

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.09.002

引用格式:莫希涪,李翠,郑美,等.狼尾草属牧草育种技术研究进展[J].草地学报,2026,34(9):3152-3163

MO Xi-fu, LI Cui, ZHENG Mei, et al. Research Progress in Breeding Techniques of *Pennisetum* Forages[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(9):3152-3163

狼尾草属牧草育种技术研究进展

莫希涪^{1,2#}, 李翠^{2#}, 郑美², 侯新村², 赵春桥², 董富磊², 周胜^{1*}, 郭强^{2*}

(1. 仲恺农业工程学院园艺园林学院, 广东广州 510225; 2. 北京市农林科学院草业花卉与景观生态研究所, 北京 100097)

摘要:狼尾草属(*Pennisetum*)牧草是热带、亚热带重要优质牧草,生物量高、抗逆性强、饲用价值优良,是缓解我国饲草供给不足的关键资源。目前我国审定狼尾草属牧草品种共17个,多适配南方生态区,北方抗逆高产品种匮乏,优质新品种选育需求迫切。本文综述了引种驯化、杂交育种、诱变育种等常规育种技术,以及分子标记辅助育种、基因工程育种等分子育种的研究进展,分析了自主不育系短缺、远缘杂交效率低、分子育种体系不完善等问题,并对种质资源挖掘、育种目标优化与新技术应用进行展望,为狼尾草属牧草遗传改良与产业化提供参考。

关键词:狼尾草属;牧草育种;杂交育种;工程育种

中图分类号:S543.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)09-3152-12

Research Progress in Breeding Techniques of *Pennisetum* Forages

MO Xi-fu^{1,2#}, LI Cui^{2#}, ZHENG Mei², HOU Xin-cun², ZHAO Chun-qiao², DONG Fu-lei²,
ZHOU Sheng^{1*}, GUO Qiang^{2*}

(1. College of Horticulture and Landscape Architecture, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou, Guangdong Province 510230, China; 2. Institute of Grassland, Flowers and Ecology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: Grasses in *Pennisetum* genus are important high-quality forages in tropical and subtropical regions, characterized by high biomass, strong stress tolerance, and excellent feeding value. They serve as a key resource to alleviate the shortage of forage supply in China. To date, 17 *Pennisetum* cultivars have been registered in China, most of which are adapted to the southern ecological zones, while there is a lack of stress-tolerant and high-yielding cultivars in northern China, highlighting an urgent need for breeding elite new varieties. This paper reviewed the research progress in conventional breeding techniques, including introduction and domestication, cross breeding, and mutation breeding, as well as molecular breeding approaches such as molecular marker-assisted breeding and genetic engineering. It also analyzed the existing problems, including the shortage of self-incompatible lines, low efficiency of distant hybridization, and an underdeveloped molecular breeding system. Finally, the paper discussed prospects for germplasm resource exploration, optimization of breeding objectives, and application of new technologies, aiming to provide a reference for genetic improvement and industrial development of *Pennisetum* forages.

Key words: *Pennisetum*; Forage breeding; Hybrid breeding; Engineering breeding

牧草是发展畜牧业的物质基础,亦是饲草产业发展的关键环节。遗憾的是,目前饲草资源供给不足已严重制约我国畜牧业的可持续发展^[1]。在此背景下,狼尾草属牧草凭借其生物量高、抗逆性强、营

养价值优良等突出特性,成为缓解饲草供需不足的重要潜力资源^[2]。狼尾草属牧草隶属于禾本科(Poaceae)黍亚科(Panicoideae),为一年生或多年生禾本科牧草,广泛分布于热带及亚热带地区,少数

收稿日期:2026-01-06;修回日期:2026-04-08

基金项目:北京市自然科学基金(6262008);河源市科技局2024年“扬帆计划”农村科技特派员专题项目(2025005);北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJ CX20251303)资助

作者简介:莫希涪(2000-),男,汉族,广东阳江人,硕士研究生,主要从事狼尾草育种研究工作,E-mail:736019734@qq.com;李翠(1984-),女,汉族,山东聊城人,副研究员,主要从事草类植物逆境生理及生物育种研究,E-mail:llcui@baaf.net.cn; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: zhousheng@zhku.edu.cn; guoqiang@baafs.net.cn

种类可延伸至温带区域^[3-4]。全球约有140种狼尾草属植物^[3,5],其中《中国植物志》记载的野生种以及近缘植物的种类有11种2变种,而特有物种占比高达45.45%,主要分布于我国东北、华北、华东、中南及西南地区^[4]。狼尾草根系发达、茎直立,且生长速度快、产量高、抗逆性强,是热带与亚热带地区重要的牧草资源^[3,5]。目前,我国引进栽培利用的狼尾草主要有美洲狼尾草(*Pennisetum glaucum*),象草(*P. purpureum*)以及杂交狼尾草(*P. glaucum*×*purpureum*),这些狼尾草表现出高产以及适口性好等优良特性。其中,杂交狼尾草年均鲜草产量可达 $283.3\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,干物质中粗蛋白含量可高达11%^[5],是牛、羊、鹅等畜禽的重要饲料来源^[4,6]。

但目前狼尾草属牧草的品种数量,与产业实际需求仍有不小差距,这也让狼尾草属牧草的育种工作显得尤为迫切和必要^[4]。基于此,本文系统梳理了狼尾草属牧草育种领域的主要研究进展,重点介绍了引种驯化与选择育种、杂交育种、诱变育种、基因工程育种及分子标记辅助育种等技术的研究成果,旨在为狼尾草的遗传改良、品种选育与产业化利用提供参考。

1 我国通过国家级审定的狼尾草属牧草品种

依据农业农村部畜牧兽医局与全国畜牧总站(2022年)及全国草品种审定委员会的统计数据,截至2025年,我国通过国家级审定的狼尾草属牧草品种累计17个。从物种类型划分,审定品种涵盖美洲狼尾草4个、象草7个、杂交狼尾草5个及东非狼尾草(*P. cladestinum*)1个(表1)。现有审定品种多聚焦于南方暖季型生态区,在产量形成、品质特性等方面适配南方高温高湿的气候条件;而针对北方寒冷、盐碱化等边际土地的抗逆高产品种则较为匮乏,难以满足北方草地畜牧业发展及盐碱地生态修复对优质饲草的需求。定向培育适配北方生境的狼尾草属牧草新品种,优化现有品种区域布局,已成为我国狼尾草属牧草育种领域亟待推进的主要任务。

2 国外主要狼尾草属牧草品种

依据现有公开品种登记资料统计,国外登记的狼尾草属牧草品种共27个。从物种类型划分,登记品种涵盖美洲狼尾草22个、杂交狼尾草3个、象草2

个(表2)。按国家分布看,这些品种主要登记于美国 and 印度,其中美国登记品种10个,印度登记品种7个,另有部分品种分布于津巴布韦、肯尼亚、马里和布基纳法索等国家。整体来看,国外狼尾草属牧草品种选育主要集中于美洲狼尾草,育种目标多服务于热带、亚热带及半干旱地区的饲草生产需求,在高产、再生性和环境适应性等方面形成了较为丰富的种质基础。相比之下,象草和杂交狼尾草的登记数量相对较少。

3 引种驯化与选择育种

引种驯化与选择育种是品种改良的传统核心技术,也是狼尾草育种创新的基础手段。我国对狼尾草属牧草的引种驯化工作始于20世纪40年代,最早从东南亚地区引入象草,并将其作为优质牧草资源开展系统的栽培利用^[7]。此后,我国不断拓展引种范围,陆续从美国、印度等国家引进美洲狼尾草、象草及杂交狼尾草等优异种质材料,不仅为狼尾草属牧草的遗传改良积累了丰富的遗传多样性基础,也为育种工作中的亲本选配与种质创新提供了关键的材料支撑^[8]。

