

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.08.010

引用格式:钟志花,卢茂金,杨国栋,等.PEG前处理对饲用燕麦种子EMS诱变效应的影响[J].草地学报,2026,34(8):2857—2865

ZHONG Zhi-hua, LU Mao-jin, YANG Guo-dong, et al. Effects of PEG Pretreatment on EMS-induced Mutagenesis in Forage Oat(*Avena sativa* L.) Seeds[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(8):2857—2865

PEG前处理对饲用燕麦种子EMS诱变效应的影响

钟志花¹, 卢茂金¹, 杨国栋¹, 刘朝¹, 王蓉¹, 闫明科¹, 郭欢¹, 马祥², 王亚芳^{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:为优化饲用燕麦(*Avena sativa* L.)诱变技术,提高饲用燕麦的诱变效率,本研究以‘青海444’和‘中天4号’种子为材料,采用PEG渗透调节前处理协同EMS化学诱变处理,筛选高效的饲用燕麦复合诱变条件。综合两个燕麦品种M₁代种子发芽特征及种苗特性,发现20% PEG 3 h和10% PEG 6 h前处理条件能够促进幼苗生长;两个燕麦品种的最适EMS处理条件分别为1% EMS 16 h(‘中天4号’)和0.75% EMS 16 h(‘青海444’)。通过对PEG和EMS复合处理后M₂代乳熟期田间农艺性状综合分析,发现两个品种在30% PEG处理3 h协同最适EMS处理条件,在创制高产潜力种质方面效果最佳,其M₂代诱变效率分别为2.40%(‘中天4号’)和1.26%(‘青海444’),共获得具有高产潜力的种质材料22份,为后续燕麦育种提供了变异丰富的材料基础。

关键词:饲用燕麦;诱变;EMS;PEG;高产;种质

中图分类号:S324

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)08-2857-09

Effects of PEG Pretreatment on EMS-induced Mutagenesis in Forage Oat(*Avena sativa* L.) Seeds

ZHONG Zhi-hua¹, LU Mao-jin¹, YANG Guo-dong¹, LIU Chao¹, WANG Rong¹, YAN Ming-ke¹, GUO Huan¹, MA Xiang², WANG Ya-fang^{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: To optimize the EMS-induced mutagenesis technology of forage oat (*Avena sativa* L.) and improve mutagenic efficiency, seeds of Oat cultivar ‘Qinghai 444’ and ‘Zhongtian No. 4’ were used as materials in this study. PEG osmotic priming was combined with EMS chemical mutagenesis to screen for optimum compound mutagenesis conditions for forage oat. Based on the germination characteristics and seedling traits of the M₁ generation in the two oat cultivars, the pretreatment conditions of 20% PEG for 3 h and 10% PEG for 6 h were found to promote seedling growth. The optimal EMS treatment conditions were 1% EMS for 16 h for ‘Zhongtian No. 4’ and 0.75% EMS for 16 h for ‘Qinghai 444’. Through a comprehensive analysis of field agronomic traits at the milk stage in the M₂ generation after combined PEG and EMS treatments, it was found that 30% PEG for 3 h combined with the optimal EMS treatment produced the best results for developing germplasm with high-yield potential in both cultivars. Under these conditions, the mutagenesis efficiencies of the M₂ population were 2.40% for ‘Zhongtian No. 4’ and 1.26% for ‘Qinghai 444’, respectively, and a total of 22 germplasm lines with high-yield potential were obtained. These results provide a rich material basis for subsequent oat breeding.

Key words: Forage Oat; Mutagenesis; EMS; PEG; High yield; Germplasm

燕麦(*Avena sativa* L.)是重要的粮饲兼用作物^[1]。因其抗寒、耐旱、耐贫瘠等特点,在我国西北、

华北、西南等高纬度、高海拔地区广泛种植^[2-3]。燕麦不仅籽粒营养丰富,其茎叶中蛋白质、脂肪及可

收稿日期:2026-02-23;修回日期:2026-04-19

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: zhihua@nwfau.edu.cn;

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

消化纤维含量较高,饲用价值显著^[4-5]。然而,饲用燕麦优良品种缺乏^[6],通过遗传改良手段进一步提高燕麦的产量、营养品质及适应性,对推动饲用燕麦新品种选育与产业化发展具有重要意义^[7]。

诱变育种是拓宽遗传基础、创制新种质的重要手段。甲基磺酸乙酯(Ethyl methanesulfonate, EMS)是一种高效的烷化诱变剂,可诱导基因发生点突变,已广泛应用于水稻(*Oryza sativa*)、小麦(*Triticum aestivum*)、玉米(*Zea mays*)等作物的遗传改良中^[8-9]。EMS诱变技术的关键在于精准控制诱变强度和构建高效的突变体筛选体系^[10]。目前一般采用半致死率或半致矮率确定最佳EMS诱变强度,从而平衡突变频率和材料的存活率,进而构建变异丰富的后代突变体库。然而,不同基因型材料对EMS的敏感性存在较大差异,且诱变效应易受种子自身结构特性和生理状态等因素影响,因而EMS诱变体系的优化还有较大的提升空间^[11]。目前,EMS诱变在饲用燕麦育种中的研究应用较少,且尚无对诱变后代的田间诱变效率进行系统的研究。为提升饲用燕麦的诱变效应,本研究首先对饲用燕麦进行去稃皮处理,以破除EMS渗入燕麦种子的机械屏障,然后采用聚乙二醇(PEG)对燕麦种子进行渗透调节处理,通过控制水势使其缓慢、同步吸水,激活种子内部的细胞代谢,从而达到EMS诱变的敏感状态。通过不同EMS浓度和时间下种子的发芽特征和种苗特性,确定最适EMS诱变处理(半致死条件)。在此基础上,将优化后的PEG渗透调节条件与最适EMS诱变处理相结合,筛选M₂代具有高产潜力的优异突变单株,以期实现生理调控与EMS诱变的高效协同,为创制燕麦新种质提供可靠方法。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试饲用燕麦种子为‘中天4号’(由中国农业科学院兰州畜牧与兽药研究所提供)和‘青海444’(由青海大学畜牧兽医科学院提供)。

