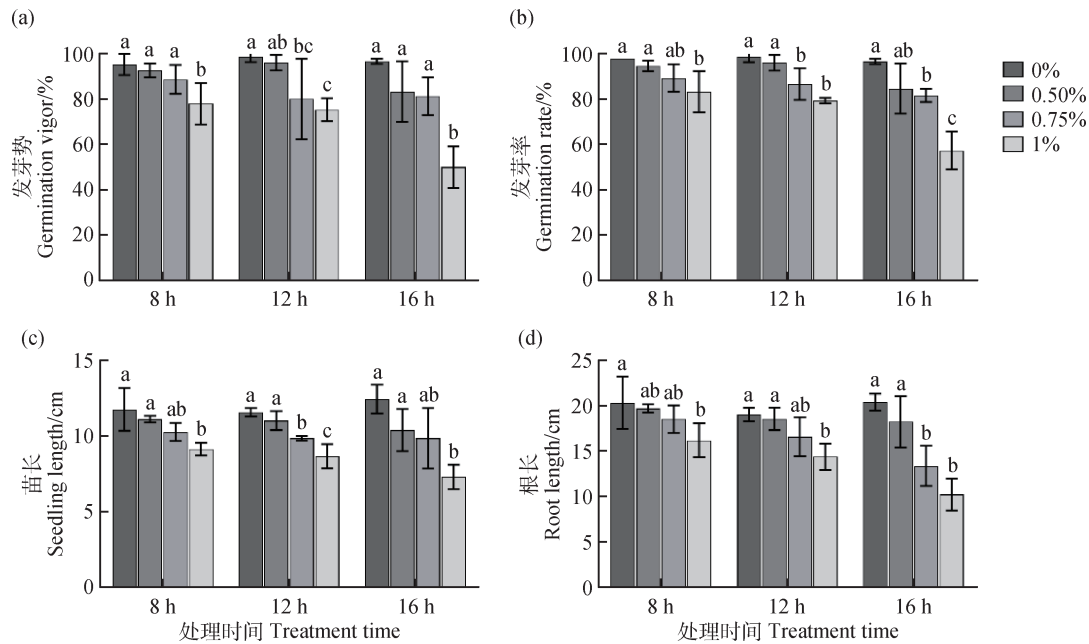


图 2 不同 EMS 浓度和时间对‘中天 4 号’燕麦发芽的影响

Fig. 2 Effects of EMS concentration and treatment duration on ‘Zhongtian No. 4’ oat germination

注:柱子上不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上 (Duncan 检验) 差异显著。下同

Note: Different lowercase letters on the bars indicate significant differences at the $P < 0.05$ level (Duncan's test). The same applies below

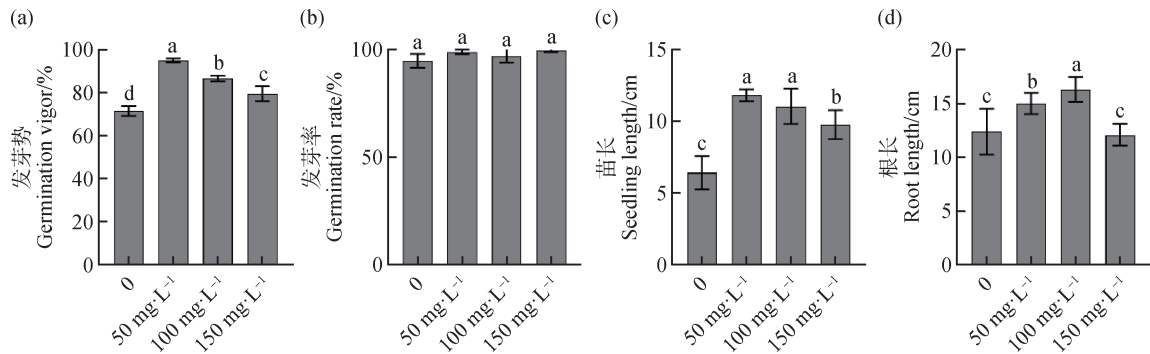


图 3 不同浓度赤霉素处理对‘中天 4 号’燕麦发芽的影响

Fig. 3 Effects of gibberellin (GA_3) concentration on germination of ‘Zhongtian No. 4’ oat