在驯化与选择育种实践中,国内科研团队以表型鉴定为基础开展定向筛选,取得了一系列显著成果。例如,云南省肉牛和牧草研究中心于20世纪30年代从缅甸引进象草资源,经60~70年的本土栽培驯化,已成为云南当地草食家畜养殖的优良牧草^[9]。1987年从美国引进的‘摩特’矮象草,经多年试验示范后于1994年通过国家级品种审定,成为我国热带、亚热带地区主推的优质牧草品种^[10]。1999年广西畜牧研究所从台湾引进‘台畜草2号’,经多年驯化选育,于2010年审定命名为‘桂闽引’象草,该品种兼具叶片与叶鞘无毛、花期延迟、适口性佳等优良性状^[11]。2003年自巴西引进的‘紫色’象草,在广州开展的小区试种与系统评价中表现出良好的区域适应性,兼具耐寒、耐霜冻性、高产、再生能力强等特性^[12]。中国热带农业科学院从哥伦比亚国际热带农业中心引进象草与美洲狼尾草的杂交种质,经多年田间筛选与区域适应性试验最终育成‘热研4号’王草(*Pennisetum purpureum*×*Pennisetum americanum* ‘Reyan No. 4’),成为我国热带、亚热带地区牧草种植的核心品种^[13]。此外,中山大学与仲恺农业工程学院合作,以杂交狼尾草的芽变群体为

表 1 截止 2025 年我国审定的国家级狼尾草属牧草品种
Table 1 Nationally approved *Pennisetum* forage cultivars in China as of 2025

序号 No.	种名 Species	品种名 Cultivar	拉丁名 Scientific name	登记号/品种编号 Registration No. Cultivar No.	登记时间 Registration year	品种类别 Cultivar type	育种单位 Breeding institution	审定机构 Approving authority
1	美洲狼尾草	‘宁牧 26-2’美洲狼尾草	<i>P. americanum</i> ‘Ningmu No.26-2’	38	1989 年	育成品种	江苏省农业科学院土壤肥料研究所	农业农村部全国草品种审定委员会
2	杂交狼尾草	杂交狼尾草	<i>P. americanum</i> × <i>P. purpureum</i>	47	1989 年	引进品种	江苏省农业科学院土壤肥料研究所	农业农村部全国草品种审定委员会
3	象草	‘华南’象草	<i>P. purpureum</i> ‘Huanan’	66	1990 年	地方品种	广西壮族自治区畜牧研究所、华南热带作物研究院	农业农村部全国草品种审定委员会
4	象草	‘摩特’矮象草	<i>P. purpureum</i> ‘Mott’	134	1994 年	引进品种	广西壮族自治区畜牧研究所	农业农村部全国草品种审定委员会
5	美洲狼尾草	‘宁杂 3 号’美洲狼尾草	<i>P. americanum</i> ‘Ningza No.3’	195	1998 年	育成品种	江苏省农业科学院土壤肥料研究所	农业农村部全国草品种审定委员会
6	杂交狼尾草	‘热研 4 号’王草	<i>P. purpureum</i> × <i>P. tyhoideum</i> ‘Reyan No.4’	196	1998 年	引进品种	中国热带农业科学院	农业农村部全国草品种审定委员会
7	杂交象草	‘桂牧 1 号’杂交象草	(<i>P. americanum</i> × <i>P. purpureum</i>)× <i>P. purpureum</i> ‘Guimu No.1’	211	2000 年	育成品种	广西壮族自治区畜牧研究所	农业农村部全国草品种审定委员会
8	美洲狼尾草	‘宁杂 4 号’美洲狼尾草	<i>P. americanum</i> ‘Ningza No.4’	220	2001 年	育成品种	江苏省农业科学院草业研究开发中心、南京富得草业开发研究所	农业农村部全国草品种审定委员会
9	东非狼尾草	‘威提特’东非狼尾草	<i>P. cldestinum</i> ‘Whittet’	241	2002 年	引进品种	云南省肉牛和牧草研究中心	农业农村部全国草品种审定委员会
10	杂交狼尾草	‘邦得 1 号’杂交狼尾草	<i>P. americanum</i> × <i>P. purpureum</i> ‘Bangde. No.1’	315	2005 年	育成品种	广西北海绿邦生物景观发展有限公司、南京富得草业开发研究所	农业农村部全国草品种审定委员会
11	象草	‘德宏’象草	<i>P. purpureum</i> ‘Dehong’	340	2008 年	地方品种	云南省肉牛和牧草研究中心、云南省德宏州盈江县畜牧站	农业农村部全国草品种审定委员会
12	象草	‘桂闽引’象草	<i>P. purpureum</i> ‘Guimingyin’	396	2010 年	引进品种	广西壮族自治区畜牧研究所、福建省畜牧总站	农业农村部全国草品种审定委员会
13	象草	‘苏牧 2 号’象草	<i>P. purpureum</i> ‘Sumu No.2’	397	2010 年	育成品种	江苏省农业科学院畜牧研究所、浙江绍兴白云建设有限公司	农业农村部全国草品种审定委员会
14	象草	‘紫色’象草	<i>P. purpureum</i> ‘Zise’	468	2014 年	引进品种	广西壮族自治区畜牧研究所	农业农村部全国草品种审定委员会
15	杂交狼尾草	‘闽牧 6 号’杂交狼尾草	<i>P. americanum</i> × <i>P. purpureum</i> ‘Minmu No.6’	569	2019 年	育成品种	福建省农业科学院农业生态研究所	农业农村部全国草品种审定委员会
16	象草	‘川育 1 号’象草	<i>P. purpureum</i> ‘Chuanyu No.1’	683	2024 年	育成品种	四川农业大学、四川省畜牧科学研究院、四川省草业技术推广中心	农业农村部全国草品种审定委员会
17	美洲狼尾草	‘川育 2 号’美洲狼尾草	<i>P. americanum</i> ‘Chuanyu No.2’	699	2025 年	育成品种	四川农业大学	农业农村部全国草品种审定委员会

研究材料,通过系统观察植株形态特征与生产性能指标,从变异个体中筛选出与原品种性状差异显著的优良芽变系,经多代纯化选育出‘华南 1 号’杂交狼尾草新品系,为我国南方地区优质高产牧草品种体系构建提供了典型实践案例^[14]。

实践证明,经过持续的引种适应性评价与区域驯化栽培,杂交狼尾草、象草等驯化品种已在我国海南、广西、福建等南方地区实现广泛种植^[15]。可见,引种驯化与选择育种作为传统核心技术,不仅为狼尾草种属牧草的种质创新与分子育种奠定了坚实的材料基础,也为我国草牧业高质量发展提供了重要的品种支撑。

4 杂交育种

杂交育种是指利用不同基因型的亲本进行有性杂交,通过基因重组使杂交后代产生遗传变异,进而在杂种后代中定向筛选优良单株,最终培育新品种的核心育种技术^[16]。其目标在于聚合双亲优良基因,培育兼具高产、优质和抗逆等性状的新品种。作为狼尾草属牧草遗传改良的重要途径,杂交育种已形成涵盖种内杂种优势利用、细胞质雄性不育系创制和种间远缘杂交等在内的技术体系,并在推动狼尾草属牧草品种改良与产业化应用方面发挥了重要作用。

