

利用 EMS 诱变改良山栏稻地方品种株高

段 吟^{1,2}, 谢振宇^{1*}, 周玉杰¹, 林秋云¹, 贺治洲¹, 林越辉¹, 胡 伟^{1**}

1. 中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所, 海南海口 571101; 2. 云南农业大学热带作物学院, 云南普洱 665099

摘 要: 水稻 (*Oryza sativa* L.) 作为全球最重要的粮食作物之一, 其产量提升对保障全球粮食安全具有重要意义。山栏稻作为我国南方地区特别是海南省中部山林地区的重要旱稻品种, 因其适应性强、抗旱及抗逆性良好而广受农民喜爱, 但传统山栏稻品种普遍存在株高偏高、易倒伏及产量不稳定等问题, 限制了其在现代农业中的推广应用。本研究选取五指山南对村山栏稻、黄壳山栏糯、山栏糯和山栏红 4 个地方山栏稻品种, 采用甲基磺酸乙酯 (ethyl methanesulfonate, EMS) 进行诱变处理。处理后, 通过 M₁ 代至 M₃ 代的筛选, 选出株高降低且单株产量保持或提升的优良突变体。结果显示, 4 个品种通过 EMS 诱变均获得了多个矮化突变株, 其中如五指山南对村山栏稻的 WZSNDCSLD2 株高降低 9.6%, 单株产量提升 52.8%; 黄壳山栏糯的 HKSLN31 株高降低 11.5%, 单株产量提升 46.0%; 山栏糯的 SLN8 株高降低 15.4%, 单株产量提升 37.0%; 山栏红的 SLH6 和 SLH9 株高分别降低 22.2% 和 15.5%, 单株产量分别提升 49.6% 和 36.8%。这些优良突变体在总粒数、每穗颖花数、每穗实粒数、千粒重及结实率等农艺性状上亦表现出显著优势。研究表明, EMS 诱变技术有效改善了山栏稻的株高及产量相关性状, 为山栏稻的遗传改良和分子育种提供新的品系和理论基础。

关键词: 山栏稻; EMS 诱变; 株高; 产量; 表型分析

中图分类号: S511 文献标志码: A

Improving Plant Height of Local Shanlan Rice Varieties Through EMS Mutagenesis

DUAN Yin^{1,2}, XIE Zhenyu^{1*}, ZHOU Yujie¹, LIN Qiuyun¹, HE Zhizhou¹, LIN Yuehui¹, HU Wei^{1**}

1. Tropical Crops Genetic Resources Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China;
2. College of Tropical Crops, Yunnan Agricultural University, Pu'er, Yunnan 665099, China

Abstract: Rice (*Oryza sativa* L.) is one of the most critical staple crops worldwide, and enhancing its yield is fundamental to ensuring global food security. Shanlan rice, a prominent upland rice variety in the southern regions of China, particularly in the mountainous areas of central Hainan province, is highly valued by farmers for its strong adaptability, drought resistance, and superior stress tolerance. However, traditional Shanlan rice varieties often suffer from challenges such as excessive plant height, vulnerability to lodging, and yield instability, which restrict the broader application in modern agriculture. This study focused on four local Shanlan rice varieties: Wuzhishan Nandui Village Shanlan rice, Huangke Shanlan Nuo, Shanlan Nuo and Shanlan Hong. The varieties were subjected to mutagenic treatment using ethyl methanesulfonate (EMS). After treatment, superior mutants were selected through screening across M₁ to M₃ generations based on significantly reduced plant height and either stable or enhanced single-plant yield. The results revealed the successful induction of multiple dwarf, high-yield mutants in all four varieties via EMS mutagenesis. For instance, in Wuzhishan Nandui Village Shanlan rice (WZSNDCSLD2), plant height was reduced by 9.6%, while single-plant yield increased by 52.8%; in Huangke Shanlan Nuo (HKSLN31), plant height decreased by 11.5%, and single-plant yield rose by 46.0%; in Shanlan Nuo (SLN8), plant height was reduced by 15.4%, with a 37.0% increase in single-plant yield; and

收稿日期 2025-01-06; 接受日期 2025-01-27

基金项目 海南省农作物遗传育种重点实验室开放课题 (No. YCYZ202402); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (No. 1630032021015)。

作者简介 段 吟 (2003—), 女, 本科生, 研究方向: 山栏稻资源收集与评价; *同等贡献作者: 谢振宇 (1972—), 男, 副研究员, 硕士, 研究方向: 水稻遗传育种。 **通信作者 (Corresponding author): 胡 伟 (HU Wei), E-mail: huwei.catas@gmail.com。

in Shanlan Hong (SLH6 and SLH9), plant height was reduced by 22.2% and 15.5%, respectively, while single-plant yield increased by 49.6% and 36.8%. The superior mutants also exhibited significant improvements in agronomic traits, including total grain number, spikelet number per panicle, filled grain number per panicle, thousand-grain weight and seed setting rate. The findings of this study demonstrate that EMS mutagenesis is an effective approach for improving both plant height and yield-related traits in Shanlan rice. This research would provide new genetic lines and a solid theoretical foundation for the genetic improvement and molecular breeding of Shanlan rice.

Keywords: Shanlan rice; EMS mutagenesis; plant height; yield; phenotypic analysis

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.05.011

水稻 (*Oryza sativa* L.) 作为全球最重要的粮食作物之一, 是亚洲人民的主粮。山栏稻是水稻的重要栽培类型, 主要种植于我国南方地区, 特别是海南省中部的山林地区。山栏稻是由黎族和苗族长期筛选和栽培的一种旱稻品种, 因其适应性强、抗旱及其他抗逆性良好而深受农民的青睐^[1]。此外, 山栏稻具有独特的风味, 特别适宜用于酿酒和作为特色礼品^[2]。然而, 目前收集评价的山栏稻品种普遍存在株高偏高^[3-4]、易倒伏及产量不稳定等问题, 限制了其种植范围, 且育种专家育种积极性不高, 从而导致市面上优质山栏稻品种较少。

株高是影响水稻适应性的重要农艺性状, 不仅直接影响产量, 还与抗倒伏能力和种植密度密切相关^[5-7]。在水稻中, 最著名的控制株高的基因是半矮秆基因 *sd1*, 其发现和应用在 20 世纪 60 年代引发了“绿色革命”, 显著提高了水稻产量^[8]。

由于海南岛面积较小, 大部分山栏稻品种存在种源同质化严重的问题, 大部分山栏稻株高普遍偏高^[3-4]。利用 35 个 SSR 标记对 57 个海南山栏稻品种进行检测, 发现其遗传多样性较低。其中标记 RM208 解释了山栏旱稻株高总变异的 42.62%^[9], 表明在第二染色体末端可能存在一个主要控制株高的数量性状位点 (QTL), 同时也说明山栏稻株高变异不丰富。

诱变育种作为一种有效的遗传改良手段, 已在多个作物中得到广泛应用。诱变育种主要包括物理诱变和化学诱变等方法^[10]。其中, 甲基磺酸乙酯 (ethyl methanesulfonate, EMS) 是一种广泛应用于植物遗传突变的化学诱变剂^[11-12], 其主要作用机制是通过甲基化脱氨作用, 使 G/C 碱基对向 A/T 碱基对转换, 从而引发点突变^[13-14]。EMS 诱变在不改变作物整体遗传背景的前提下, 具有诱变效率高、突变频率高和操作简便等优点, 成为作物育种中重要的基因多样性创造手段之一^[15]。

