doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.001

饲草生产与加工机械化技术研究现状与展望

王德成[1]　李思标[1]　尤　泳[1]　惠云婷[1]　马朋勃[1]　席军辉[1]
闫崔强[1]　周小艺[1]　胡云晟[1]　王振华[2]
(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083)

摘要: 饲草产业是破解农业结构性矛盾、构建“粮经饲统筹、农牧结合”产业格局的关键支点,其生产与加工机械化水平的提升,是保障畜产品稳定供给、筑牢粮食安全屏障的重要战略举措。本文围绕饲草生产与加工机械化技术,从饲草生产全程机械化的内涵与技术路线出发,系统梳理饲草作物种子生产、草原/草地饲草复壮促生、饲草刈割收获、饲草加工利用共四大板块的技术研究与装备发展现状。重点关注相关技术与装备在国家战略需求、农艺匹配要求、关键技术创新、核心零部件突破、智能装备应用等方面的现状及未来发展趋势。相较于“智能集成—生态协同—全链适配”的国际先进水平,我国饲草生产与加工机械化技术仍面临全程机械化装备发展不平衡及不充分、核心技术及部件高度依赖进口、场景化装备适配性不足、多学科融合深度不够等核心挑战。未来,需加快补齐饲草种子采收机、丘陵山地饲草装备、移动式加工机组等断点,突破打结器、精密排种器、切碎刀具等“卡脖子”部件,针对天然草原、规模化农田等场景推动分场景智能化,通过农艺-生态-数字多学科交叉,融合先进技术实现核心技术自主创新和装备智能化提升。全面提升智能草业装备适配性与效能,推动智慧草业持续发展,为“大农业观,大食物观”与农业现代化提供坚实支撑。

关键词: 饲草; 种子; 刈割压扁; 草地修复; 智能装备
中图分类号: S-1; S22　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)11-0001-20　　**OSID**:

Review and Prospect of Full-process Mechanization Technology in Forage Production and Processing

WANG Decheng[1]　LI Sibiao[1]　YOU Yong[1]　HUI Yunting[1]　MA Pengbo[1]　XI Junhui[1]
YAN Cuiqiang[1]　ZHOU Xiaoyi[1]　HU Yunsheng[1]　WANG Zhenhua[2]
(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co.*, *Ltd.*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The forage industry serves as a key pivot point for resolving structural contradictions in agriculture and constructing an industrial pattern of “coordinated development of grain, cash crops and forage, and integration of agriculture and animal husbandry”. Enhancing mechanization level in forage production and processing constitutes a strategic initiative to ensure stable livestock product supply and strengthen food security barrier. Focusing on mechanization technologies for forage production and processing, starting from the connotation and technical route of full-process mechanization in forage production, it systematically sorted out the current status of technical research and equipment development in four major areas—forage seed production, grassland/meadow forage rejuvenation and promoting-growth, forage cutting and harvesting, and forage processing and utilization. It paid special attention to the current situation and future development trends of relevant technologies and equipment in terms of national strategic needs, matching agronomic requirements, key technological innovations, breakthroughs in core components, application of intelligent equipment and so on. Compared with the advanced international standards characterized by “intelligent integration—ecological coordination—full-chain adaptation”, there were still core challenges on mechanization technologies for forage production

收稿日期: 2025-08-30　修回日期: 2025-09-10
基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001903)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS34)
作者简介: 王德成(1965—),男,教授,博士,主要从事饲草生产机械化技术与装备研究,E-mail: wdc@cau.edu.cn
通信作者: 王振华(1975—),男,正高级工程师,博士,主要从事畜牧及饲草料工程技术装备研究,E-mail: wzhh2008@yeah.net

and processing in China, including unbalanced and inadequate development of full-process mechanization equipment, high dependence on imports for core technologies and components, insufficient adaptability of scene equipment lacking in the depth of multidisciplinary integration and so on. In the future, it is imperative to accelerate efforts to address gaps in forage seed harvesters, forage equipment for hilly areas, and movable processing units, while overcoming bottlenecks in critical components such as knotters, precision seed metering devices, and cutting blades. Scene-specific intelligence should be promoted for natural grasslands and large-scale farmlands among other contexts. Through multidisciplinary integration of agronomy, ecology, and digital technologies, advanced technologies were merged to achieve independent innovations in core technologies and improve intelligence of equipment, the adaptability and efficiency of intelligent grass equipment can be enhanced, thereby driving the sustainable development of smart forage grass industry, solid support can be provided for "comprehensive agricultural outlook and all-encompassing approach to food" and agricultural modernization.

Key words: forage; seed; cutting and flattening; grassland restoration; intelligent equipment

0 引言

从大农业观与大食物观出发,饲草产业是破解农业结构性矛盾、构建"粮经饲统筹、农牧结合"产业格局的关键支点,其发展水平直接关乎国家食物供给体系的韧性与农业产业链的协同效能。在我国农业主要矛盾呈现阶段性供过于求与供给不足并存[1]的背景下,饲草作为连接种植业与养殖业的核心纽带,其生产与加工机械化水平的提升,是推动种养加一体、一二三产业融合的重要引擎,更是保障草食畜产品稳定供给、筑牢粮食安全屏障的战略举措。

2016 年《全国种植业结构调整规划(2016—2020)》首次使用"饲草作物"这一名词并将饲草作物纳入种植业结构调整统筹考量,明确提出推进饲草生产与畜牧养殖协调发展,标志着饲草产业在大农业体系中的战略地位得到系统性确立。2022 年《"十四五"全国饲草产业发展规划》的发布,进一步指出"国内饲草机械设备关键技术研发不足,产品可靠性、适应性和配套性差"等突出问题,并提出"到 2025 年饲料(草)生产与加工机械化率达 65%以上"的量化目标,为产业机械化升级、智能化发展提供了政策指引。

当前,饲草机械化发展呈现政策指引与市场导向的双向发力态势。尽管《全国农业机械化统计年报》暂未覆盖饲草作物种子生产、建植播种等全环节统计,但 2018—2022 年饲草料收获与加工机械拥有量的稳步增长,以及中国农业机械流通协会报告中打捆机、青饲料收获机等专题的重点呈现[2],均印证了饲草机械装备在产业实践与市场格局中的重要地位。这种发展态势既反映了饲草产业在农业现代化进程中地位的提升,也凸显了补齐机械化全链条短板、突破技术瓶颈的迫切性。

系统总结饲草生产与加工机械化技术,可推动生产向规模化、标准化转型以提升供给能力,破解全链条技术瓶颈并加速成果转化,助力核心装备国产化升级与关键部件自主研发,为区域差异化配置方案提供依据以补齐推广短板,引导科研资源向前沿领域集聚以构建自主创新体系,强化饲草产业在大农业格局中的基础作用。

1 饲草生产全程机械化内涵与技术路线图

饲草生产全程机械化是指:以饲草作物的生物学特性及机械化生产需求为基础,在产前、产中、产后各环节全部使用机械装备完成作业,并通过技术集成与标准化管理实现高效、低损、绿色生产的过程。

1.1 饲草生产全程机械化内涵

结合饲草生产全程机械化的定义和饲草作物在国家农业生产中的重要定位,饲草生产全程机械化应具备以下内涵:

(1)贯穿饲草生产的全环节。饲草生产全程机械化的环节覆盖贯穿"产前-产中-产后"全链条,体现为"无死角"的机械作业渗透。产前通过种子处理设备、耕整地机等完成种子优化处理与土地整理;产中依托播种机、植保机、收获机等实现精准种植、科学管护及适时刈割;产后借助打捆机、青贮设备、草产品加工设备等完成加工、储存与运输。各环节机械作业紧密衔接,适配饲草作物生长特性与营养保全需求,消除传统生产中的人工断点,形成完整高效的机械化生产链条。

(2)与生产农艺、模式、规模相协同。针对饲草作物的多样性(如苜蓿再生性、青贮玉米时效性)和种植模式的多样性(如单播、混播、间套作),机械装备需精准匹配农艺要求,如收获机刈割方式和刈割高度适配再生茬口保护,青饲料收获机切碎长度满足发酵标准,套种收获割台具备豆禾饲草兼收能力。同时,依据生产规模适配装备规格,规模化基地配大型联合机械,小地块用中小型设备,并融入智能技术

（如北斗导航、物联网监控、空-天-地一体监控），实现农机、农艺、管理技术的系统集成融合，避免“机艺脱节”或“大机小用”。

（3）经济、社会、生态效益的协同。全程机械化应以多元效益为导向，经济上通过机械替代人工降低成本（如收获效率大幅提升），保障饲草品质（如青饲料收获机械减少营养流失）；社会上推动生产规模化、标准化，稳定饲料供应，支撑畜牧业升级；生态上通过精准施肥、节水灌溉减少资源浪费，机械化青贮替代露天晾晒降低腐坏污染，合理的机械化作业促进草原/草地复壮促生。三者协同，既破解传统生产“低效高耗”难题，又实现饲草产业的可持续发展，为饲草作物高效生产提供技术和装备支撑。