2.5 EMS 诱变与外源赤霉素 (GA_3) 后处理组合对燕麦种子发芽的影响

综合发芽势、发芽率、根长、苗长的结果如图 5 所示,发现 50 $mg\ L^{-1}$ 外源赤霉素处理能够显著提高 EMS 诱变后燕麦种子的发芽率和幼苗生长 ($P < 0.05$)。结果显示,EMS 诱变后再进行外源赤霉素处理,可将发芽率提高 8.5%,苗长也显著提高至未诱变的幼苗水平 ($P < 0.05$)。

2.6 田间诱变效率分析

各处理组在诱导不同性状定向变异上存在显

著差异 (表 1)。与 A 组 (4 h 浸泡 + EMS) 相比,进行 GA_3 后处理 (B 组 - E 组, 浸泡 + EMS + GA_3) 的变异丰富度均有极大提升,在直接决定产量的分蘖性状上突变类型丰富。B 组处理 (0 h 浸泡 + EMS + GA_3) 在“有效分蘖增加”上表现出绝对优势,诱变效率高达 5.59%,表明该处理有助于创制高分蘖突变体。E 组处理“鲜重增加”的诱变效率最高,为 1.92%,且诱导了丰富的分蘖数极端变异。因此,E 处理 (4 h 浸泡 + EMS + GA_3) 在创制高生物量种质方面最具潜力。

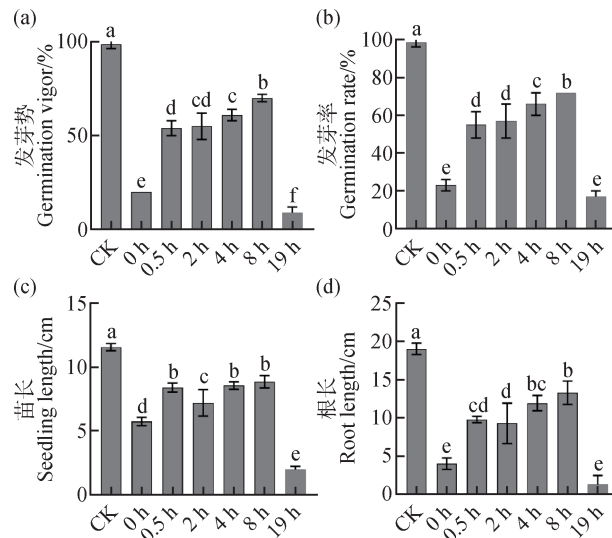


图4 不同浸种时间前处理与EMS诱变组合对‘中天4号’燕麦发芽的影响

Fig. 4 The effects of different pre-treatment times of soaking seeds and EMS mutagenesis combinations on the germination of ‘Zhongtian No. 4’ oat