国外对狼尾草属牧草杂交育种研究始于 20 世纪 40 年代。初期研究主要聚焦于美洲狼尾草的杂

表 2 国外主要狼尾草属牧草品种

Table 2 Cultivars of *Pennisetum* forage grasses developed abroad

序号 No.	种名 Species	品种名 Cultivar	拉丁名 Scientific name	登记时间 Registration year	国家 Country
1	美洲狼尾草	‘STARR’	<i>P. americanum</i> cv. ‘STARR’	1953 年	美国
2	美洲狼尾草	‘Gahi-1’	<i>P. americanum</i> cv. ‘Gahi-1’	1962 年	美国
3	美洲狼尾草	‘Tiflate’	<i>P. americanum</i> cv. ‘Tiflate’	1972 年	美国
4	美洲狼尾草	‘Gahi 3’	<i>P. americanum</i> cv. ‘Gahi 3’	1977 年	美国
5	美洲狼尾草	‘Tifleaf-1’	<i>P. americanum</i> cv. ‘Tifleaf-1’	1980 年	美国
6	杂交狼尾草	‘Swetika’	<i>P. americanum</i> × <i>P. purpureum</i> cv. ‘Swetika’	1983 年	印度
7	美洲狼尾草	‘Tifleaf 2’	<i>P. americanum</i> cv. ‘Tifleaf 2’	1988 年	美国
8	象草	‘Merkeron’	<i>P. purpureum</i> cv. ‘Merkeron’	1989 年	美国
9	象草	‘Mott’	<i>P. purpureum</i> cv. ‘Mott’	1989 年	美国
10	美洲狼尾草	‘Tift #2 S-1’	<i>P. americanum</i> cv. ‘Tift #2 S-1’	1990 年	美国
11	美洲狼尾草	‘ICTP 8203’	<i>P. americanum</i> cv. ‘ICTP 8203’	1990 年	印度
12	美洲狼尾草	‘ICMV 2’	<i>P. americanum</i> cv. ‘ICMV 2’	1991 年	津巴布韦
13	美洲狼尾草	‘ICMV 155’	<i>P. americanum</i> cv. ‘ICMV 155’	1993 年	印度
14	美洲狼尾草	‘Tift 89D2’	<i>P. americanum</i> cv. ‘Tift 89D2’	1993 年	美国
15	美洲狼尾草	‘ICMV 88908’	<i>P. americanum</i> cv. ‘ICMV 88908’	1994 年	印度
16	美洲狼尾草	‘Kat/PM-1’	<i>P. americanum</i> cv. ‘Kat/PM-1’	1994 年	肯尼亚
17	美洲狼尾草	‘KMP1’	<i>P. americanum</i> cv. ‘KMP1’	1994 年	马里
18	美洲狼尾草	‘KMP2’	<i>P. americanum</i> cv. ‘KMP2’	1994 年	马里
19	美洲狼尾草	‘IKMV 8201’	<i>P. americanum</i> cv. ‘IKMV 8201’	1994 年	马里
20	美洲狼尾草	‘Kat/PM-2’	<i>P. americanum</i> cv. ‘Kat/PM-2’	1995 年	肯尼亚
21	美洲狼尾草	‘CMV-IS 88102’	<i>P. americanum</i> cv. ‘CMV-IS88102’	1996 年	布基纳法索
22	美洲狼尾草	‘Tifleaf 3’	<i>P. americanum</i> cv. ‘Tifleaf 3’	1997 年	美国
23	美洲狼尾草	‘Tift 93’	<i>P. americanum</i> cv. ‘Tift 93’	1997 年	美国
24	美洲狼尾草	‘Tift 8593’	<i>P. americanum</i> cv. ‘Tift 8593’	1997 年	美国
25	美洲狼尾草	‘ICMV 88904’	<i>P. americanum</i> cv. ‘ICMV 88904’	1997 年	印度
26	美洲狼尾草	‘TifGrain 102’	<i>P. americanum</i> cv. ‘TifGrain 102’	2005 年	美国
27	杂交狼尾草	‘DHN-6’	<i>P. americanum</i> × <i>P. purpureum</i> cv. ‘DHN-6’	2008 年	印度
28	杂交狼尾草	‘DHN-15’	<i>P. americanum</i> × <i>P. purpureum</i> cv. ‘DHN-15’	2020 年	印度

种优势利用。研究证实,美洲狼尾草籽粒产量具有明显的杂种优势,但因其花朵小、呈两性花结构,人工去雄操作难度大、成本高,严重制约了杂种优势的商业化转化与规模化利用^[17]。为突破这一瓶颈,20 世纪 50 年代研究人员尝试采用“混合种植自然异交”策略,将两个生育期相近的珍珠粟亲本群体混合种植,借助其超 85% 的高异交率实现自然授粉以获得杂交种。但该方法无法精准控制亲本组合,杂交后代遗传背景混杂、优势性状表达不稳定,未能实现推广应用^[18]。

细胞质雄性不育系的优化与创新,是美洲狼尾草杂交育种走向商业化的重要转折点。1955 年,研究人员在美洲狼尾草中筛选获得细胞质雄性不育株系,通过与自交系“Gahi-1”连续回交,成功培育出不育系 Tift18A 和 Tift23A。随后。1958 年,首个具有商业价值与经济可行性的 A1 型细胞质雄性不育系被报道,彻底解决了人工去雄的技术难题,为杂种优势的规模化利用奠定了坚实基础^[19]。为规避

单一细胞质背景可能引发的病害风险,科研人员陆续开发出 A2,A3,A4,A5 共 5 类细胞质类型的雄性不育系,有效拓宽了杂交亲本的选配范围,提升了杂交种的遗传多样性与环境适应性,直接推动美洲狼尾草杂交育种进入产业化发展阶段^[20]。

我国狼尾草属牧草杂交育种研究以引进国外优良雄性不育系为起点,通过本土化亲本选配与定向筛选,逐步创制出一批高产、优质的杂交品种,推动国内狼尾草属牧草杂交育种的跨越式发展。江苏省农科院先后从美国、印度等国引进了 Tift23A, Tift23DA 和 Tift85DA 等不育系种质,并以 13 份优异种质为父本材料开展杂交研究^[21]。研究表明,以 Bil3B 为恢复系,与不育系 23A,23DA,85DA 配制的杂交组合,鲜草产量较对照分别提高 43.3%, 52.2% 和 20.1%;同时筛选出以恢复系 3B-6 为父本,与上述不育系配制的 3 个优质高产杂交组合,分别为 23A/3B-6、23DA/3B-6 和 85DA/3B-6。基于上述研究基础,以 Tift23A 为母本、3B-6 为父本育

成‘宁杂3号’,该品种兼具适应性广、杂种优势强、草产量高、适口性好等特点,成为国内首个规模化推广的狼尾草杂交品种^[22];随后,2001年以美洲狼尾草不育系 Tift23DA 与恢复系 Bil3B-6 配制的‘宁杂4号’通过品种审定,其鲜草、干草、籽实、秸秆产量较对照‘宁牧26-2’分别提高68.8%,53.7%,36.2%,23.0%,进一步丰富了高产优质狼尾草品种资源^[23]。为揭示CMS系(细胞质雄性不育)的不育分子机理,我国江苏省农业科学院钟小仙团队对源自 Tift23A 型美洲狼尾草细胞质雄性不育系 23A 及其保持系 23B 的线粒体基因组进行了系统组装与比较分析,发现CMS系 23A 特有的核糖体蛋白基因 *rpl16*,可通过与能量代谢关键蛋白 NDUFV1 相互作用,破坏花药发育早期的活性氧稳态,导致绒毡层提前降解和花粉败育,从分子层面阐明了该类CMS系的不育本质^[24]。

远缘杂交是打破种间生殖隔离、整合不同种属优良性状的重要手段,可扩大遗传变异范围、实现有益性状的跨物种重组,在狼尾草新种质创制中具有不可替代的作用^[25]。Dowling 等^[26]通过温室控制授粉实验,系统验证了珍珠粟与象草的种间杂交可行性。该研究以3个珍珠粟CMS不育系、4个珍珠粟可育基因型为母本,4个象草基因型为父本开展杂交,所有组合均获得F₁代杂种种子;同时开发EST-SSR分子标记,实现了对杂种真实性的精准鉴定,为珍珠粟与象草杂种的遗传背景验证及后续筛选提供了关键技术支撑。基于该技术体系,研究人员成功培育出CO(CN)-4,CO(BN)-5等珍珠粟×象草种间杂交品种,这类杂种完美整合了双亲核心优势性状:既从珍珠粟继承了优质营养成分、快速生长特性及深根系优势,又从象草获得高生物量、强再生能力、多分蘖性及多年生生长习性,已成为热带、亚热带地区规模化种植的优质饲草。江苏省农业科学院于1989年从美国引进珍珠粟(Tift23A)与象草(N51)的F₁代杂交种,并从其F₂代群体中通过单株选择与混合选择,培育出遗传稳定的‘宁牧26-2’美洲狼尾草^[27]。2005年,以Tift23A为母本、早熟象草N-Hawaii为父本育成‘邦得1号’杂交狼尾草,年均干草产量达21 000~25 000 kg·hm⁻²,适应南方多熟制种植体系^[28];2012年,以Tift23A为母本、象草N51为父本配制F₁代杂交种,通过辐射诱变与田间筛选培育出‘闽牧6号’,进一步提升了杂交狼尾草的抗逆性与产量稳定