1.2　饲草生产全程机械化技术路线图

围绕饲草生产全程机械化的内涵，结合我国过去 15 年来苜蓿、青贮玉米、饲用燕麦等主要饲草作物主产区的机械化生产实践情况，国家牧草产业技术体系机械化研究室于 2023 年制定了第三版饲（牧）草生产全程机械化技术路线图（图 1）。该路线图涵盖了产前（种子生产）、产中（土地耕整、建植播种、田间管理、刈割收获）、产后（转运储藏、加工利用）等全程 7 个关键生产环节，涉及到“38 +”类配套机械装备。各环节依不同饲草特性适当调整，形成独特的机械化作业体系。

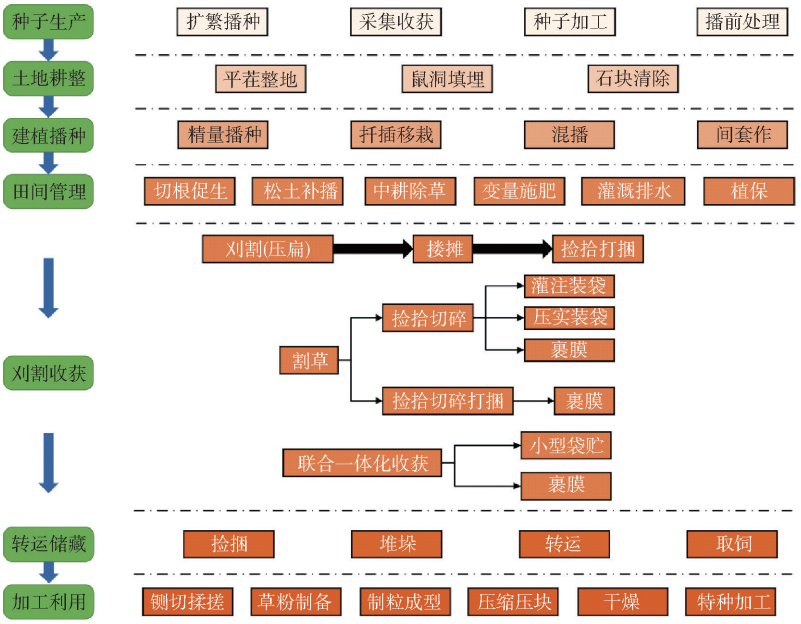


图 1　饲（牧）草生产全程机械化技术路线图

Fig. 1　Technology roadmap for full-process mechanization technology in forage production

2　饲草种子生产关键技术与装备

为落实《加快建设农业强国规划（2024—2035 年）》中关于种源安全的相关部署，紧扣《农业农村部办公厅关于加快推进种业基地现代化建设的指导意见》中“全程机械化、加工自动化、控制信息化”的三大目标，并响应《关于推动饲草产业高质量发展的意见》中 2030 年饲草种子自给率力争达到 75% 的攻坚任务，亟需构建饲草和饲料作物种子从田间生产到加工成商品种子的全链条技术与装备体系[3]。该体系涵盖种子的清选除杂、播前处理、小区播种、种子采收等环节（图 2）。各环节的关键技术和专用装备对于保障饲草种子的产量与质量、稳定产业良种供应至关重要，进而为现代饲草产业提供坚实保障。

2.1　种子清选除杂关键技术与装备

种子清选除杂是通过种子的物理特性将种子与杂质分离的技术。基于种子的物料特性，当前已研发出包括风选、筛选、窝眼选、比重选、色选、光电分选等多种设备，显著提升了种子清选除杂的效率与精度。然而，与其他主要农作物种子相比，饲草种子的清选除杂关键技术与装备的应用效能仍需进一步提升。

（1）多维度物理分选技术

饲草种子的多维度分选技术与普通农作物种子的分选存在本质区别，其核心在于饲草种子具有高度复杂的生物学特性以及特殊的应用要求。普通农作物种子通常形态规整、表面光滑，杂质在物理特性上差异显著，因此易于通过基于尺寸和比重的传统分选设备实现高效分离。然而，饲草种子普遍存在形态不规则，常具有芒、刺、绒毛或不易脱落的荚壳等结构特征，同时其杂质（如自身荚壳碎片）与完整种子在物理属性上高度相似，这些因素显著增加了分选难度[4]。此外，许多高价值饲草种子种皮薄、

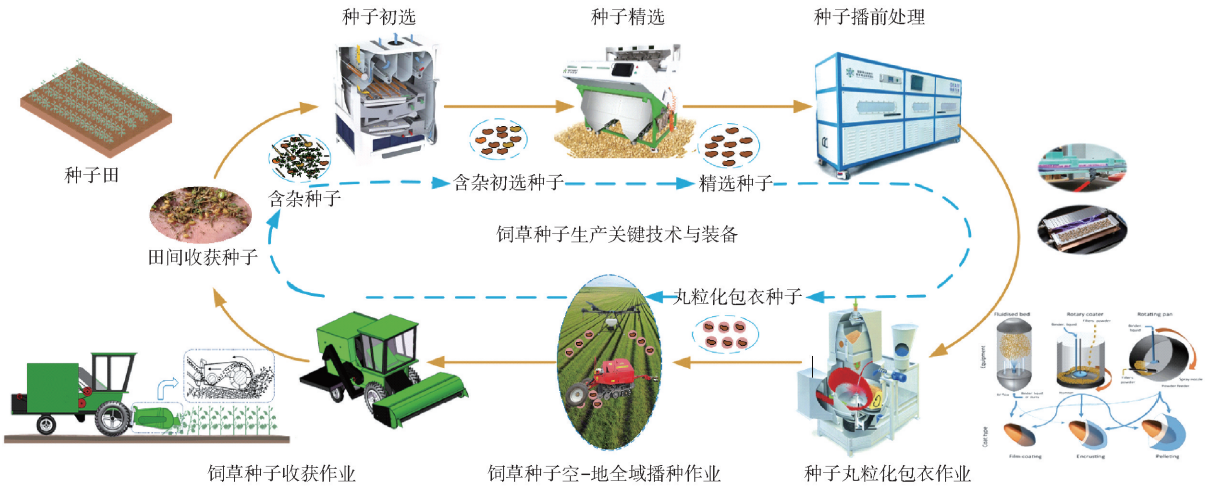


图 2 饲草种子生产关键技术与配套装备示意图

Fig. 2 Diagram for key technology and equipment in forage seed production

易受损,清选过程不仅需提高净度,还需最大限度减少机械损伤以保持种子活力,有时甚至需保留芒等有助于自然建植的结构[5]。这些生物学特性直接决定了其在装备、流程及智能化技术上必须具备极强的适应性、专用性。在装备层面,需开发专用除芒机、柔性刷式筛筒、动态调节风速的自适应风道系统、防堵型柔性筛网与振动频率自适应调控系统[6-7]等,以处理缠绕、堵塞问题并实现低损伤作业;在流程层面,须设计“预清—专用处理—初清—精选”的多阶段、多物理场(风选、筛分、比重、窝眼选)协同工艺链,而非单一工序,以逐级剥离特性各异的杂质[8];在智能化分选技术层面,其复杂性更是凸显了传统设备的局限,从而必须引入高光谱成像与机器视觉等感知技术,结合 AI 算法,实现对近乎“孪生”杂质(如颜色纹理细微不同的豆壳)的精准识别与实时剔除,最终构建出能自动识别品种、自适应调整参数的柔性化智能分选系统[9]。国内外多维分选设备的典型机型如表 1 所示。饲草种子清选的过程,是一个从认知其生物特性难点出发,驱动装备专用化创新、流程再造与智能化深度融合的系统工程,充分体现了饲草种子多维度分选技术发展的内在逻辑与必然性。

表 1 国内外多维分选设备典型机型

Tab. 1 Typical models multi-dimensional sorting equipment at home and abroad

生产企业	型号	类型	创新点或优势
佩特库斯 PETKUS(德国)	S 系列	复式风筛清选机	通过使用 3 通道吸料系统,Airmax 技术可将轻质材料、半粒和比重较低的谷物从优质产品中分离出来
外思特鲁普 Westrup(丹麦)	KA 系列	比重式清选机	进气口做了消声处理,降低了工作噪声;可从侧面快速更换工作台面,提高了工作效率
佩特库斯 PETKUS(德国)	G 系列	比重式清选机	采用 Midex Technology 技术消除了传统比重清选设备中“回流混合”问题的场景
聚力特分选技术有限公司	C 系列	杂粮色选机	光源智控调光系统为工作环境自动匹配亮度;智能风帘系统高速气流快速实时清除轻杂,保证分辨率和色选精度