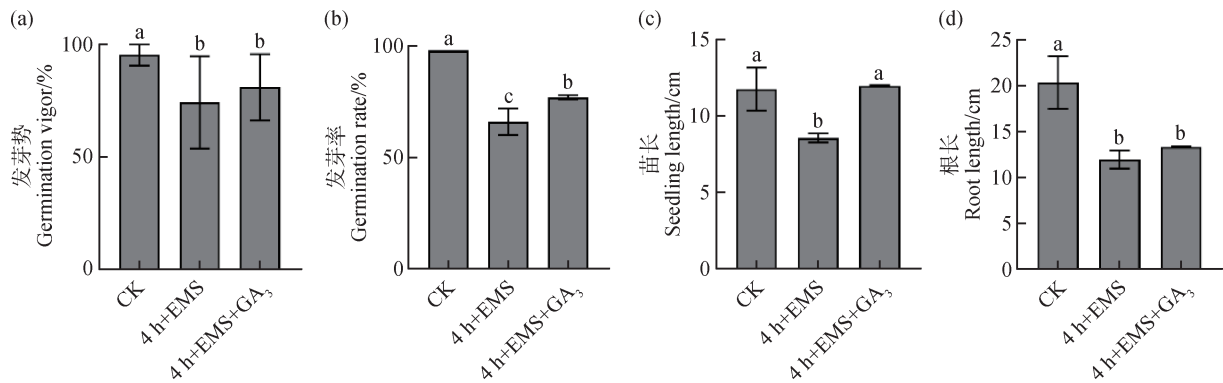


图5 EMS诱变与外源赤霉素后处理组合对‘中天4号’燕麦发芽的影响

Fig. 5 The effects of EMS mutagenesis combined with $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ exogenous gibberellin post-treatment on the germination of ‘Zhongtian No. 4’ oat

2.7 ‘中天4号’高产潜力种质筛选

由表2可知,共筛选到13份表现优异的高产潜力种质,不同预处理时间诱变效果各异,4 h处理诱导的高产潜力种质最为丰富。其中,2Z176-2(4 h处理)旗叶面积与穗长最大,旗叶面积和穗长较对照增加27.57%和10.03%,表现出“大叶大穗型”高产材料的良好基础;2Z196-2(4 h处理)茎粗达13.1 mm,对照茎粗为9.93 cm,较对照增加31.9%,该种质属于“壮秆型”材料。2Z155-3(2 h处理)单株总分蘖达41个,对照总分蘖为24个,较对照增加70.83%,表现“多蘖型”高产潜力;2Z201-3与2Z210-4(8 h处理)单株干重分别达318.9 g和337.9 g,干重较对照分别增加89.08%和100.36%,该种质呈现“高生物量型”特征。这些变异株系为后续高产饲用燕麦育种提供了重要的中间材料。

3 讨论

3.1 饲用燕麦EMS诱变条件优化

EMS诱变是创制新种质、丰富作物遗传多样性的有效手段^[13-15]。确定半致死条件是EMS诱变的关键^[16],然而该方法直接应用于饲用燕麦时,因其稃皮屏障和种子生理特性导致诱变效率和幼苗成活率低等问题^[17]。为全面评估诱变效果,本研究建立了一套去稃皮处理、生理调控与诱变损伤修复的高效EMS诱变技术。

饲用燕麦种子的致密稃皮是影响EMS溶液均匀渗入的主要物理障碍^[18]。本研究前期采用98%浓硫酸处理去除稃皮,消除渗透屏障,确保诱变剂能够充分、均匀地作用于种子。种子含水量作为种子生理状态的核心指标^[19],影响种子对EMS诱变

表 1 综合处理后 M₂代田间诱变效率
Table 1 Field mutagenesis efficiency of M₂ population by combined treatments