在作物育种中, EMS 诱变技术已被成功应用于多个性状的改良研究, 包括抗病性、耐逆性及产量相关性状^[16]。例如, 利用 0.2% EMS 处理水稻种子 16 h, 筛选出多种株高变异体和多个有价值的水稻品系^[17]。在小麦、玉米和高粱育种中, EMS 诱变同样被广泛应用于株高调控研究^[18-20]。此外, EMS 诱变技术在其他作物的株高改良中也取得了一定成果。例如, 在大豆中, EMS 诱变被用于筛选株高适中的突变体, 以提高其抗倒伏能力和种植密度^[21-22]。类似地, 在棉花中, EMS 诱变同样被应用于株高及相关性状的研究和改良^[23-24]。

山栏稻在栽培过程中常面临株高不适宜的问题, 过高的株高容易导致倒伏, 影响产量和品质。因此, 降低山栏稻的株高成为提高其综合生产性能的关键途径之一。然而, 针对山栏稻株高改良的研究相对较少, 特别是系统利用 EMS 诱变技术进行山栏稻株高调控的研究尚未展开。本研究旨在利用 EMS 诱变技术改良 4 个地方山栏稻的株高, 通过诱变、筛选和鉴定优良突变体, 期望能够培育出株高变矮同时产量不变或增加的山栏稻新品种, 本研究不仅可以为山栏稻株高的遗传改良提供新的品系, 还能深入了解调控株高的遗传机制, 从而为未来的分子育种提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料

本研究涉及的试验材料包括从地方收集的 4 个山栏稻品种, 分别是五指山南对村山栏稻 (WZSNDCSLD)、黄壳山栏糯 (HKSLN)、山栏糯 (SLN) 和山栏红 (SLH)。包含了山栏稻资源中的普通山栏稻、糯稻和红稻, 均是地方高秆品种。

1.2 方法

1.2.1 EMS 诱变 2023 年 8 月将 4 个山栏稻分别挑选 2000 粒左右的种子用自来水彻底清洗, 随后在室温下浸泡 24 h。接下来, 将种子浸泡在 0.5%

(V/V) EMS (索莱宝, 中国) 溶液中, 在室温条件下置于摇床以 140 r/min 摇动处理 18 h。处理结束后, 将种子在自来水中冲洗 24 h, 以去除残留的 EMS 溶液。之后将种子播种于苗床上, 待幼苗生长 25 d 后移植至大田^[25-26]。

1.2.2 突变体筛选 2023 年 12 月将 EMS 处理的第一代 (M_1 代) 自交后单株收种。随后于 2024 年 2 月播种, 3 月种植 M_2 代, 每家系种植 40 株, 观察田间株高表型。挑选株高矮于野生型的单株并进行收种。2024 年 8 月种植 M_3 代, 每家系种植 40 株。

1.2.3 表型数据采集 首先根据株高和抽穗期来确定各家系表型是否稳定, 保证挑选的家系属于纯合突变。随后去除表型分离的家系, 只留纯系用于数据分析。调查各家系的抽穗期、株高等数据, 每家系调查 5 株。待种子成熟后, 挑选长势一致的 3 株收种, 晒干后统计分蘖数、穗长等数据。随后人工脱粒后, 在数字化考种机 (YTS-5D, 谷丰光电) 上面进行考种, 统计单株产量、总粒数、粒型, 并计算结实率等数据。

1.3 数据处理

使用 Microsoft Excel 软件进行表型数据处理, 使用 R 软件制图^[27]。

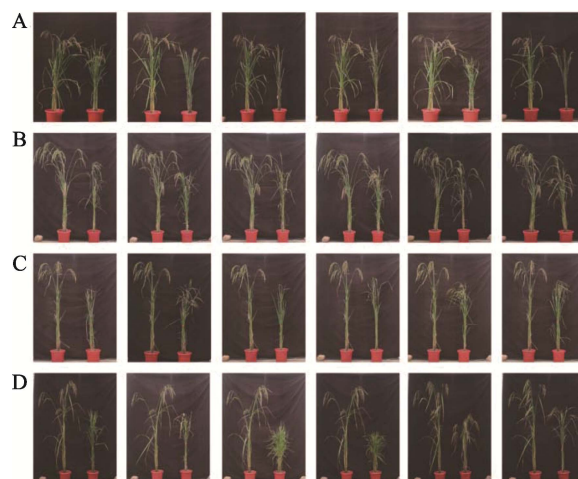
2 结果与分析

2.1 突变体表型筛选结果

2024 年 3 月种植 4 个山栏稻诱变 M_2 家系各 150 个, 每家系种植 40 株。去杂后, 在成熟期根据株高挑选低于亲本的突变单株。最终在五指山南对村山栏稻、黄壳山栏糯、山栏糯和山栏中分别挑选到 33、47、17、23 个突变株。

随后在 2024 年 8 月将突变株种植于大田, 将仍在分离的家系和数量少于 5 株的家系去除, 最终获得五指山南对村山栏稻、黄壳山栏糯、山栏糯和山栏 23、31、15、15 个家系用于数据分析 (附表 1~附表 4)。代表性植株见图 1。

通过分析 4 个群体诱变后家系的表型性状, 发现诱变处理在株高矮化方面成效显著 (表 1)。五指山南对村山栏稻家系的株高明显降低 $[82.1\sim 118.4\text{ cm}]$, 均值为 $(105.8\pm 8.6)\text{cm}$, 部分家系表现出较好的矮化特性, 而单株产量变异较大 $[1.4\sim 28.8\text{ g}]$, 均值为 $(11.8\pm 6.3)\text{g}$, 抽穗期略有延迟 $[80.0\sim 90.0\text{ d}]$, 均值为 $(86.4\pm 3.6)\text{d}$ 。黄壳山栏



A、B、C 和 D 图右侧分别是五指山南对村山栏稻、黄壳山栏糯、山栏糯和山栏红代表植株, 左侧是野生型亲本。
The right side of A, B, C, D represent the mutants of WZSNDCSLD, HKSLN, SLN, and SLH, respectively. The wild-type parent is shown on the left side.

图 1 4 个山栏稻突变体代表性植株株型

Fig. 1 Representative plant phenotypes of four Shanlan rice mutants.

