

# 西部旱区寒区草类植物种质资源研究现状与发展机制

师尚礼<sup>1,2,3</sup>

(1. 甘肃农业大学草业学院, 兰州 730070; 2. 草业生态系统教育部重点实验室, 兰州 730070;  
3. 干旱生境作物学国家重点实验室, 兰州 730070)

**摘要:** 黄土高原、青藏高原、蒙新高原的干旱寒冷气候孕育了丰富的草类植物种质资源, 形成了旱区寒区草类植物种质的天然资源库; 积极开发旱区寒区草类植物种质资源, 有利于提升种质创新与利用水平, 更好支撑西部地区的草种业发展。本文分析了国内外草类植物种质资源的收集保护、研究利用现状, 辨识了西部旱区寒区草类植物种质资源发展面临的主要问题; 在论述开发利用优势条件的基础上, 提出了西部旱区寒区草类植物种质资源开发利用的创新机制。研究建议, 尽快将草类植物种质资源优势转化为学科优势和产业优势, 驱动草类植物种质资源创新利用由认知层面转向行动层面, 引导草类植物种质资源开发利用由分散发展转向系统化集成, 构建草类植物种质资源创新发展的跟踪或超越机制。进一步提出了建设草类植物种质创新与利用科技园这一西部旱区寒区草类植物种质资源开发利用的务实举措, 以尽快建成“西部种业之都”、西部种业创新高地。

**关键词:** 西部旱区寒区; 草类植物; 种质资源; 创新利用; 种业

**中图分类号:** S548 **文献标识码:** A

## Research Status and Development Mechanism of Herbaceous Plant Germplasm Resources in Arid and Cold Regions of Western China

Shi Shangli<sup>1,2,3</sup>

(1. Pratacultural College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Grassland Ecosystem of Ministry of Education, Lanzhou 730070, China; 3. State Key Laboratory of Aridland Crop Science, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The drought and cold climate of the Loess Plateau, Qinghai-Tibet Plateau, and Inner Mongolia-Xinjiang Plateau has bred rich herbaceous plant germplasm resources, forming a herbaceous plant germplasm resource bank in arid and cold regions of Western China. Actively developing herbaceous plant germplasm resources in the arid and cold regions is conducive to improving the germplasm innovation and utilization level and better supporting the development of grass seed industry in Western China. This study analyzes the current situation regarding the collection, protection, research, and utilization of herbaceous plant germplasm resources in China and abroad, and identifies the major problems faced by the development of these resources in the arid and cold regions of Western China. Based on the advantages of the region, an innovative development mechanism for the herbaceous plant germplasm resources in the arid and cold regions of Western China is proposed. Specifically, the advantages of herbaceous plant germplasm resources should be transformed as disciplinary and industrial advantages the soonest possible, the innovation and utilization of

**收稿日期:** 2023-05-18; **修回日期:** 2023-06-20

**通讯作者:** 师尚礼, 甘肃农业大学草业学院教授, 研究方向为草类种质资源与育种; E-mail: shishl@gsau.edu.cn

**资助项目:** 中国工程院咨询项目“种质资源科技创新体系建设研究”(2021-DFZD-21)

**本刊网址:** www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

herbaceous plant germplasm resources should be promoted, the exploitation and utilization of herbaceous plant germplasm resources should be guided from decentralized development to systematic integration, and a mechanism for tracking and promoting herbaceous plant germplasm innovation should be established. Furthermore, the construction of a science and technology park for herbaceous plant germplasm innovation and utilization is proposed in order to build a seed industry capital and innovation highland of Western China.

**Keywords:** arid and cold regions of western China; herbaceous plant; germplasm resources; innovation and utilization; seed industry

### 一、前言

与以籽实体为主要收获物的农业相比,以茎叶营养体为主要收获物的草业特色鲜明,在“山水林田湖草沙”系统统筹治理,保障饲料粮安全、生态安全方面具有不可替代的作用。草地覆盖了地球40%的陆地面积,形成了陆地草原和海底草甸,发挥了多样性的价值,如稳定土壤、储存碳、产生氧气、提供动物栖息地、用作建筑材料、供给食物等。草地生物群系受地形变迁、气候变化、家畜放牧等长周期因素的影响,具有广泛的生物地理分布,进化出了抗旱耐寒、短生命周期、多年生芽、快速再生等功能。草原丰富的植物组成了规模庞大的种质资源库,为植物品种改良及培育提供了丰富的种质资源。也要注意,未来农业面临全球气候变暖、资源约束趋紧、粮食安全、耕地退化及水资源安全等挑战,迫切需要种业创新发展。我国草类植物种源研究起步较晚,种质资源收集、保存、发掘、利用迟于发达国家近200年,草类种子科技基础薄弱,牧草种子进口依赖度约为60%,草坪草种子进口依赖度超过90%<sup>[1]</sup>,发展水平明显偏低。因此,推动草类植物种质资源理论研究与技术创新,确保草种产业全链条协调发展势在必行。

黄土高原、青藏高原、蒙新高原的干旱寒冷气候孕育了丰富的草类植物种质资源,形成了旱区寒区草类植物种质天然资源库。河西走廊、天山冲积扇等区域地域宽广、日照充足、灌溉条件优越、适宜机械化作业,是草类植物种子生产、种业发展的良好区域。目前,西部地区在草类植物基因资源创新和利用方面进展良好,如甘肃河西走廊的玉米、苜蓿、燕麦制种业已具规模,初步形成了以河西走廊为核心的旱生寒生植物种业核心基地。为此,国家相关发展规划将海南省、四川省、甘肃省明确为国家级种业重点发展区,为建设“西部种业之都”、西部种业创新高地指明了方向<sup>[2]</sup>。