处理 Treatments		A		B		C		D		E		F	
性状 Trait	突变类型 Mutant type	突变数量 Mutation number	诱变效率 Mutation frequency/%	突变数量 Mutation number	诱变效率 Mutation frequency/%	突变数量 Mutation number	诱变效率 Mutation frequency/%	突变数量 Mutation number	诱变效率 Mutation frequency/%	突变数量 Mutation number	诱变效率 Mutation frequency/%	突变数量 Mutation number	诱变效率 Mutation frequency/%
株高	增加 Increase	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
Plant height/cm	减少 Decrease	0	0.00	1	0.28	2	0.96	2	0.96	2	0.96	2	0.96
总分蘖	增加 Increase	4	1.92	9	2.51	4	1.92	3	1.44	3	1.44	4	1.92
Total tiller/number	减少 Decrease	10	4.81	10	2.79	14	6.73	14	6.73	22	10.58	16	7.69
有效分蘖	增加 Increase	2	0.96	20	5.59	9	4.33	9	4.33	6	2.88	5	2.40
Effective tiller/number	减少 Decrease	17	8.17	15	4.19	24	11.54	16	7.69	31	14.90	24	11.54
旗叶长	增加 Increase	0	0.00	1	0.28	1	0.48	0	0.00	0	0.00	0	0.00
Flag leaf length/cm	减少 Decrease	0	0.00	1	0.28	4	1.92	4	1.92	5	2.40	3	1.44
旗叶宽	增加 Increase	0	0.00	0	0.00	1	0.48	0	0.00	1	0.48	0	0.00
Flag leaf width/cm	减少 Decrease	1	0.48	1	0.28	1	0.48	0	0.00	1	0.48	4	1.92
旗叶面积	增加 Increase	2	0.96	6	1.68	3	1.44	1	0.48	3	1.44	3	1.44
Flag leaf area/cm ²	减少 Decrease	3	1.44	4	1.12	10	4.81	12	5.77	9	4.33	13	6.25
茎粗	增加 Increase	1	0.48	2	0.56	1	0.48	1	0.48	2	0.96	4	1.92
Stem diameter/mm	减少 Decrease	1	0.48	1	0.28	2	0.96	1	0.48	4	1.92	2	0.96
主穗长	增加 Increase	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
Main panicle length/cm	减少 Decrease	0	0.00	1	0.28	3	1.44	2	0.96	4	1.92	2	0.96
鲜重	增加 Increase	1	0.48	3	0.84	2	0.96	1	0.48	4	1.92	2	0.96
Fresh weight/g	减少 Decrease	6	2.88	6	1.68	14	6.73	8	3.85	8	3.85	11	5.29

注:CK 指未经处理的种子;A 指 4 h 浸泡+EMS;B 指 0 h 浸泡+EMS+GA₃;C 指 0.5 h 浸泡+EMS+GA₃;D 指 2 h 浸泡+EMS+GA₃;E 指 4 h 浸泡+EMS+GA₃;F 指 8 h 浸泡+EMS+GA₃

Note: CK refers to untreated seeds; A refers to 4 h soaking + EMS; B refers to 0 h soaking + EMS + GA₃; C refers to 0.5 h soaking + EMS + GA₃; D refers to 2 h soaking + EMS + GA₃; E refers to 4 h soaking + EMS + GA₃; F refers to 8 h soaking + EMS + GA₃

表 2 ‘中天 4 号’不同含水量结合 EMS 诱变 M₂代群体高产潜力种质性状统计

Table 2 Traits of in high-yield potential germplasm from the M₂ generation population of ‘Zhongtian No. 4’ treated with different moisture contents combined with EMS mutagenesis

名称 Name	株高 Plant height/ cm	总分蘖 Total tillers/ number	有效分蘖 Effective tillers/ number	旗叶长 Flag leaf length/cm	旗叶宽 Flag leaf width/cm	旗叶面积 Flag leaf area/ cm ²	茎粗 Stem diameter/ mm	主穗长 Main spike length/ cm	鲜重 Fresh weight/ (g·Plant ⁻¹)	干重 Dry weight/ (g·Plant ⁻¹)	叶片数 Leaf number/ number	诱变方式 Mutagenesis method
CK	149.4	24	12	40.9	3.1	105.51	9.93	37.9	794.0	168.65	5	—
ZZ20-2	143.5	25	15	41.1	3.3	112.80	10.48	39.3	1080.8	235.90	5	4 h+EMS
ZZ96-4	166.5	26	14	36.6	3.3	100.00	10.00	36.0	1058.0	242.70	5	0 h+EMS+GA ₃
ZZ97-2	149.1	30	22	49.2	2.9	119.00	9.00	37.0	1078.0	196.20	4	0 h+EMS+GA ₃
ZZ98-2	157.9	27	19	39.4	3.3	108.00	11.00	35.0	1152.0	221.10	6	0 h+EMS+GA ₃
ZZ121-1	160.3	30	17	38.5	3.2	102.46	10.20	40.1	1074.0	259.20	5	0.5 h+EMS+GA ₃
ZZ124-1	159.3	26	12	37.6	3.0	93.81	10.95	31.2	1060.5	278.60	6	0.5 h+EMS+GA ₃
ZZ155-3	151.0	41	25	38.4	2.9	92.61	8.77	33.5	1133.7	254.00	5	2 h+EMS+GA ₃
ZZ172-2	150.3	33	14	33.1	2.9	79.83	10.64	33.6	1092.7	268.50	5	4 h+EMS+GA ₃
ZZ174-2	146.7	24	15	40.0	3.6	119.76	11.09	40.4	1150.5	283.40	6	4 h+EMS+GA ₃
ZZ176-2	154.1	22	15	47.6	3.4	134.60	9.47	41.7	1068.0	283.00	5	4 h+EMS+GA ₃
ZZ196-2	165.6	30	14	36.4	3.4	102.93	13.10	34.4	1084.0	261.10	5	4 h+EMS+GA ₃
ZZ201-3	161.4	36	22	39.1	3.0	97.56	10.00	34.7	1202.0	318.90	5	8 h+EMS+GA ₃
ZZ210-4	158.5	30	11	45.6	3.3	125.16	11.20	39.7	1144.5	337.90	5	8 h+EMS+GA ₃