性^[29]。此外,2002年江苏省农业科学院对引进的Tift85DA₄不育系进行适应性评估,证实其生育特性与Tift23A相近、纯度高,且与象草杂交制种结实性好、种子产量高,为该不育系的本土化应用拓展了空间^[8]。

目前狼尾草属牧草杂交育种存在显著不足,自主知识产权细胞质雄性不育系匮乏,我国育种研究多依赖引进国外Tift23A等不育系,具有自主产权的优良不育系创制滞后,难以摆脱对国外核心育种材料的依赖;远缘杂交育种面临诸多技术困难,尽管珍珠粟与象草等种间杂交已获成功,但普遍存在种间亲和性低、杂交成功率不高的问题,且杂种后代性状分离严重、遗传稳定性差,加之精准筛选技术体系尚不完善,导致优良性状的高效聚合与稳定筛选效率偏低。应加快创制自主知识产权不育系新种质;优化远缘杂交技术方案,提升杂交亲和性与后代筛选精准度,推动狼尾草属牧草育种高质量发展。

5 诱变育种

诱变育种是通过物理(如辐射)或化学(如诱变剂)手段诱发生物体产生可遗传变异,再依据育种目标对变异个体进行定向选择与系统培育,最终育成新品种的技术方法^[30]。与驯化育种等传统手段相比,其核心优势在于能快速诱导丰富且稳定遗传的变异,有效解决优质基因资源匮乏问题,为选育高产、优质、抗逆的狼尾草属新种质提供高效路径^[31]。同时,诱变育种通过人为创造变异群体缩短优良性状筛选周期,丰富种质资源遗传多样性,为基因挖掘与品种创新奠定基础,对推动狼尾草属牧草遗传改良与产业应用具有重要实践意义。

5.1 物理诱变育种

物理诱变育种是以辐射、航天航空的微重力和真空等物理因素诱发植物突变的育种技术,包括辐射育种和空间育种^[32]。其中,狼尾草属牧草物理诱变育种以辐射诱变为主。⁶⁰Co-γ射线是常用的诱变源,其剂量与处理方式直接影响狼尾草属牧草的诱变效果,不同材料与剂量组合呈现特异性响应规律。多项研究明确了适宜诱变剂量范围。例如,Purnama 等^[33]发现高活性率(急性辐射)因短期释放高能量,对超级象草生长抑制更强;低活性率(慢性

辐射)通过长期低剂量作用诱导更多遗传重组,更易产生多样突变。其推荐低活性率35.82~55.71 Gy、高活性率28.98~28.99 Gy作为超级象草茎节诱变参考剂量,此剂量可在保证突变率的同时避免过高死亡率。王萌等^[34]采用不同辐射剂量的⁶⁰Co- γ 射线对‘紫叶’狼尾草(*Pennisetum $\times$ advena* ‘Rubrum’)组培苗进行辐射诱变,发现在0~55 Gy内,紫叶狼尾草成活率100%,随着辐射剂量的增加,成活率降低,变异率升高。在此基础上,诱变可显著提高狼尾草属牧草遗传多样性,为品种改良提供多样亲本选择,同时在优良株系选育中成效显著,可有效优化产量与抗逆性状,解决无性繁殖导致的遗传资源匮乏问题。具体而言,Islam^[35]以7个象草种质茎段为材料,采用20 Gy,30 Gy,40 Gy,50 Gy,60 Gy射线处理,获得41个辐射诱变突变体。结果显示,20 Gy和30 Gy处理下突变体存活率显著增高,且能显著提升部分种质鲜重;40 Gy和50 Gy高剂量处理则存活率显著降低,表明中低剂量更利于平衡存活率与变异率。后续结合SSR标记对这些突变体分析显示,41个象草辐射诱变株系中共检测到17个等位基因,平均每个点位3.4个,基因多样性平均0.5286,PIC值范围0.3047~0.6587(平均0.4704),辐射诱变显著提高了象草遗传多样性,UPGMA聚类将48个基因型分为5个主要类群,遗传距离范围0.0~1.0,进一步证实突变体间存在丰富遗传分化。武炳超等^[36]对象草种茎的研究也证实30 Gy剂量诱变效率最高,可诱导分蘖数、茎节数等敏感性状产生显著变异,甚至获得矮小化突变体,其后续还采用该剂量⁶⁰Co- γ 射线处理‘热研4号’杂交狼尾草与‘华南’象草种茎,获得分蘖多、生物量大的优良株系^[37]。在优良品种培育方面,⁶⁰Co- γ 射线辐射诱变技术已成为高效创制优异种质的重要手段。四川农业大学通过⁶⁰Co- γ 射线辐射处理象草种茎,经系统筛选,选育出抗寒高产的‘川育1号’象草,该品种于2024年通过国家草品种审定;北京市农林科学院通过⁶⁰Co- γ 射线辐射处理象草种茎,经系统筛选,育成鲜草产量与粗蛋白含量均显著提升的优良品种‘京育43’象草,该品种于2025年通过北京市林草品种委员会审定。福建省农业科学研究院采用相同辐射诱变技术处理美洲狼尾草与象草杂交F₁代种子,筛选出耐贫瘠、耐湿且高产的‘闽牧6号’新品种^[29]。

⁶⁰Co- γ 射线辐射诱变技术在狼尾草属牧草育种

中展现出突出的应用价值,辐射处理可定向诱导高产、抗逆等优良性状。未来通过优化剂量与材料组合,将有效加快狼尾草属牧草优质新品种的选育进程,进而缓解畜牧业生产中的饲料短缺难题,为我国草食畜牧业的高质量、可持续发展提供坚实的种质支撑。

5.2 化学诱变育种

化学诱变作为作物遗传改良的重要手段,其核心优势在于诱导产生的遗传变异以点突变为主,这类变异稳定性高,在遗传传递过程中易被保留,为后续目标性状的筛选与固定提供便利^[38]。在狼尾草属牧草的诱变育种实践中,EMS诱变被证实能有效激发物种遗传潜力,通过产生优异变异显著改善植株性状与品质,展现出广阔的应用前景。

例如,在象草育种中,Munasik等^[39]以种茎为材料,采用0.2%甲基磺酸乙酯(EMS)进行诱变处理,通过田间随机区组设计实验证实,该处理可显著提升象草的株高、鲜草产量及粗蛋白含量,为象草产量与品质协同提升提供了可行路径。在珍珠粟的EMS诱变研究中,采用20,30,40 mmol·L⁻¹ EMS处理珍珠粟,结果表明30 mmol·L⁻¹ EMS处理组的株高、单株产量、千粒重、叶绿素及碳水化合物含量均达到最高水平^[40]。此外,Abdalla等^[41]研究证实,500 mg·L⁻¹二甲基硫酸盐可显著提高株高、分蘖数、叶片数及单株产量等农艺性状。上述研究表明,化学诱变可为狼尾草属牧草遗传改良提供有利变异,在产量提升和品质改良方面具有应用价值。但总体来看,该技术在狼尾草属牧草中的应用仍较少,相关研究有待进一步深入。

6 基因工程育种

基因工程育种技术是人为将外源基因导入目标细胞或生物个体,实现外源基因稳定表达与遗传,进而定向改变植物性状以培育新品种的育种方式^[42],该技术可突破传统杂交育种的物种生殖隔离限制,可快速聚合跨物种优良基因,为狼尾草属牧草的遗传改良提供了高效路径^[43]。

狼尾草属牧草高效、基因型依赖的离体再生体系和高效遗传转化体系是转基因技术在狼尾草属牧草中成功应用的核心前提。在离体再生体系构建方面,Devi等^[44]以珍珠粟7042-S,7042-R,ICMP-

451和81B4个不同基因型的幼苗茎尖为外植体,在MS培养基上系统优化2,4-二氯苯氧乙酸(2,4-D)与苄基腺嘌呤(BA)的组合比例,建立起高效、通用且低基因型依赖的茎尖离体再生体系;Rockiasamy等^[45]则进一步拓展珍珠粟外植体选择范围,以成熟胚和叶基为外植体,分别建立器官再生与体细胞胚胎再生两种体外再生途径;范欲航等^[46]以美洲狼尾草茎节、幼穗、幼叶及种子为外植体,通过调节不同植物激素组合,构建了以种子为最佳外植体的组培再生体系,胚性愈伤诱导率可达93.3%,分化率达81.1%。上述研究为珍珠粟遗传改良提供了技术基础。同时,刘逸冷等^[47]优化了杂交狼尾草胚性愈伤诱导和分化培养基,使其愈伤诱导率可达54%,分化率可达68.33%。Faleiro^[48]则以高生物量象草品种的未成熟花序为外植体诱导胚性愈伤,进一步丰富象草再生体系的外植体类型,提升技术通用性。