我国草类植物种质资源的功能基因发掘工作起

步较晚但发展迅速,相关机构在收集、保存、评价的基础上,较系统地开展了基因发掘工作。针对紫花苜蓿、燕麦等牧草,利用同源克隆方法,发掘与抗逆、品质、熟性等相关的基因资源超过100个。采用比较基因组学等方法,发掘优异抗性基因资源,建立了基因资源信息库;以分子遗传学为理论基础,搜集、整理、完善并建立了黄土高原和青藏高原区域的草类植物种质资源库;引进国内外优质、抗逆草类植物并对其性状进行综合评价,开展草类植物特异基因的分离、筛选和功能鉴定,构建了旱区寒区草类植物的重要基因文库。围绕苜蓿耐旱、耐寒、抗虫、稳产高产、高固氮、低自毒,燕麦耐寒耐旱、高光效等性状,利用表型组学方法对优异和特异种质资源开展苗期、成株期的形态学鉴定,获得了一批特异性的新种质。系统开展了寒旱叠加逆境、盐旱叠加逆境的抗性评价,筛选优异种质并建立优良种质资源库。评价并建立了苜蓿、燕麦等草类植物核心种质库。另外,气候资源、土地资源、种质资源、品种培育有机结合,初步构建了布局合理、资源与机制良性循环的创新体系,保障了草类植物种质和种业创新的“多快好省”发展,支持解决草业科技原始创新和种业发展的核心问题。

然而,我国西部地区草类植物种质创新与利用依然存在理念不够交融、资源整合不足、创新力度不强、成果应用不充分等系统性问题。为了推动西部旱区寒区草种业的高质量发展,可率先从旱区寒区草类植物逆境适应性等关键问题出发,应用转基因、分子标记辅助选择结合常规育种技术,挖掘或创制具有超强抗旱/抗寒/耐盐、高效生产、生态功能调控等基因的草类植物新种质。基于此,本文面向西部地区经济社会发展、草类植物种源技术发展的需要,围绕苜蓿、燕麦等重要草种,分析国内外草类植物种质资源的研究脉络、开发现状、存在差距、面临的问题,明确西部旱区寒区草类植物种质资源发展重点,为旱寒生境适应性品种培育、草种

产业发展研究提供基础参考。

## 二、草类植物种质资源收集保护、研究利用的国内外发展现状

### (一) 国外发展现状

草业发展的基础是草类植物种质资源。发达国家很早就启动了草类植物种质资源的收集保存、开发利用工作,收集资源全球分布广、类型丰富,保存份数多;以经济和生态价值较大的禾本科、豆科草类种质资源为主,辅以较多的苜蓿、燕麦起源中心材料以及其他珍贵材料,具有较好的资源完整性(见表1)。在近30年全球气候变化的背景下,以前收集保存的部分草类植物种质资源在当下成为珍稀、濒危甚至绝种的资源,潜在价值极高。

国外草类植物种质资源收集保护、研究利用的特点如下。① 广开基因资源挖掘渠道,强化资源在品种开发中的作用。在高生物量、高生物质能源草、天然草地植被恢复及改良方面进行了全面的资源探寻和深入的研究开发。② 建立规范的基因资源筛选评价标准、科学的新旧品种更替机制。系统性建立了基因资源鉴定评价、新品种培育、种子繁育等方面的规范性标准,在采取市场化机制进行草品种研发的基础上高效开展新品种创新与商业化;每年推出多个新品种,以新品种更替旧品种的方式驱动旧品种退出市场<sup>[3]</sup>。③ 常规育种、现代分子育种

技术集成应用,实现了品种培育技术更新换代,加速种质创新、种子繁育和育种进程,取得显著成效<sup>[4]</sup>。④ 平衡区域气候、土地、种子等要素,不断提高种子生产的质量和数量<sup>[5]</sup>。

### (二) 国内发展现状

草类植物种质资源是国家的战略性资源。我国草类植物种质资源保护利用工作起步较晚,需要加大投入以迎头赶上,否则面临较大的潜在损失和遗憾(见表1)。相关工作于1997年起步,建立起了国家级草类植物种质资源收集保护体系,收集保存的草类植物种质资源超过 $6.35 \times 10^4$ 份,但资源分布范围、遗传基础相对狭窄,遗失量较多<sup>[2]</sup>。在草类植物资源持续减少、需求不断增加且趋于多元化的背景下,以草类植物为基础的营养体农业可在保障粮食安全、改善营养结构、维持国计民生等方面发挥重要作用,能够承担缓解全球能源危机、维护生态安全、传承并弘扬传统文化等新任务。

当前,我国草类植物种质资源保护利用已从引种、野生栽培驯化的初级阶段发展到杂交选育、分子育种相结合的新阶段,创新利用方式呈现多样化特征。① 分子辅助种质创新成为热点,分子育种、分子设计育种正在草类植物品种培育中获得应用。② 转基因品种可改善生物原有性状或赋予新的优良性状,正在加速应用<sup>[6]</sup>。③ 在空间诱变方面利用快速发展的太空实验室条件来诱变草类植物种子,初

表1 部分国家和国际组织的草类植物种质资源收集保存情况

国家/国际组织	收集保存数量及主要资源		参考文献
	保存数量/ $\times 10^4$ 份	主要资源	
美国	4.62	豆科苜蓿属 8897 份、三叶草属 6213 份、野豌豆属 2639 份、百脉根属 1049 份、草木樨属 1009 份、禾本科羊茅属 2589 份、早熟禾属 2116 份、雀稗属 1442 份、黍属 670 份、狗牙根属 410 份	[11]
俄罗斯	2.9	苜蓿属 4200 份(含紫花苜蓿 3554 份)、三叶草属 5200 份、猫尾草属 1370 份、鸭茅属 1056 份、羊茅属 1879 份	[12]
中国	6.35	国内野生草类资源 127 科 879 属 4215 种(含禾本科 173 属 972 种、豆科 81 属 646 种、莎草科近 30 属 500 余种),国外 4093 份草类资源(21 科 123 属 306 种,来自 31 个国家)	[11,13]
新西兰	14	以三叶草和黑麦草为主	[14]
日本	1.2	—	[14]
澳大利亚	3.8	以三叶草和其他豆科牧草为主,紫花苜蓿 3874 份	[13]
国际家畜研究所	3	—	[14]
国际热带农业中心	2.3	—	[13]

步探讨草类植物种子的空间诱变遗传机理,推进了草类植物航天诱变育种、新品种培育等工作<sup>[7-9]</sup>。④ 乡土草类植物抗逆生物学研究、新种质创制等方面的成果较多,增强了对草类植物育种服务的支持力度;⑤ 基因编辑技术、快速从头驯化策略等为草类植物种质资源开发提供了理想的参考解决方案,在突破性草类植物品种创制方面具有重要意义<sup>[10]</sup>。