剂的敏感性。本研究发现燕麦种子浸泡 4 h 使其含水量达 50%, 可使其同步进入代谢活跃的“生理敏感期”, 此时 DNA 复制旺盛, 显著提升了 EMS 的诱变效率。本研究筛选出‘中天 4 号’的半致死条件为 1% EMS 处理 16 h。李娟宁等^[7]发现利用 EMS 诱变后燕麦品种‘爱沃’的半致死条件为 0.75% EMS

处理 14 h, ‘陇燕 4 号’的半致死条件为 0.75% EMS 处理 4 h, 揭示不同品种对 EMS 诱变的响应不同, 可能与其种皮结构的特异性(如厚度、密度及硬度等)密切相关^[20-21]。EMS 在诱发遗传变异的同时, 会产生广泛的生理胁迫^[22], 导致 M₁代幼苗孱弱、成活率低, 本研究在诱变后进行外源赤霉素处理有效缓解

了这一负面效应。赤霉素作为一种高效的生长促进激素,可激活植物内源生长通路并增强细胞代谢,促进组织修复,也可通过调控抗氧化酶系统缓解诱变诱导的氧化损伤^[23-24]。

3.2 EMS诱导燕麦产生丰富的表型变异

EMS诱变能够有效诱导植物产生多性状的遗传变异,为种质创新与育种提供关键材料^[25]。本研究中结合种子含水量调节与外源赤霉素处理的策略,进一步增强了关键农艺性状的遗传多样性与正向突变潜力,表明优化种子生理状态与缓解诱变损伤具有协同增效作用。本研究结果发现,4 h浸泡处理(种子含水量50.4%)的诱变效果尤其高产种质数量最为突出,远优于8 h浸泡处理(种子含水量56.2%),两种处理下含水量差异虽仅有5.8%,然而诱变效果却相差极大,表明燕麦种子的不同生理状态对EMS诱发突变有很大影响。过高的种子含水量(8 h浸泡处理)使种子代谢活动恢复,可能使细胞内DNA修复系统更为活跃,部分清除了EMS诱发的突变,从而降低了突变的固定与遗传的概率^[26]。在性状变异方面,分蘖与鲜重性状的变异系数显著高于株高、穗长等其他性状,表明分蘖和鲜重对EMS诱变更敏感,更容易产生可遗传变异,这与陈彩锦等^[27]对244份饲用燕麦的表型变异调查结果一致。这种敏感性差异在不同处理间表现显著,B处理(0 h浸泡+EMS+GA₃)在诱导“有效分蘖增加”上表现突出,而E处理(4 h浸泡+EMS+GA₃)在“鲜重增加”上诱变效率最高。表明种子生理状态差异会影响EMS的吸收,从而影响突变发生的位点、类型或分布,最终导致优势性状的差异。株高、叶长、主穗长未筛选到正向变异,除了可能与设定的突变阈值有关外^[28-29],也不能排除这些性状本身对EMS诱变的敏感性相对较低,或者本试验M₂代群体规模仍不足以捕获到这些性状的稀有有益突变。后续研究可针对不同目标性状调整突变阈值并考虑扩大群体规模。本研究通过优化种子含水量并结合外源赤霉素后处理,显著提高了EMS诱变效率。优化后的方法在有效拓宽遗传多样性的同时,缓解了诱变引起的生理胁迫,提高了突变体成活率。满琴^[11]通过EMS诱变筛选到一个燕麦耐盐新种质,霍朋杰等^[8]通过EMS诱变鉴定并筛选到能稳定遗传的黄化苗株系。然而,针对饲用燕麦以“高产”为核心育种目标,系统优化诱变技术并定向