1.2 试验方法

1.2.1 PEG渗透调节前处理条件筛选 选取大小均匀、饱满的皮燕麦种子,分别用0%,10%,20%,30%浓度的PEG-6000溶液浸泡,置于150 r·min⁻¹控温摇床中进行不同时间(1.5 h,3 h,6 h,12 h,24 h)

的震荡处理,用自来水冲洗5 min,摊开自然晾干后进行发芽试验。

1.2.2 EMS诱变条件筛选 皮燕麦种子去稃皮后,用蒸馏水4℃浸泡4 h,用吸水纸去除种子表面残留水分,加入不同浓度(0%,0.50%,0.75%,1.00%)EMS-PBS溶液,处理8 h,12 h和16 h,共12个处理条件。诱变结束后,用5%硫代硫酸钠进行解毒30 min并用流水冲洗2 h,进行发芽试验。

1.2.3 种子萌发 用蒸馏水湿润种子发芽袋(phytoTC公司生产),将种子腹沟朝下分散在种子发芽袋中。在2000 lx,25℃/20℃,16 h/8 h光周期培养条件下进行萌发,在第10天统计种子的发芽率。每组处理50粒种子,3次重复。每个重复随机选取10个燕麦幼苗测定根长和苗长。

1.2.4 PEG协同EMS复合诱变处理 根据PEG处理发芽试验初步筛选4个PEG处理条件(10% 3 h,20% 3 h,30% 3 h和10% 6 h)处理燕麦种子,然后采用1.2.2筛选的最适EMS诱变条件进行处理。将诱变后的种子置于发芽袋中,用50 mg·L⁻¹的赤霉素(GA₃)进行外源处理以促进诱变种子萌发。以未进行任何处理的种子为对照(CK)。

1.2.5 EMS复合诱变群体的构建及农艺性状分析 将燕麦种子分别进行PEG和EMS诱变复合处理,其中‘中天4号’和‘青海444’各处理诱变种子分别为208粒和238粒,同时种植未经处理的种子作对照(CK),M₁代种植于西北农林科技大学加代室中(培养条件为2000 lx,25℃/20℃,16 h/8 h光周期),成熟后单株收种。M₂代按株行法于2025年5月种植在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,行距和株距均为40 cm。乳熟期田间农艺性状调查:株高、分蘖数、旗叶面积、主穗长、茎粗、鲜重。在乳熟期对各株系选择有代表性的4株测定农艺性状,同时测定对照94株。本研究根据M₂代田间表型数据的总体分布特征,并结合后续突变体鉴定和种质筛选的实际需求,综合确定每个性状诱变材料的筛选标准为:高于或低于对照均值的30%。诱变效率为每个处理M₂代的诱变材料数占M₀代诱变种子总数的百分比。

2 结果与分析

2.1 PEG处理对饲用燕麦种子萌发及幼苗生长的影响 不同时间和浓度的PEG处理对两个品种燕麦

种子发芽率(图1a和图1d)和根长(图1c和图1f)没有显著影响,但对苗长有显著影响($P<0.05$)(图1b和图1e),20% PEG 3 h和10% PEG 6 h分别促进了‘中天4号’和‘青海444’的苗长。基于两个品种

的发芽与幼苗生长特征,初步选择同一处理时间下(3 h)不同PEG浓度(10%,20%和30%)及低浓度(10% PEG)相对延长时间(6 h)用于后续分析PEG前处理对EMS诱变效应的影响。

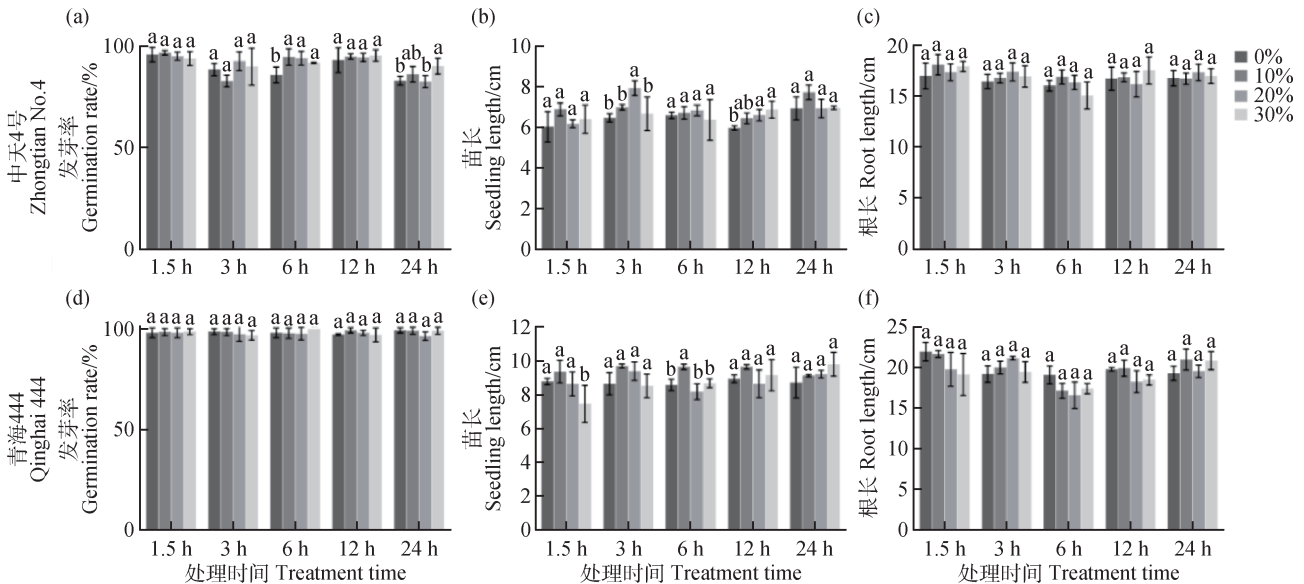


图1 PEG前处理对2个燕麦品种种子萌发及幼苗生长的影响

Fig. 1 Effects of PEG pretreatment on seed germination and seedling growth of two oat cultivars