### 三、西部旱区寒区草类植物种质资源收集保护、研究利用的问题分析

西部地区多为干旱、寒冷或者旱寒叠加逆境环境。以甘肃省为例,地处西部农牧交错区,多样性的地理气候造就了丰富的草类植物种质资源,但在种质资源评价、表型鉴定、功能基因挖掘、原创性育种技术研发、重要新品种培育方面,落后于发达国家的主流水平,与国内主要作物领域相比也存在诸多不足。

#### (一) 对旱区寒区草类植物种质资源价值的认识不足

西部旱区寒区草类植物种质资源总量在全国居于领先地位,但种质资源保护体系不健全,原生境保护、资源库建设的系统性规划缺失。虽然具有抗逆、高产等特色 and 优异种质,但是资源本底不清;在全球气候变暖、生物种质资源多样性加速减少的背景下,亟待提高对西部地区多样性地理气候造就的旱区寒区草类植物种质资源的特殊性、稀缺性、珍贵性以及保护与开发利用价值的认识。例如,近40年来一直使用第一次全国草原资源普查数据(1979—1988年),而第二次、第三次普查数据没有公开应用。

梳理形成的问题主要有:① 种质资源全面普查、特异/优异资源重点筛选、表型精准鉴定、全基因组水平鉴定等,有待系统性加强<sup>[15]</sup>;② 日照时间长、昼夜温差大、干旱少雨的气候资源是草类植物育种和繁育的有利条件,而相应认识不足,导致野生近缘种、旱寒生境超适应种质的发掘和创新力度有待加强<sup>[16]</sup>;③ 基因编辑、单倍体诱导、全基因组选择等生物技术在种质创新中应用不充分,基因转化体系构建基础工作薄弱,不满足旱寒生境突破性新种质的开发需求<sup>[17]</sup>。

优异基因资源的挖掘及利用是种质创新和新品种培育的基础,随着主要作物基因组测序工作的逐步完成,草类植物种质资源鉴定的重要性进一步显现。草类植物种质资源作为战略性资源中逆境开发的特异性资源,将在未来国际竞争中面临更为激烈的争夺。“旱寒盐”胁迫环境超强适应、多年生、再生长、生物量形成与抗逆、高产、优质等的关联机制,高纬度区域积温与生殖生长的关联机制,自交不亲和种子产量与传粉授粉媒介关联机制等的系统性解析,是国内研究的短板环节。关键基因遗传调控网络构建,“旱寒盐”逆境胁迫下特异性状、复杂性状以及性状间的遗传调控互作关系等,也需尽快补齐短板。

#### (二) 草类植物基因挖掘与种质创新体系尚未建立

当前,连锁分析、关联分析、比较基因组学等基因挖掘新方法,高产、优质、抗逆、抗病虫、养分高效利用等重要性状分子调控机制的系统解析技术,野生植物快速驯化的理论与技术等逐渐成熟。但在西部地区,发掘新材料—挖掘功能基因—创制新种质的体系尚未建立。需要应用相关先进技术挖掘旱区寒区优异或特异草类植物种质功能基因,增强具有重大育种价值的基因挖掘力度与原始创新能力,建立种质资源基因鉴定、表型性状精准鉴定的质量控制技术体系,挖掘更多携带优异与特异基因资源的种质材料。开发功能型分子标记技术,定向改良或创制高产、优质、抗逆、养分高效利用的新种质,建立高通量基因型—表型数据库,创建种质资源管理与共享平台,全面提升种质创新水平<sup>[18]</sup>。

具体而言,有待开展的草类植物基因挖掘与种质创新工作有:多倍体构成、演化、表型,农艺性状多样性、重要功能基因时空表达特性等的基因组学解析;以蛋白质含量高、氨基酸均衡、矿物质丰富、维生素丰富为代表的品质性状的生物学基础;以抗病虫特殊性,盐、碱、旱、冷、寒等抗性特殊性为代表的遗传基础及形成机制;以全生育期生长发育模型为代表的高产生理以及全生育期数字化管理技术体系构建;产量性状的遗传学和生理学基础;以种子硬实度、色度与种子寿命等为代表的等种子高产生物学基础;以豆科植物共生固氮的物质、能量、信息运营为代表的遗传学和生理学基础;育性控制、单倍体创制、染色体加倍、无融合

生殖、抗除草剂等特异材料的创制效率增强。

### （三）育种新技术研发与新品种培育进展滞后

发达国家已经形成以转基因、全基因组选择、基因编辑技术为代表的现代分子育种技术体系，发展了智能设计育种技术。我国作物分子育种技术紧跟国际前沿，但草类植物育种技术严重滞后：草类植物关键性状形成的遗传机理与调控网络研究不系统，具有重要育种价值的关键基因缺乏；分子育种与分子设计育种应用仍处于探索阶段，基础研究与新品种创制研究脱节，育种大数据平台建设、信息化、系统开发与应用不足。我国草类植物新品种培育长期采用常规育种技术，新材料和新种质创新效率低、质量差，形成新品种周期长，目标性状特异性不够突出，遗传稳定性和个体一致性不佳，良种支撑产业发展的能力薄弱。截至2022年年底，我国仅审定了604个草类植物品种，多为抗逆不丰产品种，而适宜干旱、半干旱或者高寒、高纬度地区种植的丰产优质饲草品种缺乏。种子生产技术研发能力不强，质量认证、监管体系尚未建立，导致国产饲草种子世代不清、品种混杂、制种成本高，良种扩繁滞后、质量水平不高、供给总量不足；苜蓿、黑麦草等优质饲草种子长期依赖进口<sup>[19]</sup>。

我国西部地区的草学教育、科研院所育种技术研发及新品种培育工作起步并不晚，但受区域经济发展条件、人才质量限制而发展较慢，与技术创新制高点的发展目标相比差距较大。今后的草类植物种质创新与新品种培育，需充分利用现代新技术和新方法，强化多性状的模块化设计与协调改良，综合应用分子标记、转基因、全基因组选择、分子设计育种等技术，建立单一性状和复杂性状调控的高效育种技术体系；重在提高产量、改善品质、增强抗性，加速培育高产、优质、多抗、广适的草类植物新品种。