糯家系的株高降低 $[106.4\sim 141.3\text{ cm}]$, 均值为 $(125.0\pm 8.6)\text{cm}$, 单株产量变异较大, 但均值与亲本相当 $[2.5\sim 25.2\text{ g}]$, 均值为 $(10.9\pm 5.7)\text{g}$, 抽穗期稍提前 $[67.0\sim 80.0\text{ d}]$, 均值为 $(70.2\pm 4.2)\text{d}$ 。山栏糯家系在株高 $[89.2\sim 154.9\text{ cm}]$, 均值为 $(118.0\pm 20.8)\text{cm}$ 和单株产量 $[0.9\sim 17.7\text{ g}]$, 均值为 $(7.7\pm 5.9)\text{g}$ 方面均有所降低, 但抽穗期与亲本基本一致 $[75.0\sim 80.0\text{ d}]$, 均值为 $(78.2\pm 1.8)\text{d}$ 。山栏红家系在株高 $[73.6\sim 146.8\text{ cm}]$, 均值为 $(112.7\pm 27.7)\text{cm}$ 和单株产量 $[1.7\sim 23.9\text{ g}]$, 均值为 $(11.6\pm 6.7)\text{g}$ 明显降低, 抽穗期 $[72.0\sim 90.0\text{ d}]$, 均值为 $(78.7\pm 6.5)\text{d}$ 与亲本相近。

2.2 五指山南对村山栏稻诱变效果

对诱变处理获得的诱变家系 (WZSNDCSLD1~WZSNDCSLD23) 与野生型在多个关键农艺性状上进行系统对比分析 (附表 1, 图 2)。野生型的株高为 126.5 cm, 单株产量为 14.2 g。分析结果显示, 诱变家系中多数样品的株高低于野生型, 最低达到 82.1 cm (WZSNDCSLD22), 同时, 单株产量表现出多样性, 其中如 WZSNDCSLD2 (114.3 cm, 21.7 g)、WZSNDCSLD6 (107.5 cm, 28.8 g)、WZSNDCSLD13 (104.5 cm, 21.1 g) 及 WZSNDCSLD17 (116.1 cm, 14.5 g) 等家系在实现株高降低的同时, 单株产量高于或接近野生型, 显示出优良的矮化高产潜力。然而, 部分家系如 WZSNDCSLD1 (93.3 cm, 7.1 g)、WZSNDCSLD5

表 1 4 个山栏稻表型变异情况
Tab. 1 Phenotypic variations of four Shanlan rice varieties

测定项目 Tested item	五指山南对村山栏稻 WZSNDCSLD			黄壳山栏糯 HKSLN		
	亲本 Parent	诱变家系 Mutant line		亲本 Parent	诱变家系 Mutant line	
		范围 Range	均值±方差 Mean±SD		范围 Range	均值±方差 Mean±SD
株高/cm	126.5	82.1~118.4	105.8±8.6	154.7	106.4~141.3	125.0±8.6
单株产量/g	14.2	1.4~28.8	11.8±6.3	12.6	2.5~25.2	10.9±5.7
抽穗期/d	84.0	80.0~90.0	86.4±3.6	74.0	67.0~80.0	70.2±4.2
总粒数	1688.7	607.0~2647.7	1403.5±495.7	640.0	393.3~1309.7	843.0±225.7
每穗颖花数	163.4	59.7~220.6	133.6±32.3	96.0	34.7~153.3	87.4±27.3
每穗实粒数	62.5	7.9~78.5	45.2±17.4	67.6	11.9~124.7	49.6±26.5
分蘖数	10.3	4.7~16.3	10.6±2.8	6.7	7.0~21.3	10.0±2.8
穗长/cm	22.9	17.3~26.2	21.9±2.7	28.8	20.0~30.1	24.0±2.4
千粒重/g	21.8	21.7~37.9	24.8±3.2	27.6	17.0~29.1	22.6±3.3
结实率/%	39.3	8.0~58.1	33.3±11.4	69.5	26.3~81.3	52.4±15.7
粒长/mm	7.8	5.2~8.1	7.1±0.7	8.1	7.2~8.8	8.0±0.4
粒宽/mm	2.7	2.2~3.0	2.5±0.2	2.6	2.2~3.0	2.5±0.2

测定项目 Tested item	山栏糯 SLN			山栏红 SLH		
	亲本 Parent	诱变家系 Mutant line		亲本 Parent	诱变家系 Mutant line	
		范围 Range	均值±方差 Mean±SD		范围 Range	均值±方差 Mean±SD
株高/cm	160.2	89.2~154.9	118.0±20.8	152.1	73.6~146.8	112.7±27.7
单株产量/g	10.8	0.9~17.7	7.7±5.9	13.3	1.7~23.9	11.6±6.7
抽穗期/d	75.0	75.0~80.0	78.2±1.8	78.0	72.0~90.0	78.7±6.5
总粒数	785.7	342.0~1254.3	676.8±272.0	749.3	347.7~1343.0	877.5±251.7
每穗颖花数	130.9	51.9~125.4	81.9±21.8	124.9	14.9~162.2	94.9±46.2
每穗实粒数	71.8	7.6~72.0	37.8±22.8	80.5	6.5~111.4	53.9±39.6
分蘖数	6.0	5.7~10.0	8.0±1.5	6.0	5.3~65.3	15.2±17.4
穗长/cm	28.5	20.2~30.7	23.9±3.1	27.4	14.2~30.8	25.1±5.1
千粒重/g	25.3	12.7~27.0	21.5±4.5	27.1	16.0~33.6	24.0±4.7
结实率/%	55.4	14.5~73.2	42.5±18.6	63.7	20.0~76.8	50.3±19.9
粒长/mm	8.4	5.2~8.7	7.4±1.2	8.2	6.2~8.5	7.8±0.6
粒宽/mm	2.7	2.2~2.7	2.5±0.2	2.7	2.3~2.8	2.6±0.2

(102.9 cm, 7.0 g)、WZSNDCSLD21 (93.3 cm, 5.4 g) 及 WZSNDCSLD23 (98.0 cm, 1.4 g) 虽实现了株高降低, 但单株产量低于野生型。此外, 诱变家系在总粒数、每穗颖花数、每穗实粒数、分蘖数、千粒重及结实率等性状上也表现出明显的变化。例如, WZSNDCSLD2 总粒数达到 2096.3 个, 每穗颖花数为 170.0 个, 每穗实粒数为 74.4 个, 千粒重为 42.79 g, 结实率为 50.9%, 均优于野生型的 1688.7 个、163.4 个、62.5 个、21.8 g 及 39.3%。WZSNDCSLD6 的总粒数为 2128.3 个, 每穗颖花数为 138.8 个, 每穗实粒数为 71.7 个, 千粒重为 51.57 g 及结实率为 63.1%, 证明了其在增产和品质上的优越性。在粒长和粒宽方面, 多数诱

变家系如 WZSNDCSLD6 (7.7 mm, 2.6 mm) 均接近野生型, 但部分家系如 WZSNDCSLD11 (6.9 mm, 2.6 mm) 和 WZSNDCSLD4 (5.2 mm, 3.0 mm) 粒形变化较大, 可能相关基因突变影响株高的同时影响粒型。

2.3 黄壳山栏糯诱变效果

31 个黄壳山栏糯突变体 (HKSLN1~HKSLN31) 与野生型 (株高 154.7 cm, 单株产量 12.6 g) 相比, 绝大多数诱变家系的株高均低于野生型 (附表 2, 图 3), 最低达到 106.4 cm (HKSLN5), 单株产量也呈现出多样性变化。另一方面, HKSLN4 (株高 116.2 cm, 单株产量 25.2 g)、HKSLN5 (株高 106.4 cm, 单株产量