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 above the bars indicate significant differences at the $P<0.05$ level based on Duncan's test. The same as below

2.2 饲用燕麦种子最适EMS处理条件筛选

在相同处理时间条件下,随着EMS处理浓度的增加(0.75%~1.00%),燕麦种子的发芽率显著降低($P<0.05$),尤其是处理16 h时,EMS对发芽率、苗长、根长的抑制效应最明显(图2a~c)。当EMS处理条件为1% 16 h时,‘中天4号’种子的发芽率为57%,相对发芽率为0.58,接近半致死条件;根长和苗长分别为对照的47%和58%。因此,依据半致死效应和半致死矮条件,‘中天4号’最适的EMS处理条件为1% EMS处理16 h。

EMS处理对‘青海444’种子萌发和幼苗生长的抑制效应大于‘中天4号’,表明‘青海444’对EMS敏感性更强(图2d~f)。相同处理时间下,随着EMS浓度的增加(0.5%~1.00%),‘青海444’种子发芽率、苗长及根长均受到显著抑制($P<0.05$),且根系对EMS更为敏感。0.75% EMS 16 h处理下,‘青海444’种子发芽率降至48%,接近半致死效应。因此,‘青海444’最适的EMS处理条件为0.75% EMS处理16 h。

2.3 PEG协同EMS诱变对饲用燕麦种子萌发及幼苗生长的影响

仅EMS处理显著抑制了‘中天4号’种子的萌发和幼苗生长,而PEG协同EMS处理则在不同程度上缓解了这种抑制效应(图3)。PEG前处理均显著提高了‘中天4号’苗长($P<0.05$),尤其是10% PEG 6 h处理下苗长和根长最长(图3b和3c)。与‘中天4号’相似,单独EMS处理显著抑制了‘青海444’种子的发芽率($P<0.05$)。而PEG前处理显著提高了EMS诱变处理的发芽率和苗长。因此,PEG前处理对不同燕麦品种EMS诱变后发芽率影响不同,但均能促进幼苗生长。

2.4 PEG协同EMS诱变效率分析

各处理均诱导产生了广泛的农艺性状变异,尤其在分蘖数和生物量等产量相关性状上诱变效率在不同处理间差异明显。分蘖数和单株鲜重是影响燕麦产量的关键因素,在不同处理间诱变效率存在显著差异(表1和表2)。(‘中天4号’各处理均更易诱发“有效分蘖数减少”的突变,其中E处理(30%

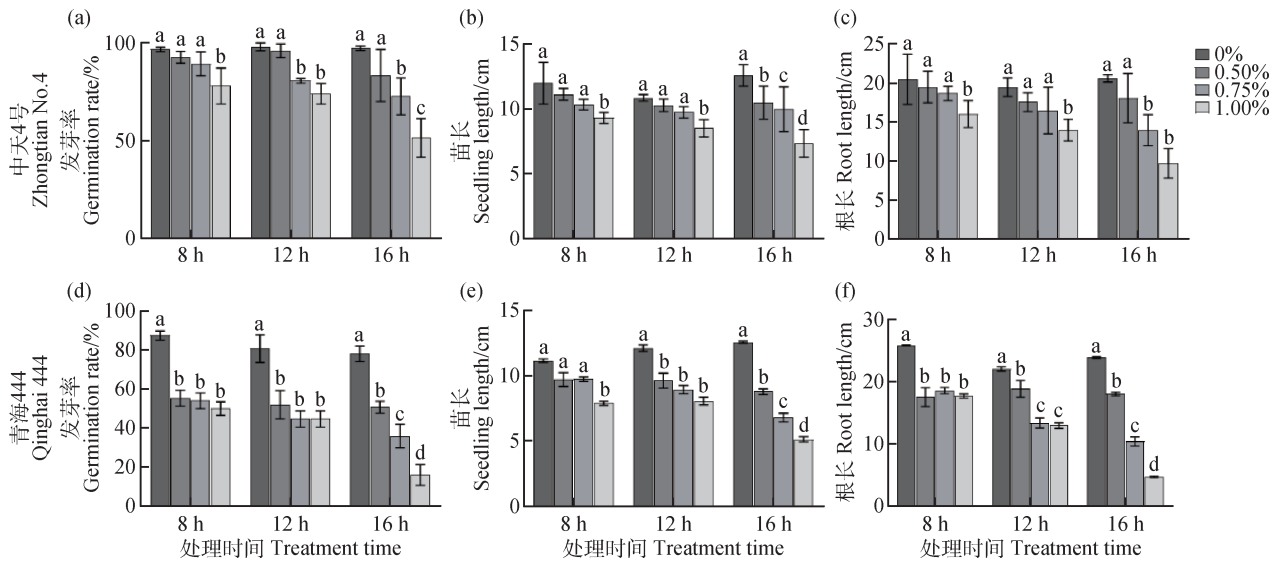


图2 EMS处理对2个燕麦品种种子萌发及幼苗生长的影响

Fig. 2 Effects of EMS on seed germination and seedling growth of two oat varieties