(2)智能化控制与集成技术

单一的分选技术难以实现饲草种子的高净度分选,需构建多级联合作业体系。大宗种子通过“风筛选—比重—包衣—包装”的工艺流程,集成多设备分选优势,实现逐级降杂[10]。针对饲草种子则应设计出更精细的清选工艺,设计出“风筛选—窝眼/比重—色选”的梯度清选工艺。为实现工艺效能最大化,采用分布式协同控制策略,依据不同批次饲草种子的初始含杂率与物性差异,自适应调节各级设备参数。同时,在关键节点集成在线质量监测传感器,实时检测种子净度与含杂率,动态反馈至控制系统智能决策,实时调整设备运行参数[11]。现有种子加工生产线基本实现自动化,但智能化水平普遍不足,尤其缺乏清选过程的状态信息反馈机制和决策支持能力。未来亟需加强多源信息融合与智能决策技术应用,并建立与之配套的数字孪生平台。通过虚拟仿真实时映射物理产线行为,实现对清选流程的动态优化、堵料风险预测及自动纠偏。此外,应在清选作业结束后引入纯度与净度等质量指标的自动化检测,形成覆盖全过程的智能化质量管控闭环。

2.2　种子播前处理关键技术与装备

种子播前处理是现代农业提质增效的关键环节。综合运用物理、化学、生物处理技术，结合自动化、智能化装备，可显著提升种子质量、破除休眠、防控病虫害、增强活力、促进萌发。该环节保障了苗齐苗壮，为高产优质饲草奠定基础，更能有效减少田间用药，支撑作物高产稳产及绿色农业可持续发展。

(1)高速精量饲草种子丸粒化包衣技术

前沿育种技术虽提升了种子抗逆性与环境适应性，但现代农业仍面临多重生物与非生物胁迫。通过在种子表面构建功能性包衣层，可有效改善种子流动性、增强抗逆能力，为种子营造适宜萌发的微环境并建立抵御外界胁迫的屏障[12]。玉米、水稻等作物种子常采用向种子表面喷洒根瘤菌、保水剂、农药等的单层包衣[13]。然而，小微粒且表观复杂的饲草种子，则需采用丸粒化多层包衣，以增大粒径、形成表观均匀的球形颗粒，解决播种精度低与飞播漂移问题。目前，德国佩特库斯(PETKUS)公司开发的 CM 系列批次式包衣机采用“转子-定子”结构并集成气垫技术，通过气流辅助降低机械摩擦，实现温和混合与均匀成膜；该设备配备高精度计量泵及多模式洒药系统，支持复配包衣剂的精准投加与工艺参数的自适应调控。此外，荷兰种子加工设备有限公司、丹麦兴百利以及奥凯农装等企业也相继推出了多种丸粒化包衣一体化设备。国内外丸粒化包衣设备代表机型如表 2 所示。当前饲草种子丸粒化包衣主要依赖手工操作或自动化设备。手工方式高度依赖技术人员经验进行分层包衣；自动化设备则依据预设配方程序执行丸粒化[14]。但配方程序难以适配不同设备型号、复杂豆科和禾本科饲草种子形态及多样化处理规模，开发成本高且高度依赖人工经验。因此，亟须发展高速精量饲草种子丸粒化包衣技术，构建集成多源传感器的闭环控制系统，实现关键工艺参数的实时监测与动态优化，并建立面向小微粒种子的丸粒化过程控制模型，为多目标优化提供算法支持。同时，应积极推进全行业标准化建设，制定统一的质量评价与生产技术规范，从而推动该技术向高效、精准、智能和绿色方向发展，更好地服务于牧草生产与生态修复的需求。

表 2　国内外具有代表性的丸粒化包衣设备

Tab. 2　Representative pelletizing and coating equipment both domestically and internationally

生产企业	型号	创新点或优势
佩特库斯 PETKUS(德国)	CM 系列	复杂的空气管理系统，通过调节定子与转子间间隙，使穿过间隙的气流形成气垫层，有效降低种子与器壁的摩擦
兴百利 Cimbria(丹麦)	CC 系列	种子称量的电子进料控制巨量和微量协同；进粉结构可剥离
种子加工设备有限公司 SPH(荷兰)	PRM－4010	具备自动化可复制的丸粒化流程、精准的粉液添加系统及智能配方控制功能，支持研发手动与生产自动双模式操作
奥凯农装 OKAM	5WL－600	设备结构紧凑，自动化程度相对较高，生产效率高，甩盘转速可调
凯若特机械制造有限责任公司	2RD－600C	精准水雾化方式加水，满足不同溶剂加入需要；带有配方记忆功能

(2)等离子体处理种子抗逆能力提升技术

等离子体种子处理技术是一种现代物理农业高新技术，通过模拟太空电离层等离子体环境处理作物种子。等离子体产生方式多样，包括电晕放电、火花放电、辉光放电、介质阻挡放电及滑动电弧放电等。等离子体中的高能粒子能够蚀刻种皮蜡质层，改善亲水性与透气性，同时激发早期酶活性[15]。这不仅显著提高了种子发芽率，还增强其在盐碱、干旱和寒冷等非生物胁迫环境下的抗逆性[16]。等离子体在真空环境下发生状态稳定，大气压环境下发生状态较为剧烈，但大气压状态更利于规模化应用与连续化的工业生产。其中，大气压冷等离子体技术已在解决农业和食品领域的众多问题上取得了重大突破[17]。该技术下生产的等离子体活化水(PAW)，富含放电产生的活性粒子，具有特定氧化还原活性、低 pH 值及高电导率，可实现种子消毒并提升发芽率[18]。在最佳处理参数下，大气压等离子体处理可提高小麦种子的发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数及幼苗生长指标[19]。大量研究表明，采用大气压等离子体最佳处理参数对种子进行处理，可以提高种子的活力，对种子的萌发有显著正向影响[20]。然而，大气压等离子体的稳态发生技术与饲草种子处理后的时效性仍待突破。

2.3　小区播种与田间巡检

小区播种的发展面临着高精度、智能化调控及多场景适应性挑战。受制于作物品种与种子物料特性的显著差异，现有小区播种装备在适应饲草种子的精量播种，以及集成监控与反馈的智能方案方面存在不足。亟需攻关高精度单粒播种、作业监控与数据采集等关键技术，研发专用装备实现播种作业的精准控制及全程可追溯性，为育种试验提供全流程数据支撑。

(1)高效排种清种技术

小区播种作业中,清种是确保播种品种纯度、防止机械混杂、保障试验数据科学性的关键环节。清种不充分易导致品种间交叉污染,影响育种试验的准确性与可靠性,因此,开发高效、无损、快速的清种技术与装置已成为小区播种机的核心研究方向之一。目前,主流的清种装置可分为机械式、气力式和电控协同式 3 种类型。机械清种依靠物理拦截与位移实现残留种子清除,常用结构包括毛刷、刮板和可卸式排种盘等,以实现非接触式清种;气力清种则通过负压吸附反吹或正压气流吹拂方式定向清除种子;电控协同式清种整合传感器、电磁阀及控制系统,构建闭环清种控制体系,实现清种过程的自动识别与执行[21]。当前,清种技术正不断向智能化、低损伤、多品种兼容及在线监测方向演进。基于机器视觉的籽粒残留识别、品种信息感知与清种指令联动,以及“清种-换种-投种”一体化精准控制已成为当前研究热点。在清种效果检测方面,现有研究多采用 EDEM 离散元仿真与高速摄像系统对清种过程进行逆向分析与量化评价[22-23],监测清种时间、清种率与种子损伤率,为清种装置的优化提供理论依据与数据支持。未来,清种技术将进一步融合人工智能算法,实现全流程闭环反馈控制,推动小区育种播种机向高通量、高精度、全自动及无人化方向迈进。

(2)作业监控与数据采集系统

小区播种过程数据缺失将导致表型分析失真,影响试验数据可信度、育种效率上限及全基因组选择可行性[24]。发展高精度播种监控技术,是支撑育种从“经验育种”向“可重复科学育种”跃变的核心。当前精量播种智能监测研究薄弱,传统系统存在精度与效率瓶颈。针对饲草、油菜等小微粒种子播种,通量划分检测法等方式可提升高速播种监测能力[25],而漏播实时补种技术仍需实验室向田间转化。亟需攻关精量播种智能化测控技术,构建基于控制处理器的多模态感知融合系统。通过集成激光与多模态传感器,实时采集包括环境温湿度、播种量、漏播分布、种子物理性质等多维度数据,进一步引入表型原位检测、植株营养与发育状态监测、以及单株/小区群体生长巡检等功能,构建高适应性闭环播种作业监控系统。该系统将显著提升饲草等小粒种子精量播种的监测效率,并增强在复杂田间环境下的鲁棒性[26]。基于此,小区播种监测数据将为育种过程提供可追溯的播种图谱,还可实现对作物生长全周期的多维度状态追踪,为数字育种提供可靠、全面的表型数据支撑。

2.4 种子采收关键技术与装备

收获期饲草种子在形态结构、成熟特性、脱粒方式、收获时机及机械适配性等方面存在显著差异,收获技术与装备须根据其特性分类设计[27]。当前,饲草种子收获装备面临落粒损失大、清选效率低、机械损伤高等核心挑战。为此,现代饲草种子收获技术与装备正向高效低损收获、田间清选、智能化监控和高效装备集成的方向发展。