在上述离体再生体系的基础上,Jha等^[49]首次建立了农杆菌介导的珍珠粟茎尖转化体系,以3~4天龄幼苗茎尖为外植体,采用农杆菌菌株EHA105介导转化,通过无愈伤阶段的多芽再生策略,实现5.79%的转化效率,经GUS组织化学染色、PCR分子检测及Southern blot杂交验证,证实外源基因稳定整合并获得可育转基因植株;Ramadevi等^[50]则针对珍珠粟霜霉病感病品种ICMP451,通过农杆菌介导遗传转化将抗菌肽基因导入感病品种以期获得抗病性,经抗性筛选最终获得13株转基因植株,为珍珠粟抗病性状定向改良及基因功能研究奠定了基础。象草的转化则以基因枪介导为主,Gondo等^[51]在获得矮化象草胚性愈伤的基础上,采用基因枪介导转化,经抗性筛选获得9个GUS阳性抗性愈伤,最终获得4株转基因植株,成为首个象草转基因成功案例;Faleiro等^[48]进一步优化象草基因枪转化体系,从多个基因型中获得6个独立转基因株系,为象草分子遗传改良提供关键技术支撑。牟彤等^[52]以狼尾草愈伤组织为受体,通过农杆菌介导将黑麦草抗冻蛋白基因*LpAFP*导入狼尾草愈伤组织,经抗性筛选获得14株抗性植株,PCR检测显示2株呈阳性,RT-PCR检测证实*LpAFP*基因已稳定整合至狼尾草基因组;王凭青等^[53]克隆了拟南芥冷响应转录因子基因*CBF1*,以杂交狼尾草叶片为外植体,通过农杆菌介导转化获得转基因再生植株,为耐寒性状分子改良提供基因资源与技术路径。

目前,狼尾草属牧草的抗逆机制解析已取得一定进展,鉴定到一批与抗寒、耐盐等胁迫相关的功能基因,为抗逆分子育种提供了丰富的理论依据与基因资源。在抗寒机制与基因挖掘方面,转录组与基因组学研究已揭示多条核心调控通路及关键基因。例如,Hu等^[54]通过转录组分析证实,低温胁迫可显著激活狼尾草属植物中脱落酸(ABA)信号通路、钙信号通路、丝裂原活化蛋白激酶级联反应(MAPK)、活性氧(ROS)清除系统及渗透调节通路等典型抗逆通路,其中*CpSAPK1*, *CpADC*及*CpP5CS*等候选基因的异源表达可显著提升酵母的低温耐受性,暗示其在耐寒调控中的核心作用;Mao等^[55]通过象草全基因组分析鉴定出176个*CpWRKY*基因,进一步研究发现6个基因受低温胁迫显著诱导,其中*CpWRKY81*的过表达可显著增强酵母的耐寒性,明确了WRKY家族基因在狼尾草属植物耐寒响应中的关键调控功能。在耐盐机制与功能基因挖掘方面,多通路协同与关键基因精准调控构成了狼尾草属牧草的核心耐盐网络。植物激素信号转导通路中,脱落酸(ABA)合成关键基因(*ZEP*, *NCED*, *ABA2*等)的上调表达可促进ABA积累,通过介导气孔关闭与细胞渗透压调节,减轻盐胁迫导致的水分流失与离子失衡^[56];ABC转运蛋白家族基因(如ABCG, ABCC亚家族)在盐胁迫下表现出显著的功能特异性,通过转运离子、激素等底物参与植株离子平衡维持与抗逆信号传导,是狼尾草属牧草适应盐胁迫的重要分子特征^[57];此外,ARF(生长素响应因子)、NAC等转录因子家族基因通过调控下游抗逆基因的时空表达,进一步优化离子转运、氧化应激防御等生理过程,在狼尾草属牧草耐盐性调控中发挥关键作用^[58]。

综上,狼尾草属牧草基因工程育种已具备一定研究基础,遗传转化和功能基因挖掘等技术逐步建立。未来应重点优化遗传转化体系,提高转化效率和基因型适用性,并结合基因组、转录组等多组学手段,挖掘高产、抗逆等重要性状相关基因,推进优良性状的精准改良,培育适应不同生态生境的新品种。

7 分子标记辅助育种

分子标记辅助育种是指利用与目标性状基因紧密连锁的分子标记,通过检测标记基因型间接筛选携带目标性状的个体,实现对育种材料精准、高

效选择的技术体系^[59],其核心价值在于缩短育种周期、提升选择效率,为种质资源挖掘与遗传改良提供关键工具。在狼尾草属牧草研究中,该技术已依托多种分子标记体系,从遗传多样性分析、遗传亲缘关系鉴定以及特异性标记开发方面开展了研究。

作为狼尾草属的核心物种,珍珠粟的分子标记研究为整个属的育种提供了重要基础。Bashir等^[60]针对苏丹及西非地区214份珍珠粟材料,利用SSR标记开展检测,共获得400个等位基因,平均多态信息含量(PIC)达0.77、遗传多样性指数0.82、杂合度0.72,最终将材料划分为7个遗传类群,清晰证实了该区域珍珠粟蕴含丰富的遗传多样性,为后续种质资源筛选与亲本选配提供了数据支撑。而珍珠粟分子标记的价值被进一步应用于其近缘种—象草。Kandel等^[61]通过107对珍珠粟来源的分子标记,对99份象草资源进行多态性筛选,成功获得29条多态性引物,Negawo等^[62]则采用20对珍珠粟来源的SSR标记对象草进行遗传分析,明确了象草群体结构特征。因此,采用珍珠粟的分子标记可以评估象草遗传多样性,并且珍珠粟标记在象草中具有跨物种适用性,为象草的分子育种突破了标记资源匮乏的瓶颈。此外,狼尾草属牧草的分子标记研究覆盖不同的标记类型。钟小仙等^[15]基于RAPD技术,从随机引物中筛选出10个可扩增清晰多态性条带的引物,对83份狼尾草属材料开展遗传分析,将其划分为5个遗传类群,遗传相似系数范围0.51~0.94,首次揭示不同地理来源的狼尾草属材料存在明显遗传分化;朱丹丹等^[63]则采用ISSR标记对24个狼尾草属品种进行研究,从78条引物中筛选出13条多态性引物,共扩增303条条带,进一步印证狼尾草属材料普遍具有高遗传变异水平的特征;邹冰灿等^[64]为提升遗传分析准确性,创新性联合SRAP与SSR两种标记,对22份狼尾草属材料进行研究,更精准地明确了材料间的亲缘关系,为复杂遗传背景下的物种分类提供了更可靠的技术方案。

高通量测序技术的发展为植物基因组研究带来革命性变革,也为狼尾草属分子标记辅助育种注入新动力。2017年,珍珠粟首个参考基因组(基因型Tift 23D₂B₁-P1-P5)完成测序并公布,其基因组大小约1.79 Gb,研究团队同时对994份珍珠粟资源进行重测序,通过全基因组关联研究(GWAS)与群体遗传分析,系统解析了该物种的群体结构与遗传多样性特征,鉴定出24个与驯化相关的基因组区