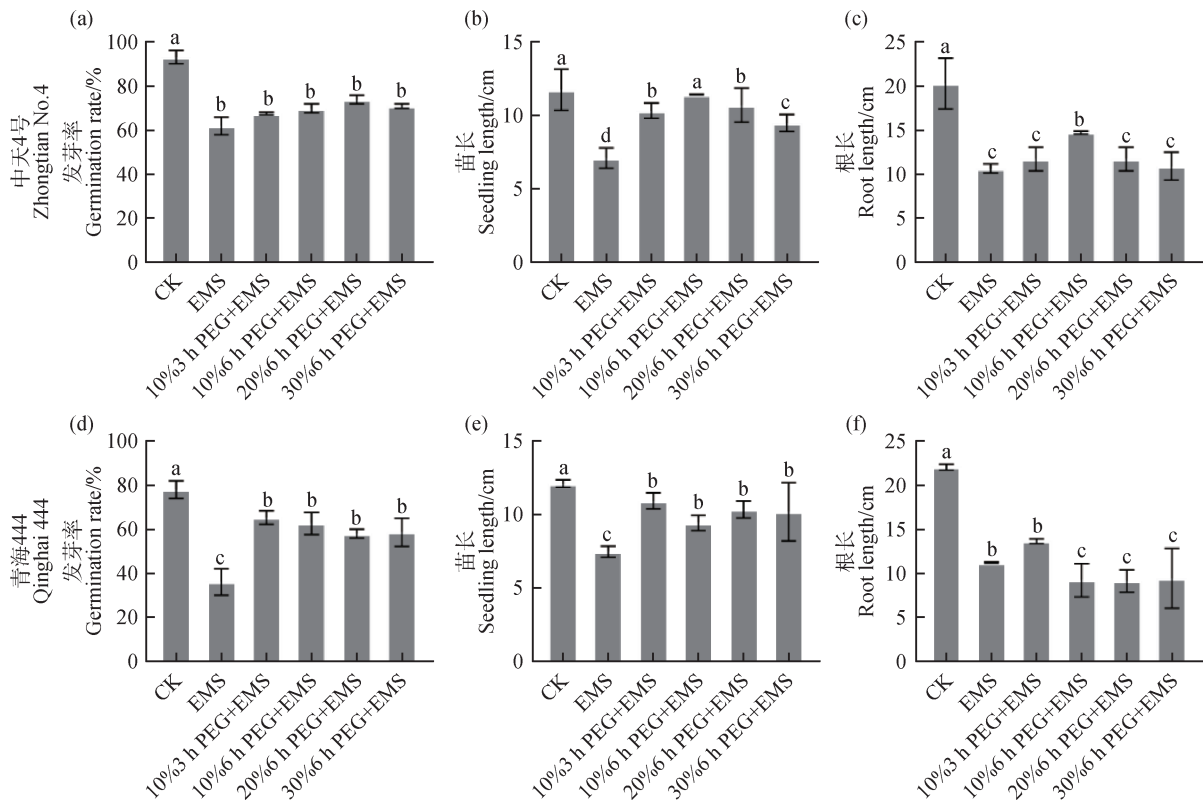


图3 PEG协同EMS诱变对2个燕麦品种种子萌发及幼苗生长的影响

Fig. 3 Effects of combined PEG and EMS mutagenesis on seed germination and seedling growth of two oat varieties

PEG 3 h + EMS)高达29.81%,但其诱导的“有效分蘖增加”诱变效率高达9.13%,为所有处理中最高,是筛选多分蘖高产单株的最优群体。E处理诱导的单株“鲜重增加”诱变效率为2.40%,表明其群体中存在生物量显著增加的突变体。因此,根据 M_2 代田间表型分析,“中天4号”最佳诱变条件为30% PEG处理3 h后,采用1.00% EMS处理16 h。

“青海444”J处理(30% PEG处理3 h)在诱导“总分蘖增加”方面具有显著效果,诱变效率为9.24%,为所有处理中最高,为筛选“多分蘖”种质提供了最丰富的资源。除了分蘖数,J处理诱导的“鲜重增加”诱变效率为1.26%,表明该群体中含有大量生物量显著增加的个体。其“旗叶面积增加”和“主穗长增加”诱变效率分别为6.72%和2.10%,

有助于筛选出光合效率高、种子产量高的种质。因此,从筛选高产种质的育种目标出发,‘青海 444’最佳诱变条件为 30% PEG 处理 3 h 后,采用 0.75% EMS 处理 16 h。

综上,30% PEG 处理 3 h 协同 0.75%~1% EMS 处理 16 h 是两个燕麦品种较优的复合诱变条件,在此条件下,M₂代产量相关性状的正向诱变效率达到最高。

表 1 ‘中天 4 号’ PEG 协同 EMS 诱变组合处理 M₂代田间诱变效率

Table 1 Field mutagenic efficiency of M₂ population by the combined PEG and EMS treatment in ‘Zhongtian No. 4’

处理 Treatment		A		B		C		D		E	
性状 Trait	突变类型 Mutant type	突变数量 Number of mutants	诱变效率 Mutation frequency/%	突变数量 Number of mutants	诱变效率 Mutation frequency/%	突变数量 Number of mutants	诱变效率 Mutation frequency/%	突变数量 Number of mutants	诱变效率 Mutation f requency/%	突变数量 Number of mutants	诱变效率 Mutation frequency/%
株高 Plant height/cm	增加 Increase	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	减少 Decrease	0	0.00	0	0.00	2	0.96	5	2.40	2	0.96
总分蘖 Total tiller/number	增加 Increase	4	1.92	5	2.40	6	2.88	6	2.88	19	9.13
	减少 Decrease	10	4.81	9	4.33	21	10.10	24	11.54	17	8.17
有效分蘖 Effective tiller/number	增加 Increase	2	0.96	5	2.40	6	2.88	9	4.33	19	9.13
	减少 Decrease	17	8.17	16	7.69	32	15.38	39	18.75	62	29.81
旗叶面积 Flag leaf area/cm ²	增加 Increase	2	0.96	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	减少 Decrease	3	1.44	6	2.88	13	6.25	14	6.73	23	11.06
茎粗 Stem diameter/mm	增加 Increase	1	0.48	1	0.48	3	1.44	0	0.00	3	1.44
	减少 Decrease	1	0.48	1	0.48	0	0.00	1	0.48	1	0.48
主穗长 Main panicle length/cm	增加 Increase	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	减少 Decrease	0	0.00	2	0.96	3	1.44	3	1.44	4	1.92
鲜重 Fresh weight/g	增加 Increase	1	0.48	3	1.44	2	0.96	2	0.96	5	2.40
	减少 Decrease	6	2.88	9	4.33	14	6.73	21	10.10	26	12.50

注: A 种子用蒸馏水浸泡 3 h 后经 EMS 处理; B 种子用 10% PEG 处理 3 h 后经 EMS 处理; C 种子用 10% PEG 处理 6 h 后经 EMS 处理; D 种子用 20% PEG 处理 3 h 后经 EMS 处理; E 种子用 30% PEG 处理 3 h 后经 EMS 处理