筛选高产种质的研究尚不足。本研究通过优化EMS诱变技术体系,筛选到13份表现优异的高产潜力种质。其中E处理(4 h浸泡+EMS+GA₃)不仅有效诱导最高比例的“鲜重增加”突变体,诱变效率达1.92%,同时还诱导了丰富的分蘖数极端变异。表明该处理方式创制的后代群体中,更有可能筛选出生物量与分蘖性状协同改良的高产新种质,为饲用燕麦的高产育种提供了直接且丰富的材料基础。

4 结论

本研究建立了一套“调节种子含水量-EMS诱变-外源赤霉素处理”的饲用燕麦高效化学诱变技术体系。即通过98%浓硫酸处理6 min去除燕麦稃皮障碍,调节种子含水量至50%(4 h浸泡)改善种子生理状态;再采用1% EMS处理16 h的最佳半致死诱变条件,最后外源施加50 mg·L⁻¹赤霉处理缓解诱变损伤。基于此构建M₂代诱变群体,经表型鉴定及诱变效率分析,M₂代获得13份高产潜力种质,其中4 h浸泡处理诱变组合产生的高产潜力种质最为丰富,诱变效率达到1.92%。通过后续世代精准筛选、基因功能解析,有望系统选育高产新种质。

参考文献

- [1] 叶雪玲,甘圳,万燕,等. 饲用燕麦育种研究进展与展望[J]. 草业学报,2023,32(2):160-177
YE X L, GAN Z, WAN Y, et al. Advances and perspectives in forage oat breeding[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(2): 160-177
- [2] GUO Y S, CHEN X F, WEI X H, et al. Oat leaf diseases: secondary metabolites of pathogenic fungi and infected plants and their toxicity[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2026, 74(1):97-126
- [3] 任志强,杨慧珍,卜华虎,等. 诱变在作物遗传育种中的应用进展[J]. 中国农学通报,2016,32(33):125-129
REN Z Q, YANG H Z, BU H H, et al. Research progress of mutation in crop genetics breeding [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(33): 125-129
- [4] 李娇娇,王晓光,白梦岚,等. 农杆菌介导的植物非组培遗传转化技术研究进展[J]. 浙江农林大学学报,2025,42(5):888-897
LI J J, WANG X G, BAI M L, et al. Research progress on *Agrobacterium*-mediated genetic transformation technology of plant non-tissue culture[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2025, 42(5):888-897
- [5] 王艺程,张世杰,丁寒雪,等. 甲基磺酸乙酯(EMS)在植物诱变育种中的应用[J]. 分子植物育种,2023, 21(19):6455-6462
WANG Y C, ZHANG S J, DING H X, et al. Application of Ethyl Methanesulfonate (EMS) in plant mutation breeding[J]. Molecular Plant Breeding, 2023, 21(19):6455-6462
- [6] 彭辉,穆麟,沈佳欣,等. 禾本科植物EMS诱变研究进展[J]. 植物遗传资源学报,2024,25(9):1417-1427