### （四）草类植物种质创新的资源要素聚合度不高

甘肃省作为西部地区重要的旱寒草类植物种质资源天然基因库，拥有草类植物资源优势研究力量，如中国科学院、中国农业科学院、教育部、国家民族事务委员会所属的驻甘科研院所、高校，省属科研、教育、技术推广等机构，省外部分育种单位（长期驻扎河西走廊进行种子繁育研究）。然而，相

关力量存在资源竞争而难以集中发力，导致种质创新人才聚合度不高，优势潜能挖掘不足，新育成品种基础种子生产环节薄弱，苜蓿等虫媒花草类植物种子繁育辅助授粉昆虫养殖及放飞回收技术缺失。

多年生豆科、禾本科等草类植物的种质创新技术管理要求高，而社会力量参与少、公益经费支持不足，新品种扩繁技术研发缓慢，良种产业化程度低，种子生产比较效益不明显。亟待建立良种繁育基地，完善支持机制，解决“有品种、无种子”的难题。创制突破性种质和品种，改善种子基因纯度和种性，提高种子产量和质量，相关任务艰巨。需要搭建覆盖“产学研”、各类机构联合的新型平台，构建从种质资源收集、鉴定、评价到功能基因挖掘再到新材料、新种质、新品种的创新链，提高草类植物种质资源原始创新能力和草种国产化水平<sup>[20]</sup>。

## 四、西部旱区寒区草类植物种质资源开发利用的优势条件

### （一）国家和地方种业发展政策保障

在建设海南省、四川省、甘肃省三大国家级种业重点发展区、国家级种子基地的背景下，位于西部地区的甘肃省制定了《甘肃省种业振兴行动实施方案》，规划建立河西走廊区、黄土高原区、高寒草原区草种制种基地以及饲草良种繁育保障体系。河西走廊具有土地平整、降雨少、灌溉条件好、光照足、温差大、野生传粉昆虫群落多、风能资源好等特点，与具有自交不亲和、异花授粉特性的紫花苜蓿等多年生草类植物种子的繁育需求条件契合，是适合草类植物新种质、新品种种子繁育的首选地。祁连山亚高山冷凉气候区适宜燕麦种子繁育，成为重要的燕麦制种基地。黄土高原区具备抗旱草种开发利用条件，正在培育形成抗旱草种制种基地。高寒草原区依托黄河源头生态治理保护与牧区生态畜牧业的发展，正在培育形成抗寒耐牧草种选育制种基地。

河西走廊是甘肃省草类植物种子生产的核心产区，主要分布在酒泉市、张掖市。酒泉市制定了《酒泉市现代种业振兴行动实施方案》《酒泉市农作物制种基地管理办法》《酒泉市种子企业信用评价管理办法（试行）》《酒泉制种环境保护及污染治理的暂行办法》，推动优质企业和优势基地整合，

布局核心技术攻关，实施种业产业升级，筑牢产业发展基础。张掖市制定了《关于加快现代农业高质量发展的意见》《加快现代种业高质量发展若干措施》，从投资经营、科技创新、人才服务、基地配置等方面提出了具体措施，以支持种业科技攻关和产业升级。

### （二）科技资源支撑条件良好

甘肃省作为西部地区草类植物种业繁育基地，基础条件得天独厚，多样性的地理气候造就了草类植物种质资源“博物馆”，丰富的草类植物资源繁育均可与多样性气候环境选择匹配。农牧业领域的驻甘机构和省属单位拥有较强的种业研究队伍且育种历史悠久，部分省外单位长期驻扎河西走廊进行种子繁育研究，共同确立了较好的发展基础。

西部地区草类植物种质资源研究与利用基础良好，在旱区寒区草类植物种质资源收集评价、乡土草逆境生物学研究，重要牧草、生态草特异性状遗传机制方面取得了良好进展，获得了一批有价值的种质资源及功能基因（见图1）。支撑育成了甘农系列、中苜系列、新牧系列、草原系列、中兰系列高产优质紫花苜蓿，陇燕系列、青海系列抗寒高产燕麦，甘农系列冬性小黑麦，兰箭系列箭筈豌豆，超强耐旱腾格里无芒隐子草（生态型）、持绿性草地早熟禾（生态型）等草类新品种；育成品种、地方品种、野生驯化品种、引进品种的选育工作并举，育成品种以苜蓿、燕麦等重要草类为主，性状多样性丰富且特异性突出。整体上，在常规育种与分子育种技术集成、种质资源创新、野生资源驯化理论及技术方面均取得重要进展，关注生物耦合共生并



图1 根茎型紫花苜蓿新种质（甘肃省天水市清水县发现）

提出了苜蓿与根瘤菌共生育种新技术以及专一性共生理论，创制了苜蓿种子内栖根瘤菌“可遗传性”新种质<sup>[21]</sup>。目前，农区草业的支柱型草种（苜蓿），高寒牧区草业的支柱型草种（燕麦、草地早熟禾、披碱草）以及良种良法配套技术，支撑形成了甘肃省草类植物种子核心产区以及创新试验网，涵盖资源圃、育种基地、综合试验站、授粉昆虫研究站、良种繁育试验站等。

## 五、西部旱区寒区草类植物种质资源开发利用的新机制

草类植物种质资源的收集保存与研究工作极为重要，建设不同层次的种质资源基因库是国际发展共识。扎实开展库存资源的编码保存、繁殖更新、室内与田间鉴定评价、筛选和分发研究这一基础性、长期性的工作，才能持续性、全方位支持草类植物种质创新和品种创新。我国在资源繁殖更新、室内与田间鉴定评价、筛选和分发研究方面开展的工作仍处于起步阶段，深挖未知的野生资源、库存资源以服务种源科技创新是一项长期任务。

西部种业虽有长足发展，但对照“打好种业翻身仗”的国家宏观目标仍有诸多短板和不足。面对我国饲草缺口为 $5 \times 10^7$  t/a，苜蓿种子约有60%依赖进口，草坪草种子约有90%依赖进口<sup>[19]</sup>，生态修复用草种多使用天然草原直接采集种子或进口种子，野生驯化或育成的适宜旱寒生境草品种和种子严重缺乏的现状，作为国家级种业重点发展区的西部地区，应研究构建草类植物种质资源开发利用的新机制，从而破解旱寒草类种业发展瓶颈，解决种质资源深度挖掘、突破性品种创制方面的困境<sup>[2]</sup>。