Note: A, distilled water soaking for 3 h followed by EMS treatment; B, 10% PEG treatment for 3 h followed by EMS treatment; C, 10% PEG treatment for 6 h followed by EMS treatment; D, 20% PEG treatment for 3 h followed by EMS treatment; E, 30% PEG treatment for 3 h followed by EMS treatment

2.5 PEG 协同 EMS 诱变群体高产潜力优异种质筛选

依据单株鲜重高于对照均值的 30% 的筛选标准,共筛选出 13 份‘中天 4 号’和 9 份‘青海 444’具有高产潜力的株系,其具体农艺性状见表 3 和表 4。‘中天 4 号’所有种质材料分蘖能力普遍增强,所有诱变单株的总分蘖数(25~38)均高于 CK,其中 2Z325-4 总分蘖数最多。2Z263-2 的鲜重(1456 g)和 2Z236-3 的干重(407.6 g)最高,较对照鲜重增加 83.4%,干重增加 141.6%。2Z232-1(170.1 cm)株高最高,较对照株高增加 13.9%,而 2Z339-2(117.3 cm)则呈现明显的矮化特征。2Z232-1、2Z341-3 和 2Z251-4 的旗叶面积最大,分别为 141.32 cm², 138.11 cm² 和 130.21 cm²,较对照分别增加 33.9%, 30.9% 和 23.4%,同时,2Z251-4 的茎粗达到 13.37 mm。2Z236-3 和 2Z263-4 的主穗长分别为 43.4 cm 和 43.5 cm,较对照分别增加 14.2% 和 14.5%。

‘青海 444’所有诱变单株的总分蘖数介于 12~

20 个之间,其中 2Q486-2 总分蘖数最多,达 20 个,较对照增加 85.2%。有效分蘖数在 3~11 个之间波动,2Q486-2(11 个)、2Q584-2(10 个)和 2Q630-3(10 个)的有效分蘖数最多,较对照有效分蘖数分别增加 74.6%, 58.7%, 58.7%。2Q486-2 的鲜重最高(682.9 g),较对照鲜重增加 77.0%, 2Q630-3 的干重最高(185.6 g),较对照干重增加 60.6%。2Q584-2 的株高最高(134.1 cm),而 2Q599-2 则表现出明显的矮化特性(95.8 cm)。多数单株茎粗与 CK 接近,其中 2Q535-3 的茎粗最粗(9.84 mm)。2Q630-3 的旗叶面积最大,为 57.18 cm²,其次为 2Q623-4(54.06 cm²)和 2Q614-1(53.44 cm²)。同时,2Q630-3 的主穗长也最长(30.2 cm)。

3 讨论

3.1 EMS 诱变条件优化

在现有作物诱变育种研究中,为平衡诱变效率

表 2 ‘青海 444’ PEG 协同 EMS 诱变组合处理 M₂代田间诱变效率

Table 2 Field mutagenic efficiency of M₂ population by the combined PEG and EMS treatment in ‘Qinghai 444’

处理 Treatment		F		G		H		I		J	
性状 Trait	突变类型 Mutant type	突变数量 Number of mutants	诱变效率 Mutation frequency/%	突变数量 Number of mutants	诱变效率 Mutation frequency/%	突变数量 Number of mutants	诱变效率 Mutation frequency/%	突变数量 Number of mutants	诱变效率 Mutation frequency/%	突变数量 Number of mutants	诱变效率 Mutation frequency/%
株高	增加 Increase	0	0.00	0	0.00	0	0.00	1	0.42	0	0.00
Plant height/cm	减少 Decrease	5	2.10	4	1.68	8	3.36	0	0.00	8	3.36
总分蘖	增加 Increase	0	0.00	5	2.10	13	5.46	17	7.14	22	9.24
Total tiller/number	减少 Decrease	55	23.11	28	11.76	71	29.83	28	11.76	21	8.82
有效分蘖	增加 Increase	1	0.42	9	3.78	10	4.20	21	8.82	16	6.72
Effective tiller/number	减少 Decrease	47	19.75	29	12.18	74	31.09	22	9.24	35	14.71
旗叶面积	增加 Increase	5	2.10	4	1.68	6	2.52	5	2.10	16	6.72
Flag leaf area/cm ²	减少 Decrease	25	10.50	35	14.71	65	27.31	42	17.65	29	12.18
茎粗	增加 Increase	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
Stem diameter/mm	减少 Decrease	10	4.20	13	5.46	31	13.03	7	2.94	13	5.46
主穗长	增加 Increase	0	0.00	3	1.26	1	0.42	2	0.84	5	2.10
Main panicle length/cm	减少 Decrease	45	18.91	29	12.18	83	34.87	37	15.55	28	11.76
鲜重	增加 Increase	0	0.00	3	1.26	1	0.42	2	0.84	3	1.26
Fresh weight/g	减少 Decrease	45	18.91	29	12.18	83	34.87	37	15.55	28	11.76

注: F 种子用蒸馏水浸泡 3 h 后经 EMS 处理; G 种子用 10% PEG 处理 3 h 后经 EMS 处理; H 种子用 10% PEG 处理 6 h 后经 EMS 处理; I 种子用 20% PEG 处理 3 h 后经 EMS 处理; J 种子用 30% PEG 处理 3 h 后经 EMS 处理

Note: F, seeds were soaked in distilled water for 3 h before EMS treatment; G, seeds were treated with 10% PEG for 3 h before EMS treatment; H, seeds were treated with 10% PEG for 6 h before EMS treatment; I, seeds were treated with 20% PEG for 3 h before EMS treatment; J, seeds were treated with 30% PEG for 3 h before EMS treatment