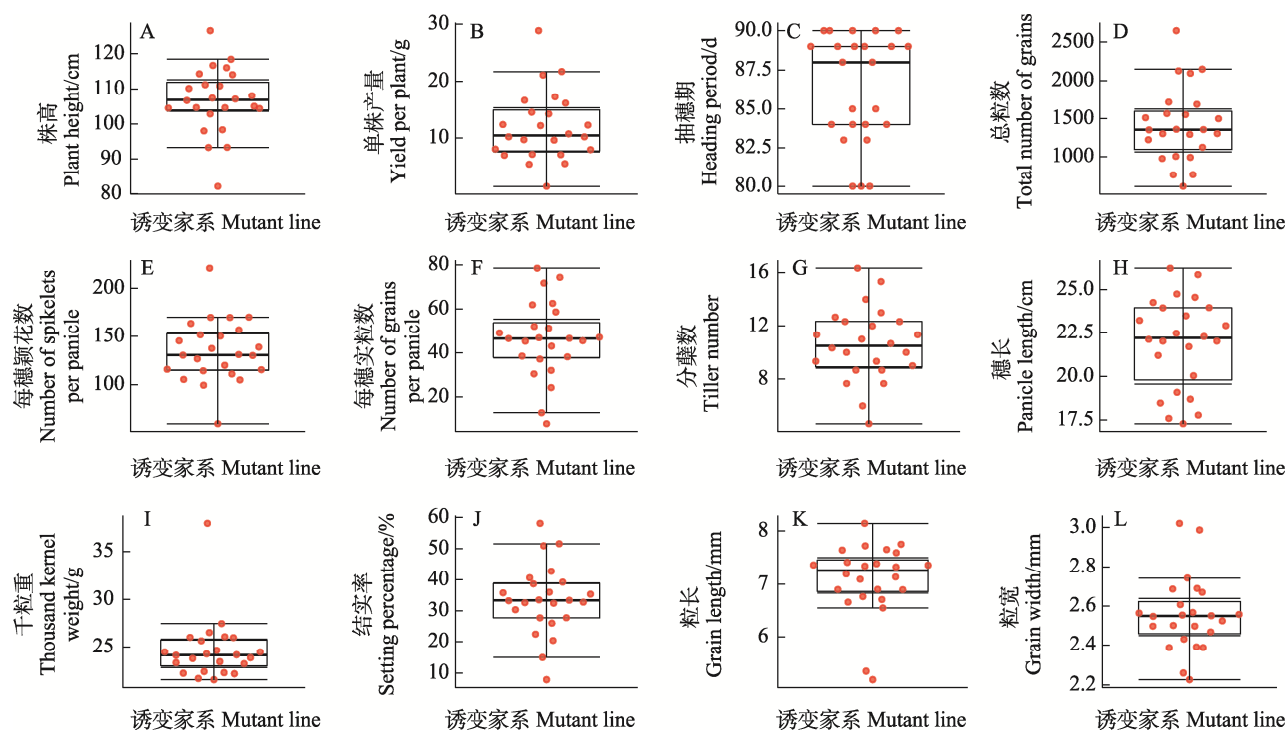


图 2 五指山南对村山栏稻诱变家系各农艺性状

Fig. 2 Agronomic traits of mutant lines derived from WZSNDCSLD rice

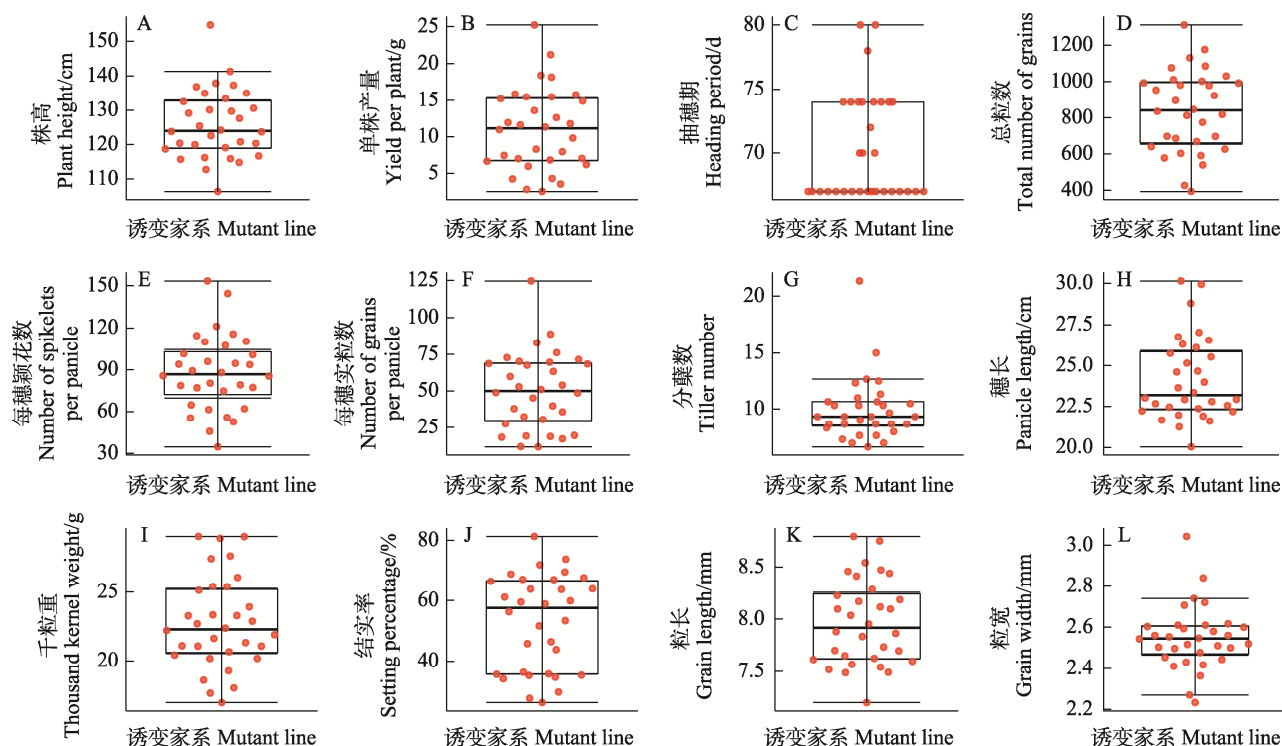


图 3 黄壳山栏糯诱变家系各农艺性状

Fig. 3 Agronomic traits of mutant lines derived from HKSLN rice

11.0 g) 等家系在株高降低的同时, 保持或提升了单株产量。部分家系如 HKSLN1 (株高 118.7 cm, 单株产量 8.0 g)、HKSLN76 (株高 120.0 cm, 单

株产量 8.3 g) 及 HKSLN11 (株高 130.1 cm, 单株产量 7.1 g) 虽株高有所降低, 但单株产量未达到野生型水平, 需通过进一步育种改良予以优化。

除此之外, 诱变家系在总粒数、每穗颖花数、每穗实粒数、分蘖数、千粒重及结实率等性状上也表现出明显的变化, 例如, HKSLN2 总粒数达到 774.5 个, 每穗实粒数为 17.2 个, HKSLN5 的总粒数为 1085.3 个, 每穗实粒数为 48.6 个, 均高于野生型, 具有高产潜力。然而, 部分家系如 HKSLN6 (总粒数为 1309.7 个, 每穗颖花数为 61.4 个)、HKSLN10 (总粒数为 896.0 个, 每穗实粒数为 70.2 个) 虽总粒数较高, 但单株产量和其他性状表现不一, 需综合评估。在千粒重方面, 多数诱变家系如 HKSLN25 (29.1 g) 及 HKSLN31 (28.9 g) 高于野生型 (27.6 g), 提升了单粒质量, 单株产量也有所增加。而结实率如 HKSLN4 (81.3%)、HKSLN15 (71.9%) 及 HKSLN16 (73.7%) 也优于野生型 (69.5%), 有助于提高有效粒数。其中, HKSLN2 (株高 125.4 cm, 单株产量 4.3 g) 和 HKSLN9 (株高 127.6 cm, 单株产量 2.5 g) 虽实现了株高降低, 但单株产量低于野生型, 需在后续选育中予以排除。综合来看, 黄壳山栏糯的诱变家系在株高和单株产量等关键农艺性状上多数优于野生型, 尤其是家系如 HKSLN7、HKSLN25、HKSLN31 等在实现株高降低的同时, 保持或提升了单株产量, 展现出较