(1)小微粒种子高效低损采收技术

饲草种子粒径微小、易损伤,生物学特性差异显著,导致其收获技术体系呈现高度专用性。现有机械收获工艺主要分为分段收获与直接收获两大类。分段收获针对种子成熟度不一致问题设计,核心流程为先割晒、再捡拾脱粒,利用作物后熟作用提升种子成熟一致性,所获草种品质优于一次性联合收获[28]。直接收获则包含联合收获法、落叶收获法与站秆收获法。其中,一次性联合收获,即采用谷物联合收获机整株喂入,存在种子适应性差、夹带损失高、净度低等弊端;落叶收获法,先喷洒落叶剂促使叶片脱落再用谷物收获机作业,虽可提高净度,但增加了成本;站秆收获法需要专用收获机作业,普遍采用机械梳脱的割前脱粒技术耦合负压气流收集[29-30]。然而,该类收获机的割台系统、脱粒与分离系统、清选系统和输送系统等的系统性研究不足,导致其作业性能不稳定且气吸效果参差不齐,构成了当前高效低损采收面临的主要技术瓶颈。

(2)智能化饲草种子收获监控技术

智能化技术是衔接采收时机判断与作业过程优化的中枢,通过感知—决策—执行闭环可解决“何时收”与“如何收”的问题。通过融合传感器、人工智能、物联网和大数据等技术,构建智能化饲草种子收获监控系统,并基于多源信息交互形成决策链,协同提升饲草种子作业效能,减少收获损失。对种子田建立杂草种子监控系统,生成杂草分布图,当杂草种子量突破阈值,则运用杂草清除机或人工定点除草,从而减少混杂种子[31]。适时收获是饲草种子收获的核心农艺要求,利用多光谱、深度学习图像传感器等实时监测种子成熟度、安全水分含量与田间落粒动态,精准判定最佳采收窗口,规避过早或过晚采收导致的产量与质量损失[32-33];基于振动、扭矩等传感器数据动态调控滚筒转速、行进速度等作业参数,在落粒损失与脱粒不净间实现平衡[34];集成遥感技术、北斗定位与物联网技术,实现采收装备协同调度与路径规划,减少空驶耗时,提升大田作业效率[35];同时具备喂入量超限报警故障诊断与堵塞预警功能,保障连续高效作业。该技术依托多源传感

器、决策模型等智能监控终端驱动采收装备群，实现低损与高效的动态协同。智能化饲草种子收获监测系统还处于起步阶段，近年来对苜蓿种荚成熟度的识别等局部环节研究较多，但全链条系统性研究薄弱，制约了整体智能化演进。

当前饲草种子生产已建立涵盖清选除杂、播前处理、小区播种及采收的机械化技术与装备体系，提升了生产效率与种子质量。然而，面对更高效率、更优品质、更低成本及精细化管理需求，现有装备在智能化、精准化、信息化水平上仍有差距。未来将深度融合物联网、大数据、人工智能、机器视觉、精准导航技术，推动生产向智能化感知、智慧化决策、精准化作业和信息化管理升级。重点包括普及智能分选装备、应用精准变量处理技术、研发无人化/少人化装备、构建全流程数字化管理平台，实现全链条智慧化升级，为饲草产业高质量发展提供更强种源保障。

3　草原/草地饲草复壮促生关键技术与装备

我国草原/草地面积约 4×10^8 hm^2，约占国土总面积的 41%。草原资源涵盖原生的草甸草原、典型草原、荒漠草原、沼泽草地及次生的灌草丛，形成北方温带草原、青藏高寒草原、南方草山草坡的空间分布格局。其中，三北地区草原面积达 1.5×10^8 hm^2，是牧区半牧区的主要分布地带。饲用草地以生产饲草料为主要任务，包括放牧草地、刈割草地、刈牧兼用草地[36]。由于苜蓿等植物长期连作引发的土壤质量下降、自毒性物质累积、根际微生态恶化等内在问题，以及局部超载过牧等外在压力，目前多数草原/草地面临不同程度的退化状况。《国务院办公厅关于加强草原保护修复的若干意见》（国办发〔2021〕7 号）中明确指出，要实施草原生态修复治理，加快退化草原植被和土壤恢复，提升草原生态功能和生产功能。对退化草原/草地的复壮，需遵循政策要求实施系统性生态修复，根据退化程度分级采取不同措施，以实现植被与土壤的恢复（图 3）。

3.1　天然草原的复壮促生关键技术与装备

草原生态修复的主要措施包括：轻度退化采用以草定蓄、围栏封育等自然修复方式，中度退化主要采用免耕补播、改善生境、灾害防控等轻度人工干预，重度退化则主要采用重新建植人工植被等重度人工干预。

我国草原的主要建群种为羊草、针茅等禾本科牧草，以及其他豆科、菊科、莎草科牧草等，表层土壤中根系分布错综复杂，以实现保水、耐寒、耐旱、抗风。草原的土壤相较于大田具有非常高的根系含量，形成紧实的土根复合体[37-38]。土根复合体较土壤自身具有更高的抗拉扯强度，并且更容易形成较

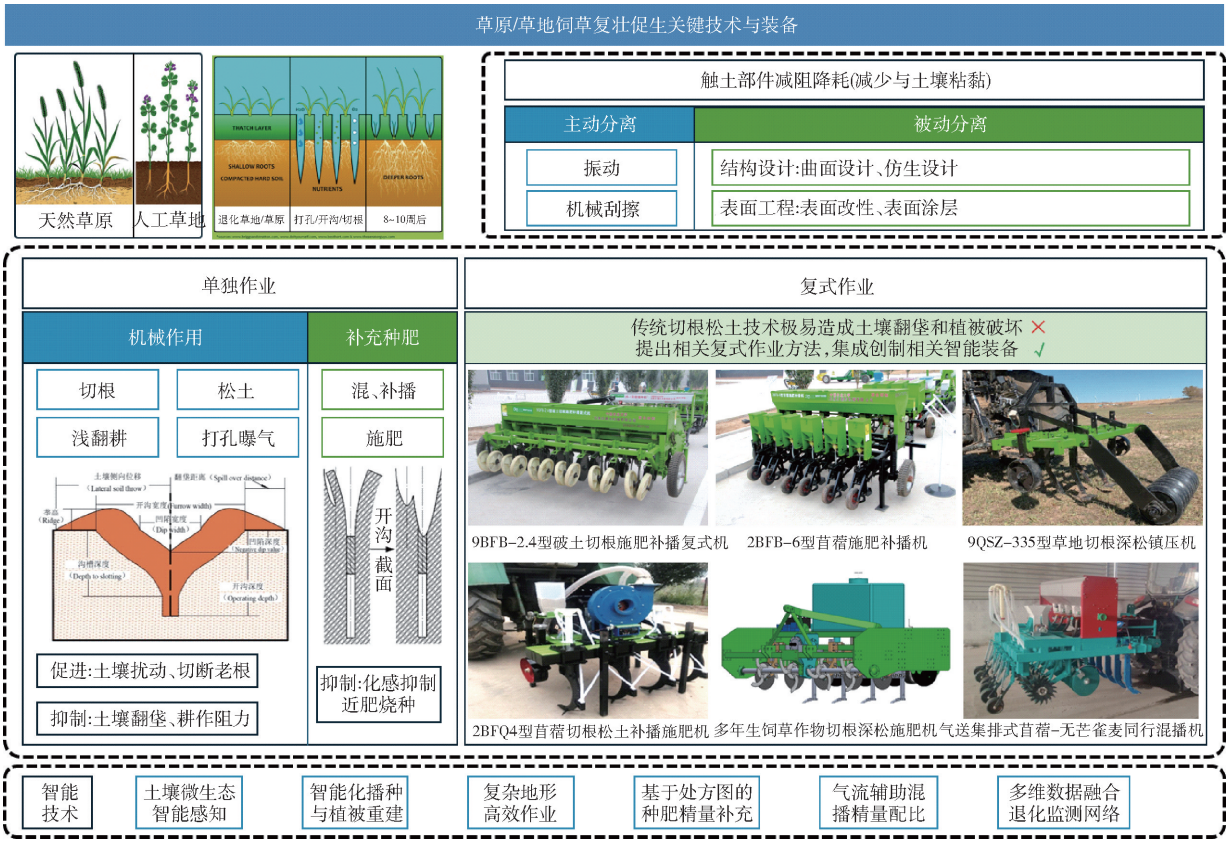


图 3　草原/草地饲草复壮促生关键技术与配套装备示意图

Fig. 3　Diagram for key technology and equipment in grassland/meadow forage rejuvenation and promoting-growth

为坚硬和低孔隙度的板结层[39]。同时,长期过度放牧、机械装备反复碾压、缺乏科学管理等进一步加剧了草原土壤板结型退化。随草地退化程度的加剧,土根复合体的黏聚力、抗剪强度、弹性模量及割线模量均减小[40]。