表 3 ‘中天 4 号’ PEG 协同 EMS 诱变 M₂代群体高产潜力种质性状

Table 3 Traits of high-yield potential germplasm in the M₂ population of ‘Zhongtian No. 4’ induced by PEG-synergized 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	叶片数 Leaf number/ number	鲜重 Fresh weight/ g	干重 Dry weight/ g	诱变方式 Mutagenesis method
CK	149.35	24	13	40.9	3.1	105.50	10.00	38.	5	794.0	168.7	—
ZZ20-2	143.5	25	15	41.1	3.3	112.80	10.48	39.3	5	1080.8	235.9	4 h + EMS
ZZ229-3	148	29	12	41.2	3.1	106.22	10.57	38.4	6	1118.0	213.7	10% PEG 3 h + EMS
ZZ232-1	170.1	32	13	47.2	3.6	141.32	11.06	37.6	6	1330.0	289.0	10% PEG 3 h + EMS
ZZ236-3	158.1	31	15	40.9	3.2	108.85	11.05	43.4	5	1424.0	407.6	10% PEG 3 h + EMS
ZZ251-2	156.1	36	7	36.1	3.3	99.10	11.25	41.6	5	1204.0	222.3	10% PEG 3 h + EMS
ZZ263-2	159.8	35	11	37.3	3	93.10	9.96	32.5	5	1456.0	259.3	10% PEG 6 h + EMS
ZZ280-2	140.5	25	7	42.3	3.1	109.06	10.23	38.8	5	1054.0	196.6	20% PEG 3 h + EMS
ZZ282-2	138.4	32	9	40.9	3.2	108.85	8.40	41.2	5	1131.5	265.6	20% PEG 3 h + EMS
ZZ322-2	136.9	33	14	50.5	3.1	130.20	8.70	38.5	5	1266.0	270.5	30% PEG 3 h + EMS
ZZ325-4	152.4	38	14	36.0	3.5	104.79	9.60	37.4	5	1349.6	253.0	30% PEG 3 h + EMS
ZZ334-1	144.3	34	16	41.2	3.2	109.70	11.40	38.7	5	1144.3	241.0	30% PEG 3 h + EMS
ZZ339-2	117.3	31	3	35.6	3.3	97.71	11.30	35.4	5	1226.5	221.9	30% PEG 3 h + EMS
ZZ341-3	159.2	34	11	43.7	3.8	138.11	10.60	37.6	5	1294.0	230.5	30% PEG 3 h + EMS

与植株存活率,通常以半致死剂量作为筛选最佳诱变条件的标准^[12-13]。但不同物种、不同品种对 EMS 诱变剂的敏感性不一致,因此各品种的最适诱变处理往往不一致^[14]。已有研究表明,高粱的半致死剂量为 0.4% EMS 处理 16 h^[15],大麦的半致死剂量为 0.4% EMS 处理 16 h^[16],裸燕麦为 0.7% EMS 处理

15 h^[17],本研究结果表明饲用燕麦品种‘中天 4 号’的最适诱变处理为 1% EMS 处理 16 h,‘青海 444’的最适诱变处理为 0.75% EMS 处理 16 h,说明不同基因型对 EMS 处理的响应存在明显差异,其中‘青海 444’对 EMS 更为敏感。然而,在 EMS 诱变前对种子进行前处理以提高诱变敏感性的研究相

表 4 ‘青海 444’PEG 协同 EMS 诱变 M₂代群体高产潜力种质性状

Table 4 Traits of high-yield potential germplasm in the M₂ population of ‘Qinghai 444’ induced by PEG-synergized 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	叶片数 Leaf number/ number	鲜重 Fresh weight/ g	干重 Dry weight/ g	诱变方式 Mutagenesis method
CK	121.7	10.8	6.3	24	2.2	45.20	8	25.8	4	385.8	115.6	—
2Q485-1	126.0	12	8	20.6	2.4	41.12	7.62	29.2	4	505.5	151.1	10% PEG 3 h+EMS
2Q486-2	126.7	20	11	20.9	1.7	29.55	6.67	26.1	4	682.9	186.1	10% PEG 3 h+EMS
2Q493-3	117.2	17	9	20.6	2.1	35.98	8.28	23.7	5	588.3	151.6	10% PEG 3 h+EMS
2Q535-3	127.3	12	6	28.4	2.2	51.96	9.84	27.9	4	503.3	125.2	10% PEG 6 h+EMS
2Q584-2	134.1	13	10	19.2	2.1	33.53	7.23	24.3	5	506.7	143.2	20% PEG 3 h+EMS
2Q599-2	95.8	15	3	19.2	1.9	30.34	8.9	26	5	529.7	113.8	20% PEG 3 h+EMS
2Q614-1	126.3	13	9	25.7	2.5	53.44	7.42	26.3	5	512.5	149.2	30% PEG 3 h+EMS
2Q623-4	123.2	16	9	25	2.6	54.06	7.25	27.7	4	588.7	142	30% PEG 3 h+EMS
2Q630-3	129.7	15	10	27.5	2.5	57.18	7.61	30.2	4	660.2	185.6	30% PEG 3 h+EMS

对较少。杨丽莉等在 EMS 诱变前通过高渗透 T 固体培养基胁迫处理大花萱草 (*Heimerocallis hybridus*) 愈伤组织,提高了 EMS 离体诱变率^[18]。陈喜明等在诱变前采用赤霉素处理打破红芸豆 (*Phaseolus vulgaris* L.) 种子休眠来提高诱变频率^[19]。这些研究表明,不同前处理策略在调节植物材料生理状态与诱变效率方面具有一定潜力。基于此,本研究将 PEG 处理作为 EMS 诱变的前处理,利用其渗透调节作用调整种子的生理状态,通过改变细胞的渗透势和膜透性,使种子对诱变剂更敏感,提高诱变效率^[20-22]。结果表明,PEG 前处理能够显著促进两个不同燕麦品种 EMS 诱变后幼苗的生长,且对‘青海 444’诱变后发芽率的提升更为明显,说明 PEG 前处理对不同基因型材料的作用效果存在差异。由此可见,PEG 前处理与 EMS 诱变条件的协同优化,对于提高饲用燕麦诱变效率具有重要意义。