高的选育价值。

2.4 山栏糯诱变效果

通过诱变处理获得的诱变家系 (SLN1~SLN15) 与野生型 (株高 160.2 cm, 单株产量 10.8 g) 进行农艺性状的对比 (附表 3, 图 4)。结果显示, 绝大多数诱变家系的株高均低于野生型, 其中 SLN3 (株高 153.3 cm, 单株产量 17.7 g)、SLN8 (株高 135.6 cm, 单株产量 14.8 g)、SLN9 (株高 154.9 cm, 单株产量 16.3 g) 及 SLN13 (株高 150.0 cm, 单株产量 15.0 g) 等家系在实现株高降低的同时, 单株产量高于野生型, 展现出优良的矮化高产潜力。这些家系不仅在株高和单株产量上表现突出, 还在总粒数、每穗颖花数、每穗实粒数、千粒重及结实率等性状上表现优异, 例如, SLN3 的总粒数为 888.0 个, 每穗实粒数为 72.0 个, SLN8 的总粒数为 808.5 个, 每穗实粒数为 70.3 个, SLN9 的总粒数为 1254.3 个, 每穗实粒数为 63.9 个, 以及 SLN13 的总粒数为 860.3 个, 每穗实粒数为 71.0 个, 均高于野生型。有些家系的千粒重和结实率也普遍优于野生型, 例如, SLN3 的千粒重为 27.0 g, 结实率为 73.2%, SLN8 的千粒重为 26.3 g, 结实率为 70.1%, SLN9 的千粒重为 25.7 g, 结实率为 51.2%, 以及 SLN13 的

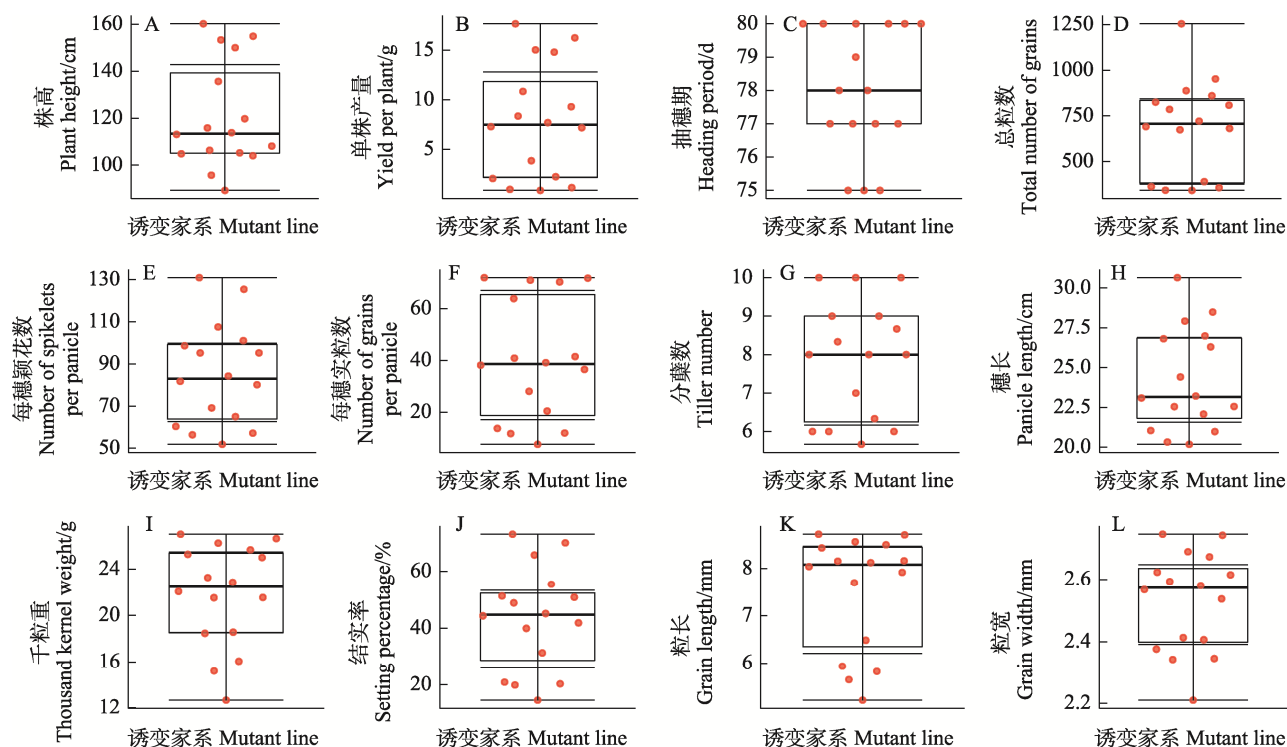


图 4 山栏糯稻诱变家系各农艺性状

Fig. 4 Agronomic traits of mutant lines derived from SLN rice

千粒重为 26.6 g, 结实率为 65.8%, 均高于野生型。然而, 部分家系如 SLN1 (株高 115.8 cm, 单株产量 2.2 g)、SLN2 (株高 119.7 cm, 单株产量 7.2 g)、SLN4 (株高 106.3 cm, 单株产量 1.0 g) 及 SLN6 (株高 108.1 cm, 单株产量 2.1 g) 虽实现了株高降低, 但单株产量低于野生型, 需在后续选育中予以排除。综合来看, 山栏红的诱变家系中, SLN3、SLN8、SLN9 及 SLN13 等家系在株高降低且单株产量保持或提升的同时, 在总粒数、每穗颖花数、每穗实粒数、千粒重及结实率等多个关键性状上均表现优异, 展现出较高的选育价值, 符合矮化高产的育种目标。

2.5 山栏红诱变效果

通过诱变处理获得的山栏红诱变家系 (SLH1~SLH15) 与野生型 (株高 152.1 cm, 单株产量 13.3 g) 在多个关键农艺性状上进行了对比分析 (附表 4, 图 5)。结果显示, 绝大多数诱变家系的株高均低于野生型, 其中 SLH2 (株高 143.0 cm, 单株产量 23.9 g)、SLH4 (株高 144.9 cm, 单株产量 15.1 g)、SLH6 (株高 118.3 cm, 单株产量 19.9 g)、SLH7 (株高 146.8 cm, 单株产量