### （一）将草类植物种质资源优势转化为学科优势和产业优势

在广泛收集西部地区数量丰富且适应逆境的草类植物种质资源，通过国际交流引进饲用、生态价值高，特有、珍稀草类植物资源的基础上，开展抗旱、抗寒、抗病虫、耐盐碱等性状的鉴定与评价，挖掘相关功能基因，创制优异性状的草类植物新种质，扩充种质资源优异性状基因的数量<sup>[22-24]</sup>。旱区寒区丰富的乡土草在生产和环境建设中的潜力有待完全发挥，部分原因是乡土草的特殊价值缺少全

面认识,连续性支持的收集保存、交流引进、鉴定与评价工作有所不足。

西北旱区寒区处于苜蓿起源、裸燕麦起源、青藏高原草类植物区系地理区,具有系统性收集、鉴定、评价种质资源的客观条件和区位优势。为了将草类植物资源优势转化为学科优势和产业优势,需系统性开展种质资源的深度挖掘和精准鉴定,强化种质资源与遗传育种研究的密切协作,批量获得优异资源并进行改良创新(见图2),从而将种质资源转变为可利用的亲本材料,保障突破性新品种培育需求。此外,遗传基础狭窄是苜蓿、燕麦、草地早熟禾等草种育种难以突破的普遍性问题,对建立有效的持续支持机制、加强自主知识产权新品种的创制力度提出了较高要求<sup>[10]</sup>。

## (二) 驱动草类植物种质资源创新利用由认知层面转向行动层面

我国退化草原多分布于干旱、盐碱、高海拔区,开展旱区寒区草类植物资源研究成为一项艰苦且艰巨的任务。地球气候变暖的趋势增加了稀有、濒危草类植物种质资源的消失风险。近40年草原资源变化的本底不清,旱区寒区草类植物种质资源的收集、保存、利用缺乏系统性和持续性,加之种质资源名录不够完整、重要或特异基因信息掌握不充分,导致种质创新和利用过程中问题导向性不强,性状定位精准性不足。“打好种业翻身仗”重在草类植物种质资源的全面掌握与深入研究,但相关工作刚进入认知层面,生物学、生理学、遗传学等的交叉性研究尚未纳入发展规划。

西部地区种业振兴是新发展阶段的重要任务,也需贯彻新发展理念,构筑新发展格局。一方面,



图2 创制的旱作密植高产饲用燕麦新种质

旱区寒区草类植物的种质创新与利用研究,与土地(耕地)、资金、人力资源、政策等生产要素密切相关,而有关支持亟待明确;另一方面,草种业应融入农业全产业链,完善要素配置、形成系统工程是应有之义。亟待启动草地资源普查、种质资源系统性收集与持续性鉴定/评价、种质资源名录编制等基础性工作,以尽快由认知层面转向行动层面。创建以稀有和濒危草类种质资源保护、优异与特异资源开发、骨干亲本遗传构成揭示为“标杆”的精准鉴定新技术,支持种质资源保护与育种两方面的密切协作及高效利用,促进旱区寒区草类种质资源创新及利用的加速发展<sup>[20]</sup>。

## (三) 引导草类植物种质资源开发利用由分散发展转向系统化集成

草类植物种质资源开发利用是保障草种业稳定发展、粮食安全、生态安全的关键因素之一。然而,多年来草类植物种质资源开发利用、草种业发展存在各自为战、割裂运行的现象,未能集聚形成产业发展的强大动能;科研成果转化为草种业优势的体系、机制不完备,草类植物种质资源开发与种业人才优势潜能挖掘不足。创制新种质、新品种的常规选育与分子育种技术的集成应用力度不够,从资源收集、鉴定评价、功能基因挖掘到新材料、新种质的创新链没有形成,加之原始创新能力不足、优良种质储存数量不够,导致新品种创制发展乏力、育种速度慢、品种性状不突出。在草品种审定完成后,良种繁育体系尚未建立,种子认证缺失,不易获得市场认可,形成了国产品种“有品种、无种子”的不利局面。草类植物种质资源创新、良种生产需要地力良好的耕地,异化授粉草类植物需要适当的隔离距离、必要的授粉昆虫及放养设施。通过国家级平台建设和机制创新引导,才能实质性解决上述问题<sup>[25]</sup>。

发达国家建立了以转基因、全基因组选择、基因编辑技术为代表的现代植物分子育种技术体系,发展了精准智能设计育种技术。我国作物分子育种技术紧跟国际前沿,今后在草类植物种质创新研究方面也需积极利用新技术、新方法并与常规育种技术相结合,强化多性状的协调改良,创新并集成分子标记、转基因、全基因组选择、分子设计育种等技术,尽快建成种质创新体系、遗传转化体系、育

种技术体系；以提高产量、改善品质、增强抗性为重点，创制优质、高产、高效、多抗的突破性新种质。

### （四）构建草类植物种质创新发展的跟踪或超越机制

基因编辑技术的创新运用、生物学特性的深度研究具有革命性，通过人工设计进行知识驱动的分 子设计育种时代已经到来；精确地修改植物性状，创造新性状甚至新植物种，才能更好满足发展需求并形成新农业模式。以往研究集中在筛选基因、挖掘基因、基因编码区编辑，以期获得功能基因以及突变或碱基替换，对少数单基因控制性状进行改良<sup>[26]</sup>。然而，前沿研究是针对产量、品质、抗逆、养分利用等多基因控制的复杂性状，通过分子模块化设计育种，对控制复杂性状的主效基因或多基因网络进行遗传操作，可有效改良或加强植物的经济性状<sup>[27]</sup>。基于品种分子设计与快速驯化新技术，在收集并筛选优异野生资源，开展重要农艺性状基因注释、多基因编辑及聚合的基础上，建立野生植物快速驯化技术体系并用于新材料、新种质创制，可开辟野生植物驯化新道路，培育产量更高、环境适应性更强的新品种。需要将野生资源基因挖掘、新种质创新、新品种分子设计育种与快速驯化的前沿理论和技术应用于草类植物种质创新，相应研究队伍建设迫在眉睫，可在加强国内外交流和学习的基础上，建立跟踪或超越机制，走自主创新的发展道路。