- PENG H, MU L, SHEN J X, et al. Research progress of EMS mutagenesis in gramineous plants[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, 25(9): 1417-1427
- [7] 李娟宁, 吕英, 赵桂琴, 等. 化学诱变剂EMS和MNU对燕麦种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 草原与草坪, 2021, 41(3): 108-118
- LI J N, LV Y, ZHAO G Q, et al. Effects of chemical mutagens EMS and MNU on seed germination and seedling growth of oat[J]. Grassland and Turf, 2021, 41(3): 108-118
- [8] 霍朋杰, 吴斌, 张宗文. 裸燕麦EMS突变体库筛选与分析[J]. 植物遗传资源学报, 2015, 16(2): 379-384
- HUO P J, WU B, ZHANG Z W. Identification and analysis of EMS mutant library in oat (*Avenanuda* L.) [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2015, 16(2): 379-384
- [9] 张娜. 燕麦EMS突变体库的建立及 β -葡聚糖合成关键基因AsCsLF6的Tilling分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011: 41
- ZHANG N. Establishment of EMS mutant library of oat and Tilling analysis of AsCsLF6, a key gene for β -glucan synthesis[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2011: 41
- [10] VIVEKANAND V, CHAWADE A, LARSSON M, et al. Identification and qualitative characterization of high and low lignin lines from an oat TILLING population [J]. Industrial Crops and Products, 2014, 59: 1-8
- [11] 满琴. 燕麦品种‘三分三’突变体库表型鉴定及耐盐突变体的筛选[D]. 雅安: 四川农业大学, 2024: 71
- MAN Q. Phenotypic identification of mutant pool of oat variety ‘Sanfensan’ and screening of salt-tolerant mutants[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2024: 71
- [12] 刘备, 宋玉梅, 孙铭, 等. 燕麦劣变种子吸胀过程中线粒体AsA-GSH循环的生理响应[J]. 草地学报, 2021, 29(2): 211-219
- LIU B, SONG Y M, SUN M, et al. Physiological responses of mitochondrial AsA-GSH cycle to imbibition of deteriorated oat seeds[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(2): 211-219
- [13] 周文期, 连晓荣, 周玉乾, 等. EMS诱变玉米自交系种质创新应用[J]. 玉米科学, 2020, 28(6): 31-38
- ZHOU W Q, LIAN X R, ZHOU Y Q, et al. Innovative application of EMS mutagenesis germplasm of maize inbred lines[J]. Journal of Maize Sciences, 2020, 28(6): 31-38
- [14] 宋凌宇, 何余, 李金平, 等. EMS诱变对大麦种子萌发及M1代植株成熟期主要性状的影响[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(9): 1096-1103
- SONG L Y, HE Y, LI J P, et al. Effects of EMS mutagenesis on the germination of barley seeds and the main traits at maturity of M1 generation[J]. Journal of Triticeae Crops, 2024, 44(9): 1096-1103
- [15] CHEN C X, GE F Y, DU H L, et al. A comprehensive omics resource and genetic tools for functional genomics research and genetic improvement of sorghum[J]. Molecular Plant, 2025, 18(4): 703-719
- [16] 刘正杰, 张全, 林春, 等. 藜麦EMS诱导条件优化及穗突变体的筛选[J]. 种子, 2022, 41(4): 6-12
- LIU Z J, ZHANG Q, LIN C, et al. Optimization of EMS induction conditions and screening of panicle mutants in *Chenopodium quinoa* wild[J]. Seed, 2022, 41(4): 6-12
- [17] 杨崇庆, 常耀军, 杨娇, 等. 燕麦生产及品种选育技术研究进展[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(5): 578-584
- YANG C Q, CHANG Y J, YANG J, et al. Research progress of oats production and breeding selection technology[J]. Journal of Triticeae Crops, 2022, 42(5): 578-584