域^[65]。北京市农林科学院综合运用PacBio、Illumina和Hi-C技术,成功组装了‘丽秋’狼尾草的基因组,该基因组大小约为845.71 Mb,其中833.41 Mb的序列被锚定到9条染色体上,基因组完整性为99.13%^[66]。兰州大学组装了象草的高质量染色体级别的基因组,大小为1.97 Gb^[67]。四川农业大学科研团队完成了10个美洲狼尾草种质的泛基因组组装,组装的10个美洲狼尾草种质基因组大小在1.89~2.00 Gb^[68]。狼尾草属物种基因组研究也逐步完善,进一步丰富了该属的基因组资源,更推动了分子标记开发与农艺性状基因鉴定的效率提升。其中,Lo'pez等^[69]以16份象草资源为研究对象,通过基因组测序首次直接从象草基因组中开发出316对高多态性SSR标记,这些标记平均每引物可检测4.4个等位基因,多样性指数0.38~0.75,不仅填补了象草特异性分子标记的空白,更能精准支撑象草遗传多样性分析、分子标记辅助育种及种间杂交研究中的杂种真实性鉴定。Wang等^[70]则通过象草全基因组测序,重点挖掘基因组中具有多态性的SSR位点,最终开发出28对高多态性SSR分子标记,经PCR验证所有引物扩增成功率达100%,多态率93.3%,平均多态信息含量(PIC)0.35,这些标记覆盖象草基因组不同区域,可直接用于象草的基因挖掘、遗传图谱构建及进化分析,为象草基因组资源的实际育种应用搭建了桥梁。Muktar等^[71]则进一步将象草基因组测序与农艺性状关联分析结合,对105份象草资源进行基因分型测序,筛选出980个高多态性SNP标记用于遗传分析,不仅通过核心种质筛选算法确定14份代表性核心材料(覆盖90%以上遗传与表型多样性),还通过全基因组关联分析鉴定出22个与象草农艺性状(如鲜秸秆产量、株高)相关的候选基因。针对美洲狼尾草,李青遥等^[72]采用基因组Survey测序策略,在获取其基因组基础特征的同时,定向开发基因组SSR分子标记,通过引物筛选最终获得18对高多态性引物,利用这些引物对美洲狼尾草资源进行遗传分析,解析了不同地理来源材料的遗传多样性差异,为美洲狼尾草的种质资源分类、核心种质构建及亲本选择提供了分子依据。上述成果为狼尾草属牧草的遗传改良提供了关键的标记资源与基因靶点,推动该属物种的分子育种从“标记筛选”向“目标性状定向改良”。

8 展望

狼尾草属牧草育种已在种质资源、分子育种及品种选育等方面积累了扎实基础,但现有品种的数量与品质仍难以满足我国草牧业高质量发展的需求。基于现有研究成果与产业实际需求,未来狼尾草属牧草育种研究需聚焦以下方向:强化种质资源挖掘利用,系统收集保存野生种质、精准引进国外优异资源,结合表型与分子技术挖掘高产优质抗逆种质,拓宽遗传基础,为种质创新与亲本选配提供支撑;聚焦产业需求优化育种目标,围绕高产、优质、抗逆协同改良,重点提升饲草品质、降低木质素含量,同时针对性开展耐寒、耐盐碱等性状选育,拓展品种种植与推广区域;突破育种核心技术瓶颈,完善基因组解析与分子标记开发体系,重点攻克高效遗传转化、基因编辑等关键技术,构建适配狼尾草属牧草的现代分子育种技术体系,实现目标性状精准定向改良。

参考文献

- [1] 郭莹,杜元元,张雪婷,等. 我国饲草生产现状及发展对策[J]. 畜牧与饲料科学,2021,42(2):85-90
GUO Y, DU J Y, ZHANG X T, et al. Production status and development strategies of forage grass in China[J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2021, 42(2): 85-90
- [2] 陈兆伟,黄小云,黄秀声,等. 狼尾草属牧草青贮饲料的研究进展、应用现状及发展前景[J]. 动物营养学报,2025,37(6): 3606-3617
CHEN Z W, HUANG X Y, HUANG X S, et al. Research progress, application status and development prospects of *Pennisetum* grasses silage feed[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2025, 37(6): 3606-3617
- [3] 王文强,周汉林,唐军. 狼尾草属牧草研究及利用进展[J]. 热带农业科学,2018,38(6):49-55,78
WANG W Q, ZHOU H L, TANG J. Research advances on development and utilization of forage of *Pennisetum spp* [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2018, 38(6): 49-55, 78
- [4] 侯新村,滕珂,郭强,等. 狼尾草属牧草研究进展[J]. 植物学报,2022,57(6):814-825
HOU X C, TENG K, GUO Q, et al. Research advances in forage *Pennisetum* resource [J]. Bulletin of Botany, 2022, 57(6): 814-825
- [5] 陈志彤,何水林,黄毅斌. 狼尾草属牧草研究进展[J]. 草地学报,2010,18(5):740-748
CHEN Z T, HE S L, HUANG Y B. Research progress of *Pennisetum* rich [J]. Acta Agrestia Sinica, 2010, 18(5): 740-748
- [6] 罗宗志. 主要狼尾草属牧草核型及 SCAR 分析[D]. 福州:福建农林大学,2017:1-2
LUO Z Z. Karyotype and SCAR analysis of the main forages of *Pennisetum* [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017: 1-2
- [7] 林洁荣,刘建昌,苏水金. 福建南亚热带狼尾草属牧草品比试验[J]. 福建农林大学学报(自然科学版),2003,32(1): 110-112
LIN J R, LIU J C, SU S J. Test of forage varieties of *Pennisetum* Rich. in the south subtropics in Fujian [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2003, 32(1): 110-112
- [8] 丁成龙,顾洪如,许能祥,等. 美洲狼尾草不育系 Tift85DA₄ 的引进及其种间杂交制种技术研究[J]. 中国草地,2002,24(5): 29-32
DING C L, GU H R, XU N X, et al. Introduction of male sterile line Tift85DA₄ and hybrid seed production of *Pennisetum americanum* × *Pennisetum purpureum* [J]. Grassland of China, 2002, 24(5): 29-32
- [9] 匡崇义,徐驰,黄晓松,等. 云南德宏象草与王草的对比试验研究[J]. 草业与畜牧,2007(6):4-8
KUANG C Y, XU C, HUANG X S, et al. Study on adaptability of DeHong elephant grass and king grass in Kunming of Yunnan Province [J]. Prataculture & Animal Husbandry, 2007(6): 4-8
- [10] 周峰,董朝霞,解新明. 摩特矮象草的研究和利用进展[J]. 草原与草坪,2007,27(3):76-82
ZHOU F, DONG Z X, XIE X M. Review on the research and utilization of *Pennisetum purpureum* cv. Mott in tropical and subtropical areas [J]. Grassland and Turf, 2007, 27(3): 76-82
- [11] 王舒宁,王均辉. 桂闽引象草及其推广应用[J]. 福建畜牧兽医,2014,36(1):19-20
WANG S N, WANG J H. Elephant grass in Guangxi and Fujian and its popularization and application [J]. Fujian Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2014, 36(1): 19-20
- [12] 易显凤,赖志强,蔡小艳,等. 紫色象草的高产栽培与开发利用[J]. 草业与畜牧,2012(1):22-23,27
YI X F, LAI Z Q, CAI X Y, et al. High-yield cultivation and development and utilization of purple elephant grass [J]. Prataculture & Animal Husbandry, 2012(1): 22-23, 27
- [13] 刘国道,白昌军,王东劲,等. ‘热研4号’王草选育[J]. 草地学报,2002,10(2):92-96
LIU G D, BAI C J, WANG D J, et al. The selection and utilization of ‘reyan No. 4’ king grass [J]. Acta Agrestia Sinica, 2002, 10(2): 92-96
- [14] 陈平,吴秀峰,席嘉宾,等. 华南1号杂交狼尾草选育初报[J]. 仲恺农业技术学院学报,2004,17(1):56-59
CHEN P, WU X F, XI J B, et al. A preliminary study on the breeding of Huanan No. 1 hybrid *Pennisetum* [J]. Journal of Zhongkai Agrotechnical College, 2004, 17(1): 56-59
- [15] 钟小仙,顾洪如,向阳海,等. 狼尾草属牧草资源的 RAPD 分析[J]. 江苏农业学报,2003,19(2):109-113
ZHONG X X, GU H R, XIANG Y H, et al. RAPD analysis on