通过切根、松土、浅翻耕、打孔曝气等强机械作用,以及补播、施肥等方式可以有效缓解草原退化。国内外主要草地修复机械如表 3 所示。切根、松土和曝气都是通过机械作用的形式,在草地和土壤中产生侵入式豁口,让水、肥、空气深入土壤,促进原有根系的生长,或萌发新的芽,同时减少非点源污染[41]。但是,土壤含盐量过高的区域,不适宜采用这些方式,可能会加剧水分蒸发和表层盐分富集。切根通过专用机械的入土切割,通过机械装置在根系分布层深度内切断羊草等根茎型植物的地下横走根茎[42-43]。松土则在比根系分布层更深的区域进行深松,同时降低表层土壤和地表植被的破坏[44]。打孔曝气则通过插入中空圆筒并取出中间物形成入地通道,或直接利用锥贯入实现。但是,锥式打孔器在贯入土壤过程中会对周围土壤进行挤压,也会在一定程度上加剧土壤板结[45]。补播通过补充一些生长力强、生产力旺盛的草种,进而提高草原第一性生产力并改善地表植被群落。草原的补播应选取与退化草原土壤呈中性或正反馈作用的物种,同时遵循“禾大豆小”光斑原则,并在播种当年不利用或针对性追肥。我国有 12.6% 的草原适宜采用免耕补播方式,其中东北地区的适宜比例更高,达到 69.39%。

表 3 国内外主要退化草原/草地修复机械

Tab. 3 Major domestic and international machinery for degraded grassland/meadow rehabilitation

生产企业	型号	类型	创新点或优势
鑫农机械有限公司	9QP-830	盘齿式切根机	通过盘齿结构实现切根作业,能有效切断老根,促进新根生长,且对草地地表破坏较小
布林利-哈迪 Brinly-Hardy(美国)	AS2-40BH-P	组合式打孔施肥机	集成打孔与施肥功能,可在打孔改善土壤透气性的同时,将肥料精准施入,提升作业效率与施肥效果
埃弗斯农业 Evers Agro(荷兰)	Quadro Disc 1200	液态肥料撒布机	采用特殊撒布结构,能将液态肥料均匀撒布在草地表面,便于牧草吸收,且撒布范围广、均匀度高
雷肯 LEMKEN(德国)	Solitair 10CL	免耕条播机	免耕作业模式,减少对土壤结构的破坏,同时能精准条播,利于牧草种子发芽与生长,保水保肥效果好
现代农装科技股份有限公司	2BMC-9	牧草精量播种机	可实现牧草种子的精量播种,节省种子用量,且播种均匀,利于牧草群体生长发育
中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院有限公司	9BMC-19	草原免耕播种机	免耕播种设计,适应草原生态保护需求,作业时对草原原生植被和土壤扰动小,利于草原生态恢复
艾尔威 AerWay(美国)	AWS-100	草地疏松透气机	借助特定部件结构,有效疏松草地土壤,增加土壤透气性,促进牧草根系呼吸与养分吸收,改善草地生长环境
中国农业科学院草原研究所	9MSB-2.10	草地免耕松播联合机	集成免耕、松土、播种等多种功能于一体,一次作业可完成多项草原修复工序,提升作业效率与修复效果

中国农业大学王德成团队围绕草原切根修复开展了系列研究,并开发了破土切根[46-47]、切根施肥补播[48]、切根松土镇压[38-41]、切根释压松土[44]等多种草地修复工艺及配套复式作业装备。最早于 2008 年开发的 9QP-830 型草地破土切根机通过 10~20 cm 可调深度范围内的切根,作业后的草地单位面积草产量增加近 1 倍,生产率达到 0.85 hm^2/h。刀具底部截面形状影响贯入性能,三角形截面比矩形截面所产生的贯入阻力随接触面积变化更加平缓[47]。行进过程中,在前部尖端对土壤产生侧前方挤压而使得土壤发生分裂失效[47]。箭型刀身截面可以减少因挤压土壤而产生的摩擦[37]。于 2014 年开发的 9QFB-2.4 型破土切根施肥补播复式作业机采用切根施肥补播工艺,通过分层交错式覆土,实现深切根(177.7 mm)、中施肥(47.3 mm)、浅播种(44.7 mm)、表土镇压的一体化作业,且肥位于种的侧下方。切根、肥沟、种沟的深度稳定性系数均在 3.5% 以下,表层土壤的扰动程度小于 14%[49]。于 2024 年开发的 9QSZ-335 型草地切根深松镇压机采用斜柄式切根刀、折翼式松土铲、V 形镇压辊组合,比单独的松土作业造成的翻垡、隆起等表层土壤扰动低,作业稳定性系数更高[41]。关键的折翼式松土铲的铲尖、刃口处加装有硬质合金刀片或堆焊耐磨层,弧形铲面推动土壤向上运动,通过离心力和重力作用使土块抛掷、翻转,土壤碎块粒径不大于 5 cm 的比例可达 80% 以上[42]。于 2024 年开发的 9QSL-1.8 型主-从动组合式窄缝切根机,其主动式切根形成主沟缝,从动式切根形成释压沟缝,切断了

土层间的应力传递路径，将松土对象从“半无限土层”转变为“有限土层”。相较于传统的松土工艺，切根释压松土工艺松土阻力降低 27.9%，土壤坚实度均值和土壤容重均值分别降低 6.19% 和 1.19%[44]。

除开切根之外，适当的混补播也可以促进草原修复。为了降低对原有草地生态的破坏，免耕补播是草原播种的一种主要形式。德邦大为 1805 - Q(C)型草地免耕补播机采用气吹式排种器与铧式开沟部件，进行 6 ~ 8 km 速度下的低扰保墒开沟和补播。采用“倒 T”型开沟器，以在低扰动表层土壤的下方形成透气且潮湿的种床。播种时一般多年生草种和一年生草种比例应大于 1.5，且多年生草种尽可能采用两种及以上草种[50]。豆禾混播技术利用了“豆科固氮-禾本科高产”的协同效应，相比于单播可以提高草地产草量的稳定性，并有助于草地的草蓄平衡，是一种人工建植草地和修复退化草原的新方式[51]。苜蓿与无芒雀麦混播时，化感作用(种间化学互作)可促进土壤养分循环，提高土壤有机质水平，进一步提升草地生产力。对于混播比例(二者各自占单播量比例的比值)而言，1∶1侧重稳定性，1∶2侧重高产潜力，但均能实现协同效应，可根据区域气候和土壤条件灵活选择[51]。气送集排式苜蓿和无芒雀麦同行混播机采用独立螺旋输送式供种和气送集排式排种工艺路线，可以在作业速度4 ~ 6 km/h 下实现播深变异系数小于 8%，混播比例精度大于等于 95%[51]。

3.2　多年生苜蓿地切根松土复壮关键技术与装备

苜蓿庞大根系的生长有利于改善土壤结构，在保持水土、加固边坡[52-53]等方面有突出优势；同时可以促进微生态正向演替和有机碳氮积累，对于盐碱地及沙漠的治理和综合利用有着重要借鉴意义。虽然紫花苜蓿生长寿命长达 10 ~ 30 a，但在第 5 年之后生产力会逐渐下降。随着生长年限的增加，苜蓿地的土壤有机碳含量、养分含量、土壤脲酶活性均呈现先升后降的趋势。土壤养分、土壤酶在第 3、4 年时达到峰值，使得 2 ~ 4 a 为苜蓿生长旺盛期[54]。第 5 年开始，机械压实与土壤质量下降、自毒性物质累积、根际微生态系统恶化、苜蓿根系老化、深水消耗过度成为苜蓿连作的主要障碍。紫花苜蓿具有自毒性化感作用，即已经生长的苜蓿植株根部会分泌香豆素等物质抑制新苜蓿种子的发芽和生长[55]，从而导致多年生苜蓿地植株密度降低、产量降低[56]。适时轮作、间套种、添加植物生长调节剂或功能性微生物是目前主要的解决方法。

抑制苜蓿地退化的核心是改善根系汲取水分和营养的能力。苜蓿主根一年生长即可深入 1 ~ 2 m，多年生长可达 3 ~ 5 m 甚至更深，是苜蓿植株重要的营养物质储存器官，尤其是在割后再生、春季再生提供碳水化合物[57]。侧根主要分布在耕作层(0 ~ 30 cm)，补充吸收养分并形成根瘤，在植株生长旺盛期可以侧向延伸 50 ~ 100 cm，但会在之后老化(断裂或纤维化)并缩小范围。须根与根毛可以提高水分和养分吸收效率，并且促进微生物活动并改善土壤微生态。使用机械切根的方式可以打破根系老化形成的土壤板结层，促进侧根和须根萌发。在病虫害控制较好的情况下，对苜蓿地进行切根处理可以使返青期提前，并提高产量。但是苜蓿根系的抗拉伸性能是抗压缩性能的 4 ~ 10 倍，切根刀具的设计和作业应该尽可能提高剪切断裂在根系破坏中的比例，同时降低土壤扰动[58]，避免拉扯根系对植株造成损伤。在切开的沟缝中进行适当的禾本科饲草补播[59]和苜蓿根系侧深位施肥有助于多年苜蓿地的复壮促生，切根-补播-施肥复式作业工艺及装备的开发也可以提高作业效率、减少土地碾压[60]。相对于自然生长，深松后进行旋耕使得苜蓿产量和粗蛋白含量分别提高了 20.8% 和 25.3%，土壤容重降低 8.6%。