17.3 g)、SLH8 (株高 145.4 cm, 单株产量 15.0 g) 及 SLH9 株高 128.6 cm, 单株产量 18.2 g) 等家系在实现株高降低的同时, 单株产量高于野生型, 展示出优良的矮化高产潜力。这些家系不仅在株高和单株产量上表现优异, 在总粒数、每穗颖花数、每穗实粒数、千粒重及结实率等性状上也显示出优势。例如, SLH2 的总粒数为 1343.0 个, 每穗颖花数为 108.9 个, 结实率为 74.3%, 均高于野生型。此外, SLH6 (总粒数 967.3 个, 每穗颖花数 126.2 个, 每穗实粒数 97.5 个, 千粒重 26.8 g, 结实率 76.8%) 和 SLH9 (总粒数 1161.7 个, 每穗颖花数 139.4 个, 每穗实粒数 85.6 个, 千粒重 25.6 g, 结实率 61.9%) 等家系也在多个性状上优于野生型, 进一步支持其高产潜力。然而, 部分家系如 SLH1 (株高 75.4 cm, 单株产量 10.2 g)、SLH3 (株高 88.8 cm, 单株产量 6.1 g)、SLH5 (株高 101.0 cm, 单株产量 6.5 g)、SLH10 (株高 144.3 cm, 单株产量 12.5 g)、SLH11 (株高 111.2 cm, 单株产量 3.1 g)、SLH12 (株高 87.3 cm, 单株产量 3.6 g)、SLH13 (株高 84.8 cm, 单株产量 1.7 g)、SLH14 (株高 96.8 cm, 单株产量 7.6 g)

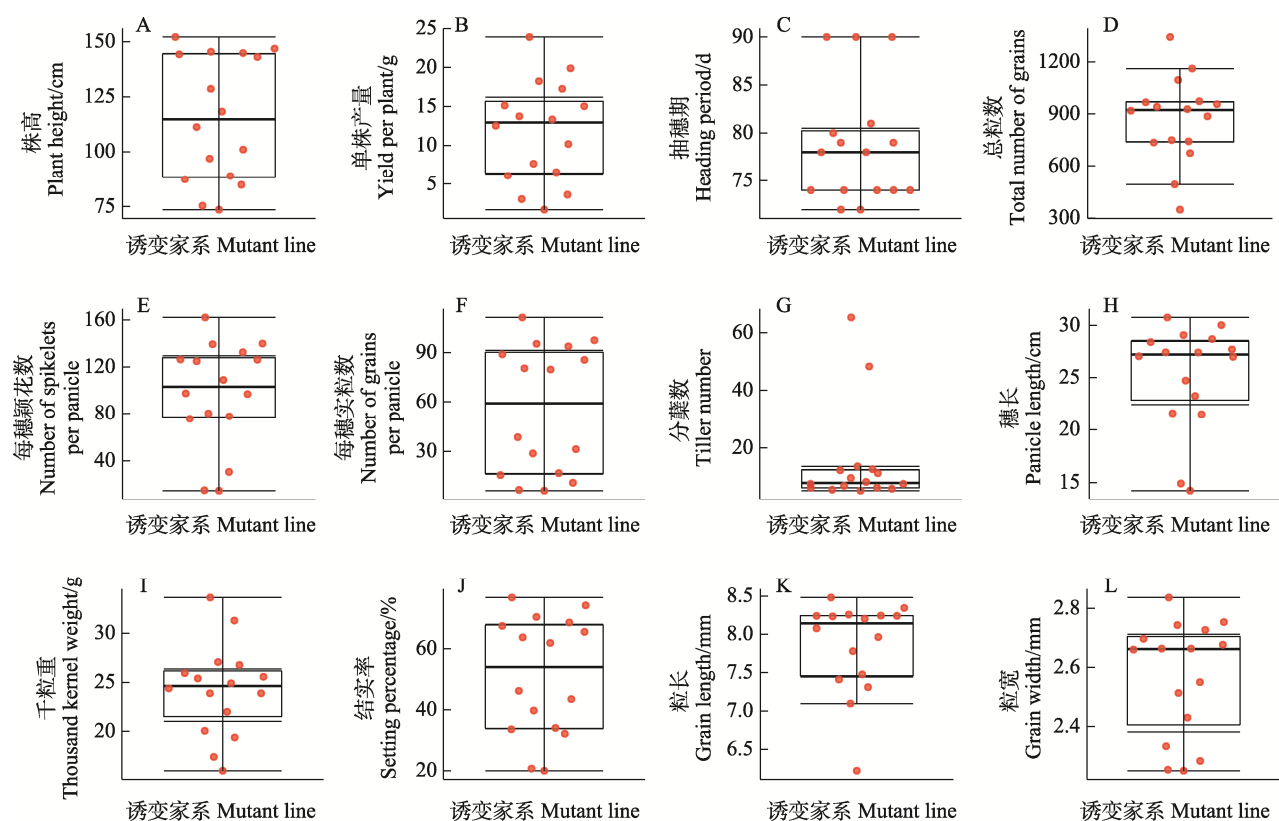


图 5 山栏红诱变家系各农艺性状

Fig. 5 Agronomic traits of mutant lines derived from SLH rice

及 SLH15（株高 73.6 cm，单株产量 13.7 g）虽在某些性状上表现出一定优势，但多数在单株产量或其他关键性状（如每穗颖花数和结实率）上未能达到野生型水平，需在后续选育过程中予以排除或进一步改良。

2.6 优良单株筛选

本研究通过对山栏稻突变体的株高和单株产量进行分析，根据筛选标准（株高降低超过野生型 5%，单株产量保持不变或提高），筛选出多个优良家系（表 2）。

在五指山南对村山栏稻（野生型株高 126.5 cm，单株产量 14.2 g）中，共筛选出 5 个优良家系：WZSNDCSLD2、WZSNDCSLD3、WZSNDCSLD4、WZSNDCSLD7 和 WZSNDCSLD13。所有筛选出的家系株高降低幅度在 9.6%~17.4% 之间，单株产量提升幅度在 14.1%~52.8% 之间。

其中，WZSNDCSLD13 表现最为突出，株高降低 17.4%，单株产量提高 48.6%；WZSNDCSLD2 的株高降低 9.6%，但单株产量提升幅度最大，达到 52.8%。

黄壳山栏糯（野生型株高 154.7 cm，单株产量 12.6 g）筛选出 8 个优良家系：HKSLN7、HKSLN8、HKSLN12、HKSLN13、HKSLN14、HKSLN16、HKSLN25、HKSLN30 和 HKSLN31。这些家系的株高降低幅度在 10.9%~27.1% 之间，单株产量提高幅度在 7.9%~46.0% 之间。其中，HKSLN31 株高降低 11.5%，单株产量提高 46.0%，是表现最佳的突变体。此外，HKSLN25 和 HKSLN14 也表现出良好的矮化高产特性，单株产量分别提高 44.4% 和 25.4%。整体来看，黄壳山栏糯的突变家系在株高降低和产量提升方面呈现出稳定的改良效果。

表 2 挑选的优良家系
Tab. 2 Selected superior lines

品种 Variety	编号 No.	株高 Plant height/cm	单株产量 Yield per plant/g	株高变化率 Change rate of plant height/%	单株产量变化率 Yield change rate per plant/%
WZSNDCSLD	野生型	126.5	14.2		
	WZSNDCSLD2	114.3	21.7	-9.6	52.8
	WZSNDCSLD3	110.9	16.2	-12.3	14.1
	WZSNDCSLD4	108.1	16.7	-14.5	17.6
	WZSNDCSLD7	104.7	17.3	-17.2	21.8
	WZSNDCSLD13	104.5	21.1	-17.4	48.6
HKSLN	野生型	154.7	12.6		
	HKSLN7	112.8	15.9	-27.1	26.2
	HKSLN8	114.8	13.6	-25.8	7.9
	HKSLN12	129.2	15.2	-16.5	20.6
	HKSLN13	135.0	14.9	-12.7	18.3
	HKSLN14	129.7	15.8	-16.2	25.4
	HKSLN16	137.3	15.5	-11.2	23.0
	HKSLN25	137.9	18.2	-10.9	44.4
	HKSLN30	123.7	15.5	-20.0	23.0
	HKSLN31	136.9	18.4	-11.5	46.0
SLN	野生型	160.2	10.8		
	SLN8	135.6	14.8	-15.4	37.0
	SLN13	150.0	15.0	-6.4	38.9
SLH	野生型	152.1	13.3		
	SLH4	144.9	15.1	-4.7	13.5
	SLH6	118.3	19.9	-22.2	49.6
	SLH9	128.6	18.2	-15.5	36.8