- forage resources in *Pennisetum* [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2003, 19(2): 109-113
- [16] 袁隆平. 杂交水稻培育的实践和理论[J]. 中国农业科学, 1977, 10(1): 27-31
- YUAN L P. Practice and theory of hybrid rice cultivation [J]. Scientia Agricultura Sinica, 1977, 10(1): 27-31
- [17] ATHWAL D S. Current plant breeding research with special reference to *Pennisetum* [J]. Indian Journal of Genetics and Plant Breeding, 1966, 26A: 73
- [18] GILL K S. Pearl millet and its improvement [M]. New Delhi: Indian Council of Agricultural Research, 1991: 1-7
- [19] VADEZ V, HASH C T, BIDINGER F R, et al. Phenotyping pearl millet for adaptation to drought [J]. Frontiers in Physiology, 2012, 3: 386
- [20] YADAV O P, GUPTA S K, GOVINDARAJ M, et al. Genetic gains in pearl millet in India: insights into historic breeding strategies and future perspective [J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 645038
- [21] 白淑娟, 顾洪如, 周卫星, 等. 杂交狼尾草制种技术 [J]. 江苏农业科学, 1997, 25(5): 58-60
- BAI S J, GU H R, ZHOU W X, et al. Seed production techniques of hybrid *Pennisetum* [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 1997, 25(5): 58-60
- [22] 顾洪如, 白淑娟, 丁成龙. 牧草新品种‘宁杂3号’美洲狼尾草及其栽培技术 [J]. 江苏农业科学, 1999, 27(4): 71-72
- GU H R, BAI S J, DING C L. A new forage variety ‘Ningza No. 3’ *Pennisetum americanum* and its cultivation techniques [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 1999, 27(4): 71-72
- [23] 白淑娟, 周卫星, 钟小仙. ‘宁杂4号’美洲狼尾草选育研究 [J]. 杂粮作物, 2002, 22(1): 19-22
- BAI S J, ZHOU W X, ZHONG X X. Selection of American pearl millet ‘ningza NO. 4’ [J]. Rain Fed Crops, 2002, 22(1): 19-22
- [24] TAN Z Z, XUE W T, QIAN C, et al. Mitogenomic comparison identifies *rpl16* as a CMS driver via ROS dysregulation in pearl millet [J]. The Crop Journal, 2025, 13(5): 1516-1525
- [25] 邓衍明, 叶晓青, 余建明, 等. 植物远缘杂交育种研究进展 [J]. 华北农学报, 2011, 26(S1): 52-55
- DENG Y M, YE X Q, SHE J M, et al. The research progress on distant hybridization of plant breeding [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2011, 26(S1): 52-55
- [26] DOWLING C D, ESTÉVEZ J, BOLLAM S, et al. Marker-assisted verification of hybrids in pearl millet - Napier grass (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br. × *Pennisetum purpureum* Schumach.) [J]. American Journal of Plant Sciences, 2013, 4: 1004-1012
- [27] 顾洪如, 杨运生, 白淑娟, 等. 牧草新品种‘宁牧26-2’狼尾草 [J]. 江苏农业科学, 1992, 20(4): 61-63
- GU H R, YANG Y S, BAI S J, et al. A new forage variety ‘Ningmu 26-2’ *Pennisetum* [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 1992, 20(4): 61-63
- [28] 周佳佳, 魏欣欣, 王勋, 等. 邦得1号杂交狼尾草的栽培技术及饲用价值 [J]. 农技服务, 2022, 39(3): 93-94
- ZHOU J J, WEI X X, WANG X, et al. Cultivation techniques and feeding value of hybrid *Pennisetum* Bunde 1 [J]. Agricultural Technology Service, 2022, 39(3): 93-94
- [29] 陈钟佃, 黄勤楼, 黄秀声, 等. ‘闽牧6号’狼尾草的选育及田间种植技术 [J]. 家畜生态学报, 2012, 33(1): 53-55
- CHEN Z D, HUANG Q L, HUANG X S, et al. Breeding and cultivation technology of *Pennisetum* [J]. Journal of Domestic Animal Ecology, 2012, 33(1): 53-55
- [30] 杨学智, 韩云哲, 朴雪梅, 等. 水稻诱变育种研究进展 [J]. 北方水稻, 2024, 54(3): 41-50
- YANG X Z, HAN Y Z, PIAO X M, et al. Research progress of mutation breeding in rice [J]. North Rice, 2024, 54(3): 41-50
- [31] 王志东. 我国辐射诱变育种的现状分析 [J]. 同位素, 2005, 18(3): 183-185
- WANG Z D. The progress of radiative mutation breeding in China [J]. Journal of Isotopes, 2005, 18(3): 183-185
- [32] 邱新棉. 植物空间诱变育种的现状和研究进展 [C]//第六届核农学青年科技工作者学术交流会暨中国核学会2011年学术年会核农学分会论文集. 2011: 169-176
- QIU X M. Current status and research progress of plant space mutation breeding [C]//Proceedings of the 6th Youth Academic Exchange Meeting of Nuclear Agriculture and the Nuclear Agriculture Branch of the 2011 Academic Annual Meeting of Chinese Nuclear Society. 2011: 169-176
- [33] KHAERANI P I, MUSA Y, UTAMY R F, et al. Radiosensitivity of super Napier grass (*Pennisetum purpureum* × *Pennisetum glaucum*) induced by low and high-activity rates of gamma irradiation [J]. Plant Breeding and Biotechnology, 2024, 12: 4
- [34] 王萌, 贾明, 位明君, 等. ^{60}Co - γ 辐射对‘紫叶’狼尾草的诱变效应 [J/OL]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20221129.1134.018.html>, 2022-11-30/2026-04-15
- WANG M, JIA M, WEI M J, et al. Mutagenic effects of ^{60}Co - γ radiation on ‘Purple leaf’ *Pennisetum* [J/OL]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20221129.1134.018.html>, 2022-11-30/2026-04-15
- [35] ISLAM M N, ISLAM M A, UDDIN M I, et al. Morpho-molecular characterization of Napier (*Pennisetum purpureum*) fodder mutants through SSR markers: morpho-molecular characterization of Napier [J]. SAARC Journal of Agriculture, 2022, 20(2): 105-119
- [36] 武炳超, 张欢, 童磊, 等. 象草不同辐射剂量诱变系表型及遗传变异研究 [J]. 草业学报, 2018, 27(11): 77-86
- WU B C, ZHANG H, TONG L, et al. Research on genetic and phenotypic differences of *Pennisetum purpureum* mutants generated by irradiation [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(11): 77-86
- [37] 武炳超, 童磊, 杜昭昌, 等. ^{60}Co - 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 ^{60}Co - γ -rays on two species of *Pennisetum* genus forages [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(3): 414-427