4　饲草刈割收获关键技术与装备

苜蓿等优质饲草不仅是提升畜产品质量的关键，对改良土壤、维持生态平衡也作用显著；广袤草原更是我国重要的饲草资源宝库。《关于推动饲草产业高质量发展的意见》明确提出：“到 2030 年，全国优质饲草种植面积力争达 1.35 亿亩，产量达 1.3 亿吨，牛羊优质饲草需求保障率达 85%。”刈割收获作为饲草生产的核心环节，直接决定干草品质与营养留存率，其作业效率更是影响饲草及时收储的关键(图 4)。在此情形下，专用刈割收获机械成为突破产业瓶颈的核心支撑和迫切需求。

4.1　刈割收获关键技术与装备

在饲草刈割收获环节，机械技术应用需与“适时收获”“适度留茬”的农艺要求深度协同。以苜蓿为例，适时收获是平衡营养品质与产量的关键，应以生育期为核心判断依据——初花期为最佳收割窗口期，此时苜蓿粗蛋白含量最高，营养价值最佳，且生物量接近峰值，过早收割产量不足，过晚则营养流失加剧；同时需结合田间水分条件，尽量避免雨天作业引发饲草霉变。割茬高度控制直接影响苜蓿再生能力，常规作业需保持 5 ~ 8 cm 留茬高度，最后一次刈割留茬高度应在 10 cm 以上，有利于保障苜蓿的安全越冬。实际操作中，可通过割草机仿形滑掌等结

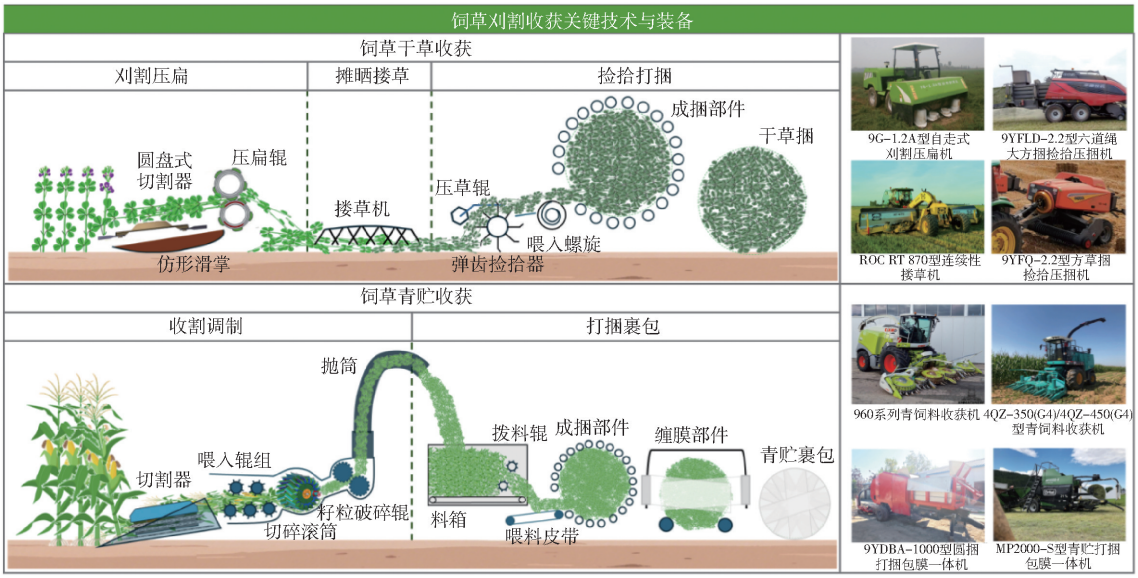


图 4 饲草刈割收获关键技术与配套装备示意图

Fig. 4 Diagram for key technology and supporting equipment in forage cutting and harvesting

构的动态调节功能,确保全田割茬高度整齐,为苜蓿快速返青、实现多茬收获提供保障。

饲草刈割收获机根据动力来源的不同可分为手扶式、自走式、悬挂式、牵引式,根据结构原理的不同又可以分为圆盘式、甩刀式、往复式。对于茎秆直径小、管壁薄的苜蓿植株而言,通常使用高速单动刀切割的形式[61]。对于圆盘式切割器而言,切割质量与切割速度、切割倾角、切割带差、刀片扭转角度等参数密切相关[62]。切割倾角形成的斜切形式比水平横切切割阻力可以降低 30% ~40%。高速切割器和后续压扁辊共同形成的气流场对苜蓿植株有抬升和弯曲的综合效果,能辅助收获并减少重割[63]。由于刀片会在持续作业后产生磨损并进一步提高燃油消耗[64],因此通过使用新材料或制造工艺提升刈割刀片耐磨性和自磨锐性能有重大的产业意义。

由于饲草刈割收获时的降水极易造成落叶损失,因此快速的饲草干草调制方法是提高干燥速率和机收效率的关键手段。对于苜蓿而言,茎秆和叶片的解吸等温线模型不同[65]。因此,在刈割工序之后添加压扁的目的是对茎秆进行适当的压裂,使得茎秆与叶片的干燥速率接近,以便于后续的快速干燥。在压扁过程中,“裂而不断”是一个重要原则,即尽可能提高压扁率而降低茎秆折断率。六边形辊齿压扁辊形成的挤压-弯折混合破坏平均干燥速率分别为挤压破坏和弯折破坏的 1.43 倍和 1.97 倍,在单株与多株的苜蓿干燥试验中都表现出更好的效果[66]。

国外知名的割草压扁机生产企业包括美国约翰迪尔 John Deere、美国纽荷兰 New Holland、美国爱科 AGCO、法国库恩 Kuhn、德国克拉斯 Claas 等。近年来,针对我国饲草种植现状尤其是丘陵山地或林下种草场景,开发出一系列小型轻便、仿形越障、智能导航的割草机,同时注重提高抗侧翻能力[67],填补了我国丘陵山区饲草收获机械的空白。9GYZ-1.2 型小型自走式苜蓿刈割压扁机在保证平茬切割的前提下,重割率仅为 0.8%[68]。集成接地仿形、越障技术的 9GY-320 型悬挂式割草机采用空间连杆机构,对于 100 mm 的固定障碍物可以通过抬升和后摆运动完成越障[62]。为 3.2 m 幅宽割草机开发的后悬挂式割草机折叠机构可以在运输时折叠,并在工作时实现 ±30°以内的摆动,顺利通过 250 mm 高度波形路面,极大地提高了地形适应能力[69]。

4.2 搂草关键技术与装备

搂草机按搂草方向可分为横向搂草机和侧向搂草机两种。横向搂草机的作业方向与机组前进方向垂直,而侧向搂草机则与机组前进方向平行,摊草机(翻草机)与侧向搂草机结构类似。横向旋转式搂草机具有作业质量好、效率高的特点,是目前应用广泛的一种机型[70]。搂草机弹齿形状对牧草拾取效果有显著影响[71],旋转齿在牧草拾取高度、速度、功率消耗和牧草损失率等方面表现最优。研究表明大面积铺设可以提高干燥速度,在理想情况下,将作物铺在至少覆盖切割面积 60% 的宽阔区域中,以减少植物呼吸并保存糖分。捡拾装置作为秸秆打捆机的关键部件,其对平铺在田地间秸秆的拾取效果,将直接影响到后续作业的工作性能和效率,现有研究中,通过对搂草机的作业效率和质量与离地间隙、运动特性分析,建立弹齿滚筒式捡拾器的研究数学模型,开展载荷特性分析和弹齿疲劳寿命分析等,研究设计无护圈式捡拾装置[72]、凸轮理论滑道[73]、防堵装

置[74]、清秸装置[75]、捡拾输送装置[76]，具有捡拾、切碎及揉搓等多功能的捡拾割台。在实际生产中，应根据牧草的种类、高度、密度等因素，选择合适形状的弹齿，并优化接触角度和旋转速度，以提高搂草机的作业效率和质量。