## 六、西部旱区寒区草类植物种质资源开发利用的务实举措——建设国家旱生寒生草类植物种质创新与利用科技园

在西部地区建设国家旱生寒生草类植物种质创新与利用科技园，将之作为现代种质创新与品种创新示范、现代种质创新技术与优势资源融合集成、优势特色种业发展的载体，从而构建平台、资源、机制良性循环的种质资源开发与品种创新体系，支撑形成“西部种业之都”、西部种业创新高地。科技园下设“三中心、一平台、一示范园”：干旱寒冷生境草类植物种质资源鉴定与评价、种质创新、品种选育繁育3个功能中心，草类植物种质资源数

字化与信息化战略平台，草类生物育种科技示范园。立足科技园公共平台，注重机制创新、汇聚能力资源、贯穿种业价值链，探索一条西部种源科技创新发展示范之路。

### （一）干旱寒冷生境草类植物种质资源鉴定与评价中心

主要功能是长期进行干旱寒冷生境草类植物种质资源的系统性收集保存、鉴定评价、描述规范、归类整理名录等基础性工作。①建立干旱寒冷生境草类植物种质资源库。在草类资源本底普查的基础上，收集和交换引进优异或特异种质资源，建立田间资源保存圃，编制资源名录。构建本国资源收集、国际资源交流引进体系，形成长效机制。②建立草类植物种质资源田间鉴定评价圃、特异性状控制评价圃，进行覆盖室内、田间的系统性鉴定与评价。释放干旱寒冷生境野生资源、地方资源、引进资源、人工创造资源的生物学和植物学性状信息特征，建立草类植物种质资源系统性鉴定与评价的长效机制。③开展种质资源归类，编制描述规范，整理各类名录。

### （二）干旱寒冷生境草类植物种质创新中心

主要功能是策划干旱寒冷生境草种质创新的方向、目标和思路，论证种质创新方面的科技专项及攻关策略，发掘并创制新材料、新种质、关键功能基因。①调查、筛选、发掘干旱寒冷生境野生或特异新材料，通过驯化、杂交、分子设计操作等方式创制新材料<sup>[28-31]</sup>。②创制干旱寒冷生境苜蓿、燕麦、草地早熟禾等重要草类的特异和优异种质，发掘特异与优异种质主要性状调控的关键基因，解析目标性状形成的机理机制、复杂性状调控的分子模块设计。在干旱寒冷生境野生草类基因挖掘方面，注重进化历程解码、特异性状调控基因开发利用研究，将优异种质创新目标调整为知识驱动精准化分子设计，支持干旱寒冷生境高产、优质、抗逆的草类新种质创制<sup>[32,33]</sup>。③在干旱寒冷生境草种品质性状形成与调控机理方面，重点研究干旱寒冷生境草类品质与营养物质形成基础及调控、品质形成的级联调控机制及调控网络，激素信号转导与品质形成的交互调控机制，干旱寒冷生境草类品质形成与环境耦合的信号途径及调控机制，筑牢干旱寒冷生境



草类产品品质调控与营养成分改良的理论和技術基础<sup>[34]</sup>。

### (三) 干旱寒冷生境草品种选育繁育中心

主要功能是设计亲本或亲本组合、创新选育技术、创造新品种，加速种子繁育进程，破解品种少、性状弱、缺种子的不利局面。① 确定朝着重要或特殊利用方向延伸定位的草品种性状目标，设计亲本资源和育种技术路线，突出抗旱、抗寒、耐盐碱、高产等优质性能的新品种培育。② 开展干旱寒冷生境草类多年生、再生长、营养体生物量积累与遗传的育种技术集成创新，突破新品种目标性状遗传发育及性状释放表达、基因型纯化、精准选择培育等技术<sup>[35]</sup>。③ 建立亲本圃、杂交圃、选育圃、品种比较圃等方面的选育基地、加代繁育基地，提高选育效率，加快新品种培育。④ 建立干旱寒冷生境集约化的三级良种（原原种、原种、商品种）繁育制种基地，确保新品种的优良种性，加快良种繁育进度。

### (四) 草类植物种质资源数字化与信息化战略平台

主要功能是提高草类植物种质资源信息共享、信息采集、种质创新利用等方面的效率。利用国家基因库生命大数据平台、农业数字化服务平台植物科学数据库，开展种质资源收集、鉴定、评价并编制草类植物种质资源名录，建立草类植物种质资源共享与利用信息系统（平台），支持种质资源—脱氧核糖核酸（DNA）样本—基因数据—分子育种—分子设计育种的全链条研究<sup>[3]</sup>。

建立数字化服务平台，为科技研发企业和机构提供数字化测序、DNA 备份库建设、育种生物信息分析、“种质资源—DNA 样本—基因数据”建库等服务，增强植物遗传资源的智慧育种能力，促进植物遗传资源在草业、农业上的研究与应用水平。鼓励草种质资源的收集、保存、编目、入库研究，尽快建成标准化的种子实物繁殖保存数据库、信息共享系统，支持区域资源优势的发挥和运用。此外，与国家基因库农业数字化服务平台进行合作，建立农业数字化服务平台上的植物科学数据库、草类植物种质基因资源数据库，丰富野生近缘种的基因数据和种质信息，保障草类植物育种的质量和速度。

### (五) 草类植物生物育种科技示范园

主要功能是面向草类植物转基因、分子设计创制的新种质、新品种，太空搭载诱变并结合生物育种形成的技术成果，开展展示和科普<sup>[36]</sup>。① 随着转基因作物的逐步推广应用，饲草饲料转基因品种的种植应用也成为重要趋势，草类植物生物育种和应用迎来了发展机遇期；发掘并应用草类关键功能基因、发挥生物育种技术优势，是草类植物种质创新以及种业突破的重要方向。建立草类植物生物育种科技示范园，更好支持转基因草类植物、分子设计育成品种的技术普及与示范应用。② 我国形成了近地轨道持续驻留的太空实验室能力，可利用太空搭载诱变优势并与生物育种技术相结合，提高苜蓿、燕麦等重要草类植物的种质创新效率。建立草类植物生物育种科技示范园，加快解决草类植物种质创新和利用方面的前沿科学问题和成果转化难题，进行相应技术产品的高质量示范。