- [38] 程芳艳,王继亮,孙翊轩,等. 化学诱变在寒地水稻育种中的应用[J]. 北方水稻,2018,48(5):1-5,10
CHENG F Y, WANG J L, SUN Y X, et al. Application of chemical mutagenesis in breeding of rice in Heilongjiang Province[J]. North Rice, 2018, 48(5): 1-5, 10
- [39] MUNASIK M, SUTRISNO C I, ANWAR S, et al. The growth, yield and quality of elephant grass (*Pennisetum purpureum*) specific tolerant of acid soils by mutagenesis with ethyl-methane sulfonate[J]. Animal Production, 2012, 14(2): 87-91
- [40] MULLAINATHAN K A L. Effect of mutagens on quantitative characters in m3 generation of pearl millet (*Pennisetum typhoides* (burn. f) stapf. and c. e. hubb.)[J]. Journal of Phytochemistry, 2018:1-5
- [41] ABDALLA A F M, MOURAD S S B, Yassein H E, et al. Mutagenic effect of dimethyl sulphate and gamma rays on pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.)[J]. Al-Azhar Journal of Agricultural Research, 2016, 26: 293-307
- [42] 亓雯雯,李亚晓,马红媛,等. 盐胁迫下羊草种子萌发特性的种内变异及其影响因素[J]. 生态学报, 2025, 45(11): 5481-5496
QI W W, LI Y X, MA H Y, et al. Intraspecific variation of seed germination characteristics of *Leymus chinensis* under salt stress and its influencing factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(11): 5481-5496
- [43] 亓雯雯,马红媛,李亚晓,等. 优质牧草新品种选育方法研究进展[J]. 草业学报, 2024, 33(6): 187-202
QI W W, MA H Y, LI Y X, et al. Progress in research on breeding methods to produce new, high-quality forage varieties[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(6): 187-202
- [44] DEVI P, ZHONG H, STICKLEN M B. *In vitro* morphogenesis of pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.]: efficient production of multiple shoots and inflorescences from shoot apices[J]. Plant Cell Reports, 2000, 19(6): 546-550
- [45] AROCKIASAMY S, RANI S S, IGNACIMUTHU S, et al. Efficient protocols for *in vitro* regeneration of *Pennisetum glaucum* (L.) Br. [J]. Indian Journal of Experimental Biology, 2006, 44: 757-761
- [46] 范欲航,许悦,祝诗词,等. 美洲狼尾草组织培养再生体系的建立[J]. 草地学报, 2023, 31(1): 89-95
FAN Y H, XU Y, ZHU S C, et al. Construction of tissue culture regeneration system of *Pennisetum glaucum* [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(1): 89-95
- [47] 刘逸玲,祝建波. 杂交狼尾草胚性愈伤组织的诱导与植株再生[J]. 植物生理学报, 2015, 51(1): 136-14
LIU Y L, ZHU J B. Embryonic callus induction and plant regeneration from *Pennisetum* hybrid [J]. Plant Physiology Journal, 2015, 51(1): 136-140
- [48] FALEIRO F G, KIM J Y, PARIKH A, et al. Generation of transgenic Napier grass (*Cenchrus purpureus* Schum.) plants by biolistic gene transfer of a minimal expression cassette[J]. Tropical Plant Biology, 2021, 14(4): 371-380
- [49] JHA P, SHASHI, RUSTAGI A, et al. Efficient *Agrobacterium*-mediated transformation of *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br. using shoot apices as explant source[J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC), 2011, 107(3): 501-512
- [50] RAMADEVI R, RAO K V, REDDY V D. *Agrobacterium tumefaciens*-mediated genetic transformation and production of stable transgenic pearl millet (*Pennisetum glaucum* [L.] R. Br.) [J]. In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant, 2014, 50(4): 392-400
- [51] GONDO T, UMAMI N, MUGUERZA M, et al. Plant regeneration from embryogenic callus derived from shoot apices and production of transgenic plants by particle inflow Gun in dwarf Napier grass (*Pennisetum purpureum* Schumach.) [J]. Plant Biotechnology, 2017, 34(3): 143-15
- [52] 牟彤,张晓莹,王金刚,等. 狼尾草农杆菌转化体系的优化和转基因植株的获得[J]. 作物杂志, 2013(1): 45-48, 158
MU T, ZHANG X Y, WANG J G, et al. The optimization of *Pennisetum agrobacterium*-mediated transformation system and obtaining of transgenic plants[J]. Crops, 2013(1): 45-48, 158
- [53] 王凭青,李志中,晁跃辉,等. 拟南芥转录因子 *CBF1* 基因杂交狼尾草的转化[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2007(10): 134-137
WANG P Q, LI Z Z, CHAO Y H, et al. Transformation of transcription activator *CBF1* gene of *Arabidopsis* into hybrid *Pennisetum* [J]. Journal of Chongqing University, 2007(10): 134-137
- [54] HU Y B, SUN M, LUO D, et al. Transcriptome profiling the response of elephant grass (*Cenchrus purpureus*) root to cold stress[J]. Grass Research, 2025, 5(1): e014
- [55] MAO C L, ZHANG J, ZHANG Y N, et al. Genome-wide analysis of the *WRKY* gene family and their response to low-temperature stress in elephant grass[J]. BMC Genomics, 2024, 25(1): 947
- [56] SUN M, YAN H D, ZHANG A L, et al. The transcriptional dynamic landscape map of pearl millet in response to abiotic stress provides new insights into the responses of plants to stress [J]. Tropical Plants, 2025, 4(1): e024
- [57] KHAN I, AWAN S A, RIZWAN M, et al. Physiological and transcriptome analyses demonstrate the silver nanoparticles mediated alleviation of salt stress in pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.) [J]. Environmental Pollution, 2023, 318: 120863
- [58] HAYAT K, ZHOU Y F, MENHAS S, et al. *Pennisetum giganteum*: an emerging salt accumulating/tolerant non-conventional crop for sustainable saline agriculture and simultaneous phytoremediation [J]. Environmental Pollution, 2020, 265: 114876
- [59] 张文龙,陈志伟,杨文鹏,等. 分子标记辅助选择技术及其在作物育种上的应用研究[J]. 种子, 2008, 27(4): 39-43
ZHANG W L, CHEN Z W, YANG W P, et al. Molecular marker assisted selection technology and its application to crop breeding[J]. Seed, 2008, 27(4): 39-43
- [60] BASHIR E M A, ALI A M, ALI A M, et al. Genetic diversity of Sudanese pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.)

- landraces as revealed by SSR markers, and relationship between genetic and agro-morphological diversity [J]. Genetic Resources and Crop Evolution, 2015, 62(4): 579-591
- [61] KANDEL R, SINGH H P, SINGH B P, et al. Assessment of genetic diversity in Napier grass (*Pennisetum purpureum* Schum.) using microsatellite, single-Nucleotide polymorphism and insertion-deletion markers from pearl millet (*Pennisetum glaucum* [L.] R. br.) [J]. Plant Molecular Biology Reporter, 2016, 34(1): 265-272
- [62] NEGAWO A T, JORGE A, HANSON J, et al. Molecular markers as a tool for germplasm acquisition to enhance the genetic diversity of a Napier grass (*Cenchrus purpureus* syn. *Pennisetum purpureum*) collection [J]. Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales, 2018, 6(2): 58-69
- [63] 朱丹丹, 王培丹, 林兴生, 等. 象草和巨菌草的核型分析[J]. 贵州农业科学, 2015, 43(5): 14-18
- ZHU D D, WANG P D, LIN X S, et al. Karyotype analysis of *Pennisetum purpureum* and *Pennisetum giganteum* [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2015, 43(5): 14-18
- [64] 邹冰灿, 王霞, 张轩, 等. 22份狼尾草属材料和1份芦竹属材料染色体数目及遗传多样性分析[J]. 草地学报, 2025, 33(4): 1019-1028
- ZOU B C, WANG X, ZHANG X, et al. Analysis of chromosome number and genetic diversity of 22 *Pennisetum* materials and 1 *Arundo* material [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(4): 1019-1028
- [65] VARSHNEY R K, SHI C C, THUDI M, et al. Pearl millet genome sequence provides a resource to improve agronomic traits in arid environments [J]. Nature Biotechnology, 2017, 35(10): 969-976
- [66] TENG K, GUO Q, LIU L Y, et al. Chromosome-level reference genome assembly provides insights into the evolution of *Pennisetum alopecuroides* [J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1195479
- [67] YAN Q, WU F, XU P, et al. The elephant grass (*Cenchrus purpureus*) genome provides insights into anthocyanidin accumulation and fast growth [J]. Molecular Ecology Resources, 2021, 21(2): 526-542
- [68] YAN H D, SUN M, ZHANG Z R, et al. Pangenomic analysis identifies structural variation associated with heat tolerance in pearl millet [J]. Nature Genetics, 2023, 55(3): 507-518
- [69] LÓPEZ Y, KURASHEV A, CHASE C, et al. Developing and validating microsatellite markers in elephant grass (*Pennisetum purpureum* S.) [J]. Euphytica, 2018, 214(10): 185
- [70] WANG C R, YAN H D, LI J, et al. Genome survey sequencing of purple elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schum. 'Zise') and identification of its SSR markers [J]. Molecular Breeding, 2018, 38(7): 94
- [71] MUKTAR M S, TESHOME A, HANSON J, et al. Genotyping by sequencing provides new insights into the diversity of Napier grass (*Cenchrus purpureus*) and reveals variation in genome-wide LD patterns between collections [J]. Scientific Reports, 2019, 9: 6936
- [72] 李青遥, 刘婷, 张曙恒, 等. 美洲狼尾草 Survey 测序及其 gSSR 分子标记的开发应用 [J]. 分子植物育种, 2019, 17(16): 5375-5382
- LI Q Y, LIU T, ZHANG S H, et al. Development and application of survey sequencing and gSSR molecular marker of *Pennisetum glaucum* [J]. Molecular Plant Breeding, 2019, 17(16): 5375-5382

(责任编辑 刘婷婷)