在山栏糯（野生型株高 160.2 cm，单株产量 10.8 g）中，共筛选出 2 个优良家系：SLN8 和 SLN13。SLN8 的株高降低 15.4%，单株产量提高 37.0%，表现最为显著；SLN13 的株高降低幅度较小（6.4%），但单株产量提升幅度达到 38.9%。尽管筛选出的家系数数量较少，但其产量提升幅度较大，展示了良好的育种潜力。

山栏红（野生型株高 152.1 cm，单株产量 13.3 g）筛选出 3 个优良家系：SLH4、SLH6 和 SLH9。这些家系的株高降低幅度在 4.7%~22.2% 之间，单株产量提升幅度在 13.5%~49.6% 之间。其中，SLH6 表现最佳，株高降低 22.2%，单株产量提高 49.6%，是矮化和高产改良的理想突变体；SLH9 的株高降低 15.5%，单株产量提升 36.8%，表现稳定。整体来看，山栏红的筛选家系在株高矮化的同时，提高了产量，尤其是 SLH6 突变体，为高产矮化育种提供了重要材料。

在 4 个山栏稻品种中，五指山南对村山栏稻和黄壳山栏糯的突变家系数数量较多，表现出全面的矮化和产量提升潜力；山栏糯和山栏红筛选家系数数量较少，但每个家系的产量提升幅度更为突出，具有重要的育种价值。

3 讨论

3.1 EMS 诱变对山栏稻株高和产量的影响

研究结果显示，EMS 诱变降低了 4 个山栏稻品种的株高，且在多数突变体中，单株产量得到了不同程度的提升或保持。具体而言，五指山南对村山栏糯和黄壳山栏糯的突变家系数数量较多，且这些家系在株高矮化的同时，表现出较高的产量潜力，如 WZSNDCSLD2 和 HKSLN31 等。这表明 EMS 诱变在这 2 个品种中效果尤为显著，能够有效地改善株高并提升产量。

相比之下，山栏糯和山栏红的优良突变家系数数量相对较少，但每个家系的产量提升幅度更为显著，如 SLN8 和 SLH6。这可能与这 2 个品种原本的遗传背景有关，EMS 诱变在这些品种中可能触发了更为有效的基因突变，从而实现了更显著的性状改良。

3.2 基因机制的探讨

EMS 作为一种高效的化学诱变剂，主要通过引发 G/C 到 A/T 的碱基替换，导致点突变^[13-14]。这种突变方式能够在不改变作物整体遗传背景的

前提下，产生多样性的基因变异。考虑到本研究中多个突变家系在株高和产量上同时表现出显著变化，推测这些突变可能涉及到多个控制株高和产量的关键基因。例如，已知的半矮秆基因 *sd1* 在控制株高方面发挥重要作用，EMS 诱变可能在该基因或其调控网络中引发了有利的突变，从而实现了株高的有效降低和产量的提升。另外，根据已有报道，在山栏稻资源中使用标记 RM208 进行基因型鉴定，该标记的变异能够解释山栏早稻株高总变异的 42.62%^[9]，本研究中株高的基因突变也有可能是这个主效 QTL，但目前还没有第二染色体上相关基因被克隆。利用这些突变体通过 MutMap 技术^[13]或者图位克隆，有望克隆出山栏稻中的主效株高基因。

3.3 研究的意义、不足与应用前景

本研究成功筛选出多个优良的山栏稻突变体，为山栏稻的矮化和高产育种提供了新的遗传资源。这些突变体不仅有助于扩大山栏稻的种植范围，减少倒伏风险，提高种植密度，还能在保持或提升产量的同时，提升山栏稻的综合生产性能。此外，优良突变体的获得为后续分子育种和基因功能研究奠定了基础，有助于深入解析株高和产量的遗传机制，推动山栏稻分子育种的进程。

尽管本研究取得了显著成果，但仍存在一些局限性。首先，突变体的稳定性和遗传一致性尚需进一步验证，尤其是在不同环境条件下的适应性和表现。其次，突变体的基因型分析尚未深入，未来需要结合分子标记和基因组学手段，明确突变位点及其功能，为精确育种提供依据。此外，部分突变家系虽然实现了株高降低，但单株产量未达到预期，需通过进一步的回交和选择优化其性状表现。

未来的研究应着重于以下几个方面：一是对优良突变体进行多代稳定性测试，确保其在不同环境中的表现一致性；二是开展图位克隆或者 MutMap 技术，揭示控制株高和产量的关键基因及其作用机制。

总体而言，本研究证明了 EMS 诱变技术在山栏稻株高和产量改良中的有效性，成功筛选出多株株高降低且产量提升的优良突变体。这些成果为山栏稻的遗传改良和分子育种提供了重要的遗传资源和理论基础，具有显著的应用价值和推广前景。未来可通过进一步的基因分析和育种优化，