- [18] 王德贵, 董永梅, 冉强, 等. 四川饲用燕麦研究进展[J]. 草学, 2025(3): 1-5, 13
- WANG D G, DONG Y M, RAN Q, et al. Research progress of forage oat in Sichuan[J]. Journal of Grassland and Forage Science, 2025(3): 1-5, 13
- [19] 马祥, 琚泽亮, 贾志锋, 等. 贮藏前含水量及贮藏方式对燕麦种子活力的影响[J]. 草地学报, 2026, 34(2): 687-701
- MA X, JU Z L, JIA Z F, et al. Effects of storage methods and water contents before storage on oat seed vitality [J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(2): 687-701
- [20] 吴正景, 职铃华, 刘素娟, 等. 化学诱变提高植物抗逆性的研究进展[J]. 核农学报, 2024, 38(2): 274-281
- WU Z J, ZHI Q H, LIU S J, et al. Chemical mutagenesis in improving plant stress resistance[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2024, 38(2): 274-281
- [21] 沈佳欣, 穆麟, 汤鲜丽, 等. 野大豆种子EMS化学诱变条件筛选及验证[J]. 草地学报, 2025, 33(10): 3469-3476
- SHEN J X, MU L, TANG X L, et al. Screening and validation of EMS-mediated chemical mutagenesis conditions for *Glycine soja* sieb. et Zucc. Seeds [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(10): 3469-3476
- [22] 王惠知, 廖志敏, 张哲, 等. EMS处理对老芒麦种子萌发和生理生化指标的影响[J]. 草地学报, 2025, 33(6): 1834-1842
- WANG H Z, LIAO Z M, ZHANG Z, et al. Effects of EMS treatment on germination and the physiological and biochemical indicators of *Elymus sibiricus* [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(6): 1834-1842
- [23] 岳海燕, 孙群策, 张树振, 等. 外源赤霉素(GA3)喷施对紫花苜蓿农艺性状及饲草产量的影响[J]. 饲料研究, 2025, 48(16): 110-114
- YUE H Y, SUN Q C, ZHANG S Z, et al. Effects of exogenous gibberellin (GA3) spraying on agronomic traits and forage yield of alfalfa [J]. Feed Research, 2025, 48(16): 110-114
- [24] XU P Z, ZHANG Q L, XUE L, et al. Genome-wide association analyses reveal the genetic basis of EMS mutagenesis efficiency in rice [J]. Advanced Science, 2026, 13(8): e17647
- [25] ALTINDAL N, KARADOĞAN T, ALTINDAL D. Genetic variation in EMS-treated potato calli assessed by ISSR [J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC), 2025, 163(2): 79
- [26] VENTURA L, DONÀ M, MACOVEI A, et al. Understanding the molecular pathways associated with seed vigor [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2012, 60: 196-206
- [27] 陈彩锦, 马琳, 蒋庆雪, 等. 244份饲用燕麦种质资源表型性状遗传多样性分析[J]. 中国农业科学, 2025, 58(23): 4825-4836
- CHEN C J, MA L, JIANG Q X, et al. Genetic diversity analysis of phenotypic traits of 244 forage oat germplasm resources [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2025, 58(23): 4825-4836
- [28] 袁凯, 张伟, 温宏伟, 等. EMS诱导济麦22突变体库的构建及表型变异分析[J]. 植物遗传资源学报, 2021, 22(4): 979-988
- YUAN K, ZHANG W, WEN H W, et al. EMS-induced mutagenesis and phenotypic variation analysis in wheat variety Jimai 22 [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2021, 22(4): 979-988
- [29] 豆飞飞, 任毓昭, 王石磊, 等. 宁春4号小麦EMS突变体库的构建及表型变异分析[J]. 生物技术通报, 2025, 41(8): 92-101
- DOU F F, REN Y Z, WANG S L, et al. Construction and phenotypic variation analysis of ningchun No. 4 wheat EMS mutant library [J]. Biotechnology Bulletin, 2025, 41(8): 92-101

(责任编辑 刘婷婷)