3.2 EMS 诱导产生丰富的表型变异

表型性状是评估诱变效应最直接且可靠的指标^[23]。本研究发现 PEG 协同 EMS 诱变在两个燕麦品种中均能有效诱发表型变异,但不同处理组合的诱变效率存在显著差异,且不同品种的诱变响应不同^[24]。其中,两个品种的分蘖数诱变效率均较高,说明分蘖性状对 EMS 诱变剂敏感性强,这与袁凯^[25]、赵天祥等人^[26]的研究结果一致。在鲜重变异方面,两个品种均在 30% PEG 处理 3 h 协同各自适宜的 EMS 条件下,更易获得的“鲜重增加”突变体,且该表型常与分蘖数、叶面积增加等性状的协同出现^[27],这表明 PEG 协同 EMS 诱变的联合可能促进了多个高产相关性状的协同变异。其原因可能在

于,适度 PEG 前处理能够通过渗透调节促进种子缓慢而相对同步地吸水,使种子处于较为适宜的生理活化状态,从而提高其对 EMS 处理的敏感性。与此同时,0.75%~1% EMS 处理 16 h 具有较强的诱变作用,能够有效增加遗传变异。二者协同作用后,在提高 M₂代群体表型变异丰富度的同时,也较好地维持了群体的可利用性,因而更有利于优异突变体的筛选。说明该处理组合在诱变强度与材料存活、生长之间达到了相对较好的平衡,因而可作为两个燕麦品种较适宜的诱变条件。进一步推测,鲜重增加及其与分蘖数、叶面积增加的协同出现,可能并非由单一基因点突变引起,而更有可能是诱变处理影响了调控植株整体生长发育及源-库关系的上游通路,如赤霉素、独角金内酯等激素信号途径^[28-29]。因此,对这些突变体进行后续的生理与分子鉴定,将有助于阐明产量相关性状协同变异的调控机制,并为燕麦高产形成相关基因的挖掘提供材料基础。尽管化学诱变可诱导丰富的遗传变异^[30],且多数农艺性状的“减少”型诱变效率普遍高于“增加”型,但本研究通过优化诱变与筛选策略,仍成功获得了关键农艺性状正向突变,为高产育种提供了丰富的材料基础。

4 结论

本研究通过 2 个饲用燕麦品种的萌发特性、幼苗特征和田间表型鉴定,建立了饲用燕麦最优的 PEG 协同 EMS 诱变技术体系:去稃皮打破机械屏障后,采用 30% PEG 处理 3 h,再用 0.75%~1% EMS 处理 16 h。通过对 M₂代群体农艺性状分析,

获得了大量的突变材料,共鉴定出 22 个高产潜力突变体(单株鲜重高于对照 30%)。30% PEG 处理 3 h 协同 EMS 诱变技术体系产生的高产潜力种质最为丰富,诱变效率分别达 2.40% (‘中天 4 号’)和 1.26% (‘青海 444’),为后续燕麦育种提供了技术支撑和丰富的材料基础。

参考文献

- [1] 张波,任长忠. 燕麦基因组学与分子育种研究进展[J]. 植物学报,2022,57(6):785-791
ZHANG B, REN C Z. Advances in oat genomic research and molecular breeding [J]. Bulletin of Botany, 2022, 57 (6) : 785-791
- [2] 卫纪,高杨森,汪辉,等. 465 份燕麦种质资源表型遗传多样性分析及优异资源筛选[J]. 草地学报,2026,34(3):840-852
WEI J, GAO Y M, WANG H, et al. Phenotype genetic diversity analysis and screening for elite germplasm resources in 465 oat accessions[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(3):840-852
- [3] 张子臻,郑成忠,何竹青,等. 91 份燕麦种质资源农艺性状遗传多样性的鉴定评价[J]. 种子,2025,44(7):106-112
ZHANG Z Z, ZHENG C Z, HE Z Q, et al. Identification and evaluation on genetic diversity of agronomic traits in 91 *Avena sativa* germplasm resources[J]. Seed, 2025, 44(7):106-112
- [4] 任家辉,孙娟娟,郝莹璐,等. 内蒙古中部地区饲用燕麦品种筛选及青贮品质评价[J]. 中国农业科学,2025,58(19):4026-4038
REN J H, SUN J J, HAO Y L, et al. Screening of feed oat varieties and its evaluation of silage quality in central Inner Mongolia[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2025, 58(19):4026-4038
- [5] 周青平,颜红波,梁国玲,等. 不同燕麦品种饲草和籽粒生产性能分析[J]. 草业学报,2015,24(10):120-130
ZHOU Q P, YAN H B, LIANG G L, et al. Analysis of the forage and grain productivity of oat cultivars[J]. Acta Pratacul-turae Sinica, 2015, 24(10):120-130
- [6] 刘文辉,贾志锋,梁国玲. 我国饲用燕麦产业发展现状及存在的问题和建议[J]. 青海科技,2020,27(3):82-85
LIU W H, JIA Z F, LIANG G L. Present situation, existing problems and suggestions of feed oat industry in China[J]. Qinghai Science and Technology, 2020, 27(3):82-85
- [7] 任长忠,崔林,杨才,等. 我国燕麦高效育种技术体系创建与应用[J]. 中国农业科技导报(中英文),2016,18(1):1-6
REN C Z, CUI L, YANG C, et al. Establishment and application of high efficient breeding technology system of oat in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2016, 18(1):1-6
- [8] DORVLO I K, NI F, WANG H W. Harnessing ethyl methane-sulfonate (EMS) mutagenesis and multi-omics for wheat rust resistance gene discovery[J]. Trends in Plant Science, 2025, 30 (12):1405-1406
- [9] WANG H J, SUN F J, SHI Z Y, et al. A forward genetics strategy for high-throughput gene identification *via* precise image-based phenotyping of an indexed EMS mutant library [J]. Advanced Science, 2025, 12(47):e14793
- [10] 郭晓鹏,张书翰,贾承霖,等. 多技术融合驱动的重离子辐射诱变育种:从机制到应用[J]. 微生物学报,2026,66(4):1569-1584
GUO X P, ZHANG S H, JIA C L, et al. Heavy ion radiation-based mutation breeding driven by multi-technology integration: from mechanism to application[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2026, 66(4):1569-1584
- [11] 石海春,陈超杰,夏伟,等. EMS 对三个玉米自交系的诱变效应分析[J]. 广西植物,2016,36(8):906-914
SHI H C, CHEN C J, XIA W, et al. Analysis on mutagenic effects of EMS on three maize inbred lines[J]. Guihaia, 2016, 36(8):906-914
- [12] 李瑛,赵永伟,陈英,等. 化学诱变对胡麻‘定亚 23 号’种子萌发和 M1 代主要农艺性状的影响[J]. 作物杂志,2025(5):155-164
LI Y, ZHAO Y W, CHEN Y, et al. Effects of chemical mutagens on seed germination and main agronomic traits of M1 generation of Flax ‘Dingya 23’ [J]. Crops, 2025(5):155-164
- [13] 蒋榕,赵亿嘉,袁林,等. 不同化学诱变剂对苧麻种子萌发的影响[J]. 中国麻业科学,2022,44(5):278-284
JIANG R, ZHAO Y J, YUAN L, et al. Effects of different chemical mutagens on seed germination of ramie [J]. Plant Fiber Sciences in China, 2022, 44(5):278-284
- [14] 王斌,赵利,侯静静. EMS 诱变对不同基因型胡麻种子萌发及 M3 农艺性状和品质性状的影响[J]. 西北农业学报,2022,31 (9):1085-1093
WANG B, ZHAO L, HOU J J. Effects of EMS mutagenesis on seed germination of M0 generation, agronomic and quality traits of M3 generation in five flax varieties [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2022, 31(9):1085-1093
- [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] 柳小宁,包奇军,潘永东,等. EMS 对甘啤 8 号大麦种子萌发期及苗期的影响[J]. 种子,2022,41(11):78-84
LIU X N, BAO Q J, PAN Y D, et al. Effect of EMS on germination and seedling stage of beer barley Ganpi No. 8 [J]. Seed, 2022, 41(11):78-84
- [17] 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 (*Avena nuda* L.) [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2015, 16(2):379-384
- [18] 杨丽莉,刘化涛,杨睿,等. 一种渗透胁迫处理提高大花萱草 EMS 离体诱变率的方法:CN108377909A [P]. 2018-08-10
YANG L L. A method for improving the in vitro EMS mutagenesis efficiency in daylily (*Heimerocallis hybrida*) via osmotic stress treatment: China, CN201810109647. 6 [P]. 2018-08-10
- [19] 陈喜明,韩云丽,邵林生,等. 一种采用 EMS 诱变剂创制红芸豆突变体的方法及应用:CN108450325B [P]. 2021-08-03