有望培育出更加优质的山栏稻新品种, 满足农业生产和市场需求的多重目标。

参考文献

- [1] 袁楠楠, 魏鑫, 薛达元, 杨庆文. 海南黎族聚居区山栏稻的起源演化研究[J]. 植物遗传资源学报, 2013, 14(2): 202-207.
YUAN N N, WEI X, XUE D Y, YANG Q W. The origin and evolution of upland rice in Li ethnic communities in Hainan province[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2013, 14(2): 202-207. (in Chinese)
- [2] 孟卫东, 王效宁. 海南稻种资源的研究与保护[J]. 热带农业科学, 2004, 24(4): 49-52.
MENG W D, WANG X N. Study and protection of rice germplasm in Hainan[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2004, 24(4): 49-52. (in Chinese)
- [3] 杨国峰, 严小微, 钟兆飞, 黄春燕, 王波, 唐清杰. 海南山栏稻资源农艺性状特征及聚类分析[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(1): 66-69.
YANG G F, YAN X W, ZHONG Z F, HUANG C Y, WANG B, TANG Q J. Agronomic characteristics and cluster analysis of Hainan Shanlan rice resources[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(1): 66-69. (in Chinese)
- [4] 杨国峰, 杨勇, 钟兆飞, 黄春燕, 王波, 唐清杰. 22 种山栏稻农艺性状和品质性状分析[J]. 海南师范大学学报(自然科学版), 2019, 31(4): 434-440.
YANG G F, YANG Y, ZHONG Z F, HUANG C Y, WANG B, TANG Q J. Analysis of agronomic and quality traits of 22 Shanlan rice varieties[J]. Journal of Hainan Normal University (Natural Science), 2019, 31(4): 434-440. (in Chinese)
- [5] 李荣田, 姜廷波, 秋太权, 崔成焕, 龚振平. 水稻倒伏对产量影响及倒伏和株高关系的研究[J]. 黑龙江农业科学, 1996(1): 13-17.
LI R T, JIANG T B, QIU T Q, CUI C H, GONG Z P. Study on effect of lodging to yield and the relationship between lodging and plant height in rice[J]. Heilongjiang Agricultural Science, 1996(1): 13-17. (in Chinese)
- [6] 樊叶杨, 庄杰云, 李强, 郑康乐. 水稻株高 QTL 分析及其与产量 QTL 的关系[J]. 作物学报, 2001, 27(6): 915-922.
FAN Y Y, ZHUANG J Y, LI Q, ZHENG K L. QTL analysis of rice plant height and its relationship with QTL of rice yield[J]. Acta Agronomica Sinica, 2001, 27(6): 915-922. (in Chinese)
- [7] 杨利华, 张丽华, 杨世丽, 马瑞昆. 不同株高玉米果穗性状对种植密度的反应[J]. 河北农业大学学报, 2008, 31(1): 12-15.
YANG L H, ZHANG L H, YANG S L, MA R K. Responses of ear characters of corn with uneven plant height to planting density[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2008, 31(1): 12-15. (in Chinese)
- [8] 吴比, 胡伟, 邢永忠. 中国水稻遗传育种历程与展望[J]. 遗传, 2018, 40(10): 841-857.
WU B, HU W, XING Y Z. The history and prospect of rice genetic breeding in China[J]. Hereditas, 2018, 40(10): 841-857. (in Chinese)
- [9] YANG G, YANG Y, GUAN Y, XU Z, WANG J, YUN Y, YAN X, TANG Q. Genetic diversity of Shanlan upland rice (*Oryza sativa* L.) and association analysis of SSR markers linked to agronomic traits[J]. BioMed Research International, 2021(1): 7588652.
- [10] 马惠平, 赵永亮, 杨光宇. 诱变技术在作物育种中的应用[J]. 遗传, 1998, 20(4): 48-50.
MA H P, ZHAO Y L, YANG G Y. Application of induced mutation technology for crop breeding[J]. Hereditas, 1998, 20(4): 48-50. (in Chinese)
- [11] WATTOO J, ASLAM K, SHAH S, SHABIR G, SABAR M, NAVEED S, WAHEED R, MUQADDASI Q, ARIF M. Ethyle methane sulphonate (EMS) induced mutagenic attempts to create genetic variability in Basmati rice[J]. Journal of Plant Breeding and Crop Science, 2012, 4(7): 101-105.
- [12] TSUDA M, KAGA A, ANAI T, SHIMIZU T, SAYAMA T, TAKAGI K, MACHITA K, WATANABE S, NISHIMURA M, YAMADA N. Construction of a high-density mutant library in soybean and development of a mutant retrieval method using amplicon sequencing[J]. BMC Genomics, 2015, 16(1): 1014.
- [13] ABE A, KOSUGI S, YOSHIDA K, NATSUME S, TAKAGI H, KANZAKI H, MATSUMURA H, YOSHIDA K, MITSUOKA C, TAMIRU M. Genome sequencing reveals agronomically important loci in rice using MutMap[J]. Nature Biotechnology, 2012, 30(2): 174-178.
- [14] HENRY I M, NAGALAKSHMI U, LIEBERMAN M C, NGO K J, KRASILEVA K V, VASQUEZ-GROSS H, AKHUNOVA A, AKHUNOV E, DUBCOVSKY J, TAI T H, COMAI L. Efficient genome-wide detection and cataloging of EMS-induced mutations using exome capture and next-generation sequencing[J]. The Plant Cell, 2014, 26(4): 1382-1397.
- [15] 董颖苹, 连勇, 何庆才, 徐涵. 植物化学诱变技术在育种中的运用及其进展[J]. 种子, 2005, 24(7): 54.
DONG Y P, LIAN Y, HE Q C, XU H. Application and progress of plant chemical mutagenesis technology in breeding[J]. Seed, 2005, 24(7): 54. (in Chinese)
- [16] 臧辉, 任卫波. EMS 诱变在植物育种中的研究与应用[J].

- 分子植物育种, 2018, 16(17): 5782-5788.
- ZANG H, REN W B. Research and application of EMS mutation in plant breeding[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2018, 16(17): 5782-5788. (in Chinese)
- [17] 廖明智, 宁丽萍, 杨祥波. EMS 诱导水稻种质资源创制[J]. *北方水稻*, 2022, 52(5): 31-33.
- LIAO M Z, NING L P, YANG X B. EMS induced rice germplasm tesource creation[J]. *Northern Rice*, 2022, 52(5): 31-33. (in Chinese)
- [18] ZHAO Y, HUANG Y, GAO Y, WANG Y, WU H, ZHU H, LU X, MA Q. An EMS-induced allele of the *brachytic2* gene can reduce plant height in maize[J]. *Plant Cell Reports*, 2023, 42(4): 749-761.
- [19] WANG W, GUAN X, GAN Y, LIU G, ZOU C, WANG W, ZHANG J, ZHANG H, HAO Q, NI F. Creating large EMS populations for functional genomics and breeding in wheat[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2024, 23(2): 484-493.
- [20] SUTHAKAR V, MULLAINATHAN L, ELANGO VAN M. Mutagenic effect of gamma rays and EMS on yield attributes of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) in M1 generation[J]. *International Journal of Advanced Research*, 2014, 2: 453-455.
- [21] GOPINATH P, PAVADAI P. Morphology and yield parameters and biochemical analysis of soybean (*Glycine max* (L.) Mrr.) using gamma rays, EMS and DES treatment[J]. *International Letters of Natural Sciences*, 2015, 35: 50-58.
- [22] ESPINA M J, AHMED C S, BERNARDINI A, ADELEKE E, YADEGARI Z, ARELLI P, PANTALONE V, TAHERI A. Development and phenotypic screening of an ethyl methane sulfonate mutant population in soybean[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 394.
- [23] WITT T W, ULLOA M, PELLETIER M G, MENDU V, RITCHIE G L. Exploring ethyl methanesulfonate (EMS) treated cotton (*Gossypium hirsutum* L.) to improve drought tolerance[J]. *Euphytica*, 2018, 214: 1-12.
- [24] ABID M A, WANG P, ZHU T, LIANG C, MENG Z, MALIK W, GUO S, ZHANG R. Construction of *Gossypium barbadense* mutant library provides genetic resources for cotton germplasm improvement[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(18): 6505.
- [25] 胡伟, 程计华, 林秋云, 周玉杰, 龙开意, 贺治洲, 谢振宇. 水稻类树状突变体 *lhd10* 的初步定位[J]. *分子植物育种*, 2024: 1-17.
- HU W, CHENG J H, LIN Q Y, ZHOU Y J, LONG K Y, HE Z Z, XIE Z Y. Primary mapping of the leafy head mutant *lhd10* in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2024: 1-17. (in Chinese)
- [26] HU W, ZHOU T, HU G, WU H, HAN Z, XIAO J, LI X, XING Y. An ethyl methanesulfonate-induced neutral mutant-bridging method efficiently identifies spontaneously mutated genes in rice[J]. *The Plant Journal*, 2020, 104(4): 1129-1141.
- [27] IHAKA R, GENTLEMAN R. R: a language for data analysis and graphics[J]. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 1996, 5(3): 299-314.