## 七、结语

面向新发展形势，本文凝练西部干旱寒冷生境草类植物种业发展需求、“山水林田湖草沙”系统统筹治理需要，提出了西部旱区寒区草类植物种质创新利用发展的新机制和务实举措。相关内容有利于强化草类植物种质资源的前沿理论和技术集成应用，也有助于西部地区草类植物资源优势尽快转化为学科优势和产业优势。

着眼未来发展，应立足西部地区草类植物种质资源富集的优势和特色，加强科研集智攻关，开展种质资源的精准鉴定、优异基因的挖掘与种质创新，释放逆境草类种质资源的科学利用价值、产业开发价值、社会文化价值，为建设“西部种业之都”、西部种业创新高地，加快我国现代种业发展奠定坚实基础。

#### 利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

**Received date:** May 18, 2023; **Revised date:** June 20, 2023

**Corresponding author:** Shi Shangli is a professor from the Pratacultural College, Gansu Agricultural University. His major research field is grass germplasm resources and breeding. E-mail: shishl@gsau.edu.cn

**Funding project:** Chinese Academy of Engineering project “Research on the Construction of Germplasm Resources Science and Technology Innovation System” (2021-DFZD-21)

## 参考文献

- [1] 李秀香. 我国草资源利用与草产业发展问题研究 [J]. 企业经济, 2020, 39(9): 5–13.  
Li X X. Research on the use of grass resources and the development of grass industry in China [J]. Enterprise Economy, 2020, 39(9): 5–13.
- [2] 杨青川, 孙彦. 中国苜蓿育种的历史、现状与发展趋势 [J]. 中国草地学报, 2011, 33(6): 95–101.  
Yang Q C, Sun Y. The history, current situation and development of alfalfa breeding in China [J]. Chinese Journal of Grassland, 2011, 33(6): 95–101.
- [3] 李志勇, 王宗礼, 师文贵. 牧草种质资源描述规范和数据标准 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.  
Li Z Y, Wang Z L, Shi W G. Description specification and data standard of grass germplasm resources [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2005.
- [4] 王惠知, 毛丽萍, 王雨涵, 等. 基于最适取样策略的老芒麦种质指纹图谱构建及遗传多样性分析 [J]. 中国草地学报, 2021, 43(1): 1–7.  
Wang H Z, Mao L P, Wang Y H, et al. DNA fingerprint construction based on the optimal sampling strategy and genetic diversity analysis of *Elymus sibiricus* germplasm [J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(1): 1–7.
- [5] 谢华玲, 杨艳萍, 董瑜, 等. 苜蓿国际发展态势分析 [J]. 植物学报, 2021, 56(6): 740–750.  
Xie H L, Yang Y P, Dong Y, et al. Analysis on international development trend of alfalfa [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2021, 56(6): 740–750.
- [6] 燕丽萍, 夏阳, 梁慧敏, 等. 转BADH基因苜蓿T1代遗传稳定性和抗盐性研究 [J]. 草业学报, 2009, 18(6): 65–71.  
Yan L P, Xia Y, Liang H M, et al. A study on salt tolerance and the genetic stability of T1 generation transgenic alfalfa with the BADH gene [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18(6): 65–71.
- [7] 徐云远, 贾敬芬, 牛炳韬. 空间条件对3种豆科牧草的影响 [J]. 空间科学学报, 1996 (S1): 136–141.  
Xu Y Y, Jia J F, Niu B T. The influences of space conditions on three legume forages [J]. Chinese Journal of Space Science, 1996 (S1): 136–141.
- [8] 韩蕾, 孙振元, 钱永强, 等. “神舟”三号飞船搭载对草地早熟禾生物学特性的影响 [J]. 草业科学, 2004, 21(5): 17–19.  
Han L, Sun Z Y, Qian Y Q, et al. Changes in biological characteristics of *Poa pratensis* carried by Shenzhou-3 spaceship [J]. Pratacultural Science, 2004, 21(5): 17–19.
- [9] 严欢, 张新全. 2种牧草种子空间诱变效应研究 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36(2): 486–487.  
Yan H, Zhang X Q. Study on the space mutagenic effect of two herbage seeds [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(2): 486–487.
- [10] 南志标, 王彦荣, 傅华, 等. 乡土草抗逆生物学 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.  
Nan Z B, Wang Y R, Fu H, et al. Resistance biology of native grass [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [11] 陈志宏, 李新一, 洪军. 我国草种质资源的保护现状、存在问题及建议 [J]. 草业科学, 2018, 35(1): 186–191.  
Chen H J, Li Y X, Hong J. Current situation, problems, and suggestions for forage germplasm resources conservation in China [J]. Pratacultural Science, 2018, 35(1): 186–191.
- [12] Loskutov I G. Vavilov Institute (VIR): Historical aspects of international cooperation for plant genetic resources [J]. Genetic Resources and Crop Evolution, 2020, 67: 2237–2253.
- [13] 林克剑, 刘志鹏, 罗栋, 等. 饲草种质资源研究现状、存在问题与发展建议 [J]. 植物学报, 2023, 58(2): 241–247.  
Li K J, Liu Z P, Luo D, et al. The current status, problems and suggestions for the research on forage germplasm resources [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2023, 58(2): 241–247.
- [14] 李晨. 打造一个现代化的国家牧草种质库 [N]. 中国科学报, 2021-12-14 (03).  
Li C. Build a modern national forage germplasm bank [N]. China Science Daily, 2021-12-14 (03).
- [15] Kamal N, Renhuldt N T, Bentzer J, et al. The mosaic oat genome gives insights into a uniquely healthy cereal crop [J]. Nature, 2022, 606(7912): 113–119.
- [16] Zhang J Y, Broeckling C D, Blancaflor E B, et al. Overexpression of WXP1, a putative *Medicago truncatula* AP2 domain-containing transcription factor gene, increase cuticular wax accumulate on and enhances drought tolerance in transgenic alfalfa (*Medicago sativa*) [J]. The Plant Journal, 2005, 42(5): 689–707.
- [17] 曹一化, 刘旭. 国家自然科技资源平台植物种质资源共性描述规范 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.  
Cao Y H, Liu X. Common description specification for plant germplasm resources of national natural science and technology resources platform [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2005.
- [18] 苏东, 于林清, 周延林, 等. 四倍体苜蓿家系的建立及遗传变异分析 [J]. 草地学报, 2011, 19(4): 657–662.  
Su D, Yu L Q, Zhou Y L, et al. Establishment of a tetraploid alfalfa family and analysis of its genetic variability [J]. Acta Agraria Sinica, 2011, 19(4): 657–662.
- [19] 中华人民共和国农业农村部. 十四五全国饲草产业发展规划 [EB/OL]. (2022-02-16)[2023-06-19]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/01/content\\_5676205.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/01/content_5676205.htm).  
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. The 14th Five-Year national forage industry development plan [EB/OL]. (2022-02-16)[2023-06-19]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/01/content\\_5676205.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/01/content_5676205.htm).
- [20] 刘志鹏, 周强, 刘文献, 等. 中国牧草育种中的若干科学问题 [J]. 草业学报, 2021, 30(12): 184–193.  
Liu Z P, Zhou Q, Liu W X, et al. Some scientific issues of forage breeding in China [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(12): 184–193.
- [21] 康文娟, 刘畅, 师尚礼. 苜蓿与根瘤菌专一性共生及可遗传性共生体选育 [J]. 草原与草坪, 2022, 42(5): 1–7.  
Kang W J, Liu C, Shi S L. Specific symbiosis and breeding of heritable symbionts between alfalfa and rhizobia [J]. Grassland and Turf, 2022, 42(5): 1–7.
- [22] Cunningham S M, Nadeau P, Castonguay Y, et al. Raffinose and stachyose accumulation, galactinol synthase expression, and winter injury of contrasting alfalfa germplasm [J]. Crop Science,