- CHEN X M. A method for creating mutants of red kidney bean (*Phaseolus vulgaris*) using EMS mutagen and its application: China, CN201810117101.5[P]. 2021-08-03
- [20] 苏玮娟,赵桂琴,琚泽亮,等. 干旱胁迫时间对6份饲用燕麦种质萌发期生理指标的影响[J]. 草地学报,2022,30(3):646-654
- SU W J, ZHAO G Q, JU Z L, et al. Effects of drought stress duration on physiological indexes of 6 oat germplasms at germination stage[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(3):646-654
- [21] 杨筱. 小麦成熟胚愈伤组织诱导及分化的研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2015:69
- YANG X. Researches on callus induction and differentiation of wheat mature embryos[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2015:69
- [22] 方丽,尚增强. 渗透调节技术及其在种子处理中的应用[J]. 河南科技学院学报,2007(4):4-7
- FANG L, SHANG Z Q. Osmotic adjustment technology and its application in seed treatment[J]. Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007(4):4-7
- [23] 秦佳乐,宋立君,张芹,等. EMS诱导皂荚突变体的筛选及ISSR分析[J]. 北方园艺,2025(11):32-39
- QIN J L, SONG L J, ZHANG Q, et al. Screening and ISSR analysis of EMS-induced *Gleditsia sinensis* mutants[J]. Northern Horticulture, 2025(11):32-39
- [24] 蓝新隆,林武,夏春英,等. EMS诱变对油菜种子萌发及幼苗表型特征的影响[J]. 耕作与栽培,2025,45(11):16-21
- LAN X L, LIN W, XIA C Y, et al. Effect of EMS mutagenesis on seed germination and seedling phenotypic characteristics of oilseed rape[J]. Tillage and Cultivation, 2025, 45(11):16-21
- [25] 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
- [26] 赵天祥,孔秀英,周荣华,等. EMS诱变六倍体小麦偃展4110的形态突变体鉴定与分析[J]. 中国农业科学,2009,42(3):755-764
- ZHAO T X, KONG X Y, ZHOU R H, et al. Morphological identification and analysis of EMS mutants from hexaploid wheat cultivar yanzhan 4110[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(3):755-764
- [27] 李建建,徐夕雯,张源,等. 南京地区饲用大麦主要农艺性状与营养品质评价[J]. 草业学报,2026,35(3):114-127
- LI J J, XU X W, ZHANG Y, et al. Evaluation of major agronomic traits and nutritional quality of forage barley varieties in the Nanjing region[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(3):114-127
- [28] HUANG X, KUANG Z M, ZHOU R, et al. Mutation of strigolactone biosynthetic gene DWARF 17 impairs the responses of rice tillering to N supply[J]. The Plant Journal, 2025, 122(1):e70124
- [29] 王晓雯,王媛媛,冯蓓祺,等. 水稻矮化多蘖突变体 mtd2/htd1-1 的鉴定与图位克隆[J]. 西南大学学报(自然科学版),2024,46(2):2-12
- WANG X W, WANG Y Y, FENG B Q, et al. Identification and map-based cloning of multi-tillering dwarf mutant mtd2/htd1-1 in Rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2024, 46(2):2-12
- [30] 杨子博,张勇,刘畅,等. 利用EMS诱变创制淮麦33抗赤霉病突变体[J]. 南方农业学报,2023,54(4):1010-1017
- YANG Z B, ZHANG Y, LIU C, et al. Creation of Huaimai 33 *Fusarium head* blight resistant mutants by EMS mutation[J]. Journal of Southern Agriculture, 2023, 54(4):1010-1017

(责任编辑 刘婷婷)