4.3　捡拾打捆关键技术与装备

打捆机通过捡拾器将集拢后的草条捡拾并打捆。捡拾后饲草的含土率是捡拾器作业效果的重要技术要求，在捡拾器后面加装振动输送筛可以有效分离土壤[77]。根据作用原理不同，打捆机的致密成型原理有所区别。圆捆机主要采用卷积成型的形式，而方捆机主要采用单轴压缩成型的形式。圆捆机主要分为外缠绕式和内缠绕式，二者打出的草捆分别呈现内松外紧、内紧外松的径向密度分布不均匀的特征。对于方捆打捆机而言，主要分为开式压缩和闭式压缩。在弹齿式捡拾器之后有小喂入叉机构和大喂入叉机构，分别负责捡起饲草至预压室的拨送和预压室至压缩室的拨送。适当增大大喂入叉在预压室的停留时间可以改善预压效果，通过监测活塞杆受力可以反映喂入量变化[78]。LI 等[79]通过系统总结致密化应用较多的典型作物应用场景，分别从组织及纤维、作物及茎秆、草捆及裹包 3 个不同物料层次考察了致密过程，并对单轴压缩的流变学模型进行了总结，为打捆机的开发提供了参考。

作为方捆机捆绳环节的核心零部件，打结器因结构原理、加工工艺的复杂性一直都属于方捆打捆机的“卡脖子”技术。方草捆打结器主要有 C 型、D 型、双结型 3 种，但目前国内学者的研究基本上都集中于 D 型打结器的结构创新设计和检测分析方法。将 D 型打结器的打结动作改为挤压 U 型卡扣，可以简化打结器结构[80]。系统分析夹绳盘-打结嘴空间角度参数为打结器运动解析和结构设计提供参数化视角[81]，并通过在轴孔内镶嵌自润滑轴套并使用固体润滑脂的方式提高打结器使用寿命[82]。尹建军等[83]开展了系列研究：对打结器夹绳-绕扣-钳咬动作进行运动学建模，推导出捆绳正常工作而不被拉断的条件；开发双齿盘驱动打结器，优化打结动作并降低支架加工难度；建立的凸轮轮廓曲面计算模型可以保证合适的咬合力并降低钩钳尾部磨损[84]。

目前，打捆机的智能化系统开发主要集中于自动控制、远程监控、路径规划和密度预测方面。基于传感器的 XUANHE BR6000 型圆捆机远程控制系统可以实现电控放网、尾门防误触发、精准技术相结合，比手动模式提升效率 14.91%[85]。基于工业物联网平台的圆捆机控制系统通过融合 PLC、传感器网络、电液阀门、网络模块、GPS 模块，实现打捆机作业状态的远程监控、控制和信息采集。为 4KZ300 型轮式自走方捆打捆机开发的行走速度控制系统，以工作负荷反馈为依据及时调整行进速度并保持负荷稳定[86]，开发的路径规划算法可以减少 12.9% 的非作业行驶距离[87]。通过监测 McHale Fusion 3 + 圆捆打捆机传动链的变形来关联链条应力，从而近似测量打捆机的扭矩，发现峰值扭矩需求与链条弹性伸长呈线性相关（$R^2 \geqslant 0.97$），链条在整个收获季存在永久塑性伸长[88]。

由于成捆机理和成捆机构的区别，密度检测也主要有成捆过程中预测和放捆过程中检测两种思路。基于钢辊径向反力建立的动态草捆密度预测数学模型，以上后方钢辊为测量辊，测量草捆密度的精度在 93% ~97%[89]。将上前方的一根钢辊替换为弹簧压入的卷压力采集装置，可以比仓门侧拉力更早的获得传感器信号，并基于二次函数模型成功预测草捆密度[90]。利用双阈值动态滤波方法预处理、分段线性插值补充空缺点、巴特沃斯带阻滤波器消除噪声等步骤组合形成的信号处理方法，可使得草捆质量预测误差控制在 ±4.17% 以内[91]。

4.4　饲草青贮收获关键技术与装备

青贮饲料是反刍动物养殖的核心饲料，其收获与贮存技术直接影响养殖效益与饲料品质。青贮收获过程包括割台切割、输送、切碎和籽粒破碎等环节，其中切碎装置的先进性对饲料收贮质量尤为关键。而裹包青贮技术则在收获基础上，通过打捆、压缩和缠膜等工序，实现饲料高密度成型与厌氧贮存[92]，具有密封性好、取用方便、贮存期长、能避免二次发酵等优点，同时有助于标准化生产、品质监控和商品化流通[93]。

青饲料收割机按割台结构分为卧式和立式两大类，现有割台主要分为：往复式割台、塔轮式割台和链盘式割台[94]。仿生切割刀具具备不同于常规刀具的表型特征，可以更有效地穿透和切割作物茎秆，同时大幅降低阻力、能耗和磨损等[95]。自适应仿形技术是现有研究热点之一，主要涉及机械-液压组合式割台仿形装置、两点探测-电液控制割台仿形系统、地形起伏检测装置、割茬高度检测方法的研究，PID 控制算法实现割台高度的自动调控、融合激光雷达测距信息和惯性测量单元感知速度信息的割台仿形控制系统。在高效精准收获方面，美国约翰迪尔 John Deere 研发的 HarvestLab™3000 技术、德国克罗尼 Krone 专为玉米秸秆设计的 EasyCollect 收摘装置、德国克拉斯 Claas 研发的 CEMOS AUTOMATIC 可自动实时匹配调整脱粒滚筒转速、风机参数等 50 余项设置，确保在复杂条件下维持最

优收获效率[96]；同时，联合收获机的多功能化发展趋势日益明显，即在单机作业中完成割台、粉碎、抛送至运输车辆等工序，大幅度提高了青饲料收获的整体作业效率；青贮收获机精准抛送填装系统[97]，可将青贮物料精准抛送至跟车车厢，实现物料的高效填装。针对现阶段青贮收获机田间作业的各项安全收获问题，研究设计人畜活体探测预警系统、割台仿形系统、金属异物探测系统，实现路径规划、快速识别、精准定位、实时避障、自动驾驶远程交互避障系统、避障机构是收获环节的一个重要研究方向[98]。

裹包青贮的核心目标是实现高密度、均匀、低损耗的青贮裹包产品，在裹包青贮制作过程中，涉及均匀输送技术、高密度成捆技术、裹膜密封技术、自动化控制等技术[99]，配套物料回收装置、稳定液压系统、双缠绕臂、薄膜传感器等关键机构[100]，能够满足多种作业条件下的作业要求[101]。现有研究基础表明，物料压缩密度与水分含量是影响青贮发酵质量的关键因素。高密度打捆不仅有利于减少草捆内部孔隙率，降低氧气残留，还能提升运输与贮存效率。同时，缠膜层数、缠膜重叠率率、膜预拉伸比和缠膜均匀性直接决定了草捆的气密性与耐久性，相关研究已逐渐从经验设计向基于膜材力学性能和草捆几何形态的精确控制过渡。近年来，非测地线缠绕理论、张力控制算法以及自适应缠膜装置的研究，为缠膜质量的稳定性提供了新的解决方案。

5 饲草加工利用关键技术与装备

受自然条件、储存方式和饲喂习惯等因素影响，将饲草鲜草干燥制成青干草仍占有重要地位，尤其是苜蓿等优质饲草主要就是进行干草生产[3]。而随着畜牧业向规模化、集约化发展，饲草加工产品如草粉、草颗粒等被广泛应用于商品化饲料体系中(图5)。



图5 饲草干燥与加工关键技术与配套装备示意图

Fig. 5 Diagram for key technology and equipment for forage drying and processing

5.1 机械干燥关键技术与装备

干草是将鲜草经自然或人工干燥，使其含水率降至15% ~20%所得的饲草产品，其干燥工艺对营养成分、适口性及贮藏稳定性均具有显著影响。孙庆运等[102]将干草生产工艺分为干法收获工艺(自然晾晒)、湿法收获工艺(晾晒-机械干燥)以及直接收获工艺(不落地收获干燥)3类。在干法收获中，由于饲草叶片与茎秆在结构和生理特性上的热敏差异，叶片水分散失速率显著快于茎秆，在田间晾晒环节，这一差异易导致富含营养的叶片提前过度干燥并脱落，降低饲草利用价值。压扁调制工艺通过机械破坏茎秆结构以缩小茎叶干燥速率差异，压扁辊的齿形优化设计[103]、工作参数优化配置[104]可以进一步提高效果。湿法收获与直接收获则依赖适宜的机械干燥技术与装备，以减少营养损失。

青干草干燥技术可分为自然干燥和机械干燥两大类。自然干燥法利用太阳辐射和风力将水分蒸发，包括地面干燥法、草架干燥法以及发酵干燥法，因其成本优势，是目前我国青干草调制的主要方式，但应注意选择晴朗、温湿度适宜且微风天气进行晾晒[105]，避免因雨淋造成营养物质的流失和饲草品质的下降。机械干燥技术包括热风干燥[106]、太阳能干燥[107]、红外干燥[108]和化学干燥[109]等，国内外学者研究主要集中在装置优化设计、干燥参数智能