- 2003, 43(2): 562–570.
- [23] Harrison S J, Curtis M D, McIntyre C, et al. Differential expression of peroxidase isogenes during the early stages of infection of the tropical forage legume *Stylosanthes humilis* by *Colletotrichum gloeosporioides* [J]. *Molecular Plant-microbe Interactions: MPMI*, 1995, 8(3): 398–406.
- [24] Liu Z H, Zhang H M, Li G L, et al. Enhancement of salt tolerance in alfalfa transformed with the gene encoding for betaine aldehyde dehydrogenase [J]. *Euphytica*, 2011, 178: 363–372.
- [25] 杨青川, 康俊梅, 张铁军, 等. 苜蓿种质资源的分布、育种与利用 [J]. *科学通报*, 2016, 61(2): 261–270.  
Yang Q C, Kang J M, Zhang T J, et al. Distribution, breeding and utilization of alfalfa germplasm resources [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(2): 261–270.
- [26] 蒋倩倩. 多年生黑麦草 *LpCKX1* 基因 CRISPR/Cas9 靶向编辑载体的构建及遗传转化体系的建立 [D]. 烟台: 烟台大学 (硕士学位论文), 2020.  
Jiang Q Q. Construction of CRISPR/Cas9 targeted editing vectors for *LpCKX1* gene and the establishment of genetic transformation system in *Lolium perenne* [D]. Yantai: Yantai University (Master's thesis), 2020.
- [27] 王志锋, 徐安凯, 周艳春, 等. 34 份苜蓿品种产草量和品质动态研究 [J]. *吉林农业科学*, 2006, 31(6): 48–50.  
Wang Z F, Xu A K, Zhou Y C, et al. Study on grass yield and quality dynamics of 34 alfalfa varieties [J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2006, 31(6): 48–50.
- [28] 易自力, 陈智勇, 蒋建雄, 等. 多年生黑麦草遗传转化体系的建立及其转化植株的获得 [J]. *草业学报*, 2006, 15(4): 99–103.  
Yi Z L, Chen Z Y, Jiang J X, et al. Establishment of a transformation system and acquisition of transgenic plants for *Lolium perenne* [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2006, 15(4): 99–103.
- [29] 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.  
Mou T, Zhang X Y, Wang J G, et al. The optimization of pennis-
- etum *agrobacterium*-mediated transformation system and obtaining of transgenic plants [J]. *Crops*, 2013 (1): 45–48.
- [30] 于林清, 刘荣霞, 苏东, 等. 利用 SSR 和 EST-SSR 技术研究不同秋眠级苜蓿遗传多样性 [J]. *中国草地学报*, 2009, 31(6): 52–58.  
Yu L Q, Liu R X, Su D, et al. Genetic diversity of fall dormancy alfalfa based on SSR and EST-SSR [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2009, 31(6): 52–58.
- [31] 王树彦, 云锦凤, 徐军, 等. 加拿大披碱草与老芒麦及其杂种的生长规律和形态特性 [J]. *草地学报*, 2004, 12(4): 294–297.  
Wang S Y, Yun J F, Xu J, et al. Growth and morphology characters of *Elymus canadensis*, *Elymus sibiricus* and their hybrids [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2004, 12(4): 294–297.
- [32] 赵桂琴. 早熟禾的人工杂交及杂种优势预测研究 [J]. *草业学报*, 2002, 11(1): 51–55.  
Zhao G Q. Studies on artificial emasculation and heterosis forecast in *Poa* [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2002, 11(1): 51–55.
- [33] Liu H, Zwer P, Wang H B, et al. A fast generation cycling system for oat and triticale breeding [J]. *Plant Breeding*, 2016, 135(5): 574–579.
- [34] 张荟荟, 梁维维, 张学洲, 等. 新疆野生老芒麦种质资源形态及生长特性分析 [J]. *草地学报*, 2021, 29(4): 701–708.  
Zhang H H, Liang W W, Zhang X Z, et al. Analysis on morphology and growth characteristics of wild *Elymus sibiricus* L. germplasm resources in Xinjiang [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(4): 701–708.
- [35] 刘艳芝, 韦正乙, 邢少辰, 等. HAL1 基因转化苜蓿再生植株及其耐盐性 [J]. *吉林农业科学*, 2008, 33(6): 21–24.  
Liu Y Z, Wei Z Y, Xing S C, et al. Transgenic alfalfa with HAL1 gene and its salt tolerance [J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2008, 33(6): 21–24.
- [36] 任卫波, 韩建国, 张蕴微. 几种牧草种子空间诱变效应研究 [J]. *草业科学*, 2006, 23(3): 72–76.  
Ren W B, Han J G, Zhang Y W. A study of the effect of space mutagenesis of grass seeds [J]. *Pratacultural Science*, 2006, 23(3): 72–76.