化调控、多技术联合干燥[110]以及饲草干燥品质检测[111]等方面研究。

饲草脱水过程可分为 2 个阶段：第 1 阶段将含水率降至约 40%，主要为自由水的快速散失，称为快速降水阶段；第 2 阶段将含水率进一步降至 14%以下，主要为结合水的缓慢散失，称为降速干燥阶段。针对干燥过程中传热传质的研究，学者提出了多种适用于果蔬和食品的干燥数学模型，为设备改进与工艺优化提供理论基础。多技术融合的联合干燥（如太阳能与空气源热泵联合干燥）可显著提高能效比与除湿效率。针对干燥品质在线检测的研究，主要集中在视觉无损检测方向，通过采集颜色、形状纹理[112]等信息，结合机器视觉、深度学习等技术[113]，实现物料干燥状态的动态监测，结合其他传感器（如温湿度传感器[114]），对相应设备参数进行有效调控，提高干燥效率和干燥品质。

5.2　草粉草颗粒加工工艺/技术与装备

草粉、草颗粒等草产品的标准化、贮藏稳定性和运输便捷性使其成为反刍动物日粮中不可或缺的一部分。

草颗粒由粉碎饲草与其他饲料原料（如玉米、豆粕）混合，经调质加热与压力作用，通过制粒机制成直径 2 ~ 8 mm 的颗粒，可提升饲料适口性与消化率。按原料组成可分为纯草颗粒和复合草颗粒，通过合理选择原料与配比，并结合不同牲畜种类及生长阶段配方制粒，可实现高效的标准化饲喂。

制粒是草颗粒加工生产中的核心环节，其核心是利用压缩致密成型技术，提高草颗粒的密度和强度、饲用价值。常用的制粒设备主要分为螺旋挤压式成型机、活塞式挤压成型机[115]、压辊式成型机[116-117]；压辊式成型机在工作过程中利用旋转产生的热量软化成型物料，因无需外部加热、原料适应性强、产量高等优点，该技术广泛应用于饲料加工领域。平模、环模是目前主流的挤压成型技术，研究集中在成型力学特性[118-119]、关键部件设计与磨损分析[120]。

针对成型过程，多以单轴压缩试验结合计算机数值模拟仿真技术开展[115]，黄晓鹏等[118]将苜蓿环模制粒简化为挤压模拟试验，建立了制粒密度与挤出力、物料含水率、草粉粒度的数学模型。

5.3　茎叶分离关键技术与装备

茎叶分离是草产品加工中提升附加值的关键环节。以紫花苜蓿为例，其叶片相比茎秆含有更高水平的蛋白质、维生素和矿物质。该技术可分为田间直接分离和收获后分离两类。田间直接分离包括分层收割和分段收割。分层收割根据植株叶片与茎秆分布位置，先收割上半部获取叶片，再收割下半部以实现分离；分段收割则利用专用设备直接剥离叶片，茎秆留田继续生长或待二次收割。通过拨喂装置与梳脱滚筒脱落并收集叶片，茎秆留于田间；对拖挂式 Orkan 2 型秸秆饲料收割机的切割滚筒改装，确保在降低机械损伤的前提下剥离叶片与茎尖，并通过气流输送至拖车收集。

收获后分离是在整体收割并运输至固定场所后进行，包括干燥分离、筛分和风分 3 种方法。干燥分离利用叶片干燥速率快于茎秆的特性，多采用滚筒式干燥设备完成干燥与分离。宁国鹏等[121]设计大型滚筒干燥分离设备，并实现关键参数可调控。筛分法依靠茎叶在尺寸、形态与比重上的差异，通过振动筛分离，研究重点为振动频率与振幅对分离率和净度的影响。风分法基于空气动力学特性差异实现茎叶分离。通过内分式和外分式两种多孔风分转筒进行饲草的茎叶分离或利用水平风洞在气流作用下将较轻叶片吹送出分离室，而茎秆通过传送带排出。

6　总结与展望

6.1　总结

从饲草生产与加工机械化技术的发展全局来看，国际先进水平已构建起“智能集成—生态协同—全链适配”的立体化发展体系：通过“装备即终端”“田间物联网”“数据驱动型”三大路径的深度融合，实现了装备自主决策、多设备协同及全流程优化，推动饲草生产向高效化、绿色化、智能化跃升；专业化产品制造正从“单机精密”迈向“生态协同精密”，依托数字孪生体、区块链溯源等技术形成跨域数据闭环，显著提升了装备迭代效率与零部件寿命；而全程产业链的多维适配场景，则通过数字孪生底座与模块化装备的结合，在饲草生产物联网、草产品远距离高效调配、智慧化精准饲喂等方面实现了降损增效，为全球饲草机械化发展提供了重要借鉴和参考。

我国饲草生产与加工机械化技术在种子播前处理、天然草原复壮促生、苜蓿及青贮玉米收获、草产品加工等部分环节取得一定进展，也已基本实现“到 2025 年饲料（草）生产与加工机械化率达 65%以上”的既定目标，但整体仍面临三重核心挑战：①装备发展呈现显著的不平衡与不充分，40% 的全程机械化装备存在空白，摊晒、搂集等环节设备陈旧，种子收获、牧草混播等配套装备缺失，导致多数生产场景难以实现连续作业，饲草品质稳定性受影响。②核心技术与部件高度依赖进口，切碎滚筒、打结器等关键部件在材料性能、工艺水平上与国外存

在差距,且缺乏本土作物特性数据库支撑,难以形成本土化改进路径。③场景化装备适配性不足且多学科融合深度不够,天然草原生态装备推广、丘陵山地轻量装备研发滞后,农艺-装备适配模型缺失,难以形成场景适配模式,制约智慧草业发展。

6.2 展望

未来,我国饲草生产与加工机械化技术与装备的发展应重点围绕以下 4 方面推进:

(1)加快补齐饲草生产全程机械化装备断点

突破种子丸粒化包衣装备适配性瓶颈,针对小微粒及豆科、禾本科种子形态差异,研发集成多传感器闭环控制的高速精量装备,动态调控包衣组分与添加量,替代手工操作与通用设备局限;研发苜蓿种子促花授粉专用装备,优化饲草种子采收装备结构,改进梳脱-负压收集装置,结合多光谱成熟度监测技术,实现苜蓿种子的同步高效采收,降低落粒损失与清选能耗;开发适配轮作套作模式的复式作业机械,兼顾播期调节与作物兼容性,减少作业环节,提升生产效率;针对草原广域、分散的特点,开发墒情与肥力一体化监测装备,构建无人机与地面机械协同的精准植保系统,实现草原管理的精准化;研发移动式饲草加工机组,集成铡切、揉搓、制粒功能,打造“田间收获-现场加工-直接饲喂”的高效模式,满足小型养殖场的加工需求;填补丘陵山地装备空白,研制基于地形感知的自走式仿形割草、播种装备,强化越障与抗侧翻能力,提升复杂地形的通过性。

(2)突破主要装备关键零部件及技术卡点

针对打结器、切碎刀具、精密排种器等核心部件在复杂场景下可靠性不足、适配性有限的问题,通过仿生结构优化与耐磨材料创新,研发超精密加工工艺,增强其对多样工况的适应能力与长期作业稳定性;融合多模态感知技术与智能调控算法,攻克丸粒化包衣粉精准控制、微小粒种子精量排种等精密控制瓶颈,实现部件运行参数的动态适配与多系统协同;推动打结器、切碎刀具等“卡脖子”部件从依赖进口向自主研发转型,强化设计-仿真-制造全链条创新,建立核心零部件国产化技术体系;构建“感知-决策-执行”闭环系统,集成物联网传感器与数字孪生平台,促进切根松土、饲草切割等环节多部件协同联动,整体提升装备作业效能与智能化水平,形成覆盖种子处理、田间作业、加工全程的自主可控技术体系;建立核心零部件可靠性测试体系,搭建可模拟不同气候、土壤、作物条件的试验平台,对打结器、切碎刀具等部件开展 1 000 h 以上的耐久性测试,确保零部件性能稳定。

(3)分场景推进饲草生产机械化、智能化、智慧化发展

在天然草原场景,聚焦生态友好型装备的推广应用,重点推广智能轻量化割草、打捆及修复机械,集成遥感监测与精准作业系统,实现产量监测、轨迹规划与生态预警的联动,在提升草原生产力的同时保护生态环境;在农田规模化种植场景,构建“北斗 + 物联网”数字化平台,联通精量播种、变量施肥、智能收获、快速干燥装备,借助人工智能技术优化装备联合作业时序,探索构建无人化协同作业集群,进一步提升生产效率与资源利用率;在丘陵山地场景,突破地形限制,研发轻量型自走装备与仿形系统,集成双目视觉与激光雷达,融合 5G 与地形感知技术,实现坡地作业的自适应调控,自动规划作业路径,规避岩石、沟壑等障碍,保障作业安全与效率;在农牧交错带场景,强化种养循环智慧化发展,开发青贮-粪污还田装备,研制饲草青贮智能监测装置和智能饲喂槽,搭建“种植-加工-养殖”数据平台,利用区块链技术实现品质追溯,形成与场景适配的现代化发展模式。

(4)多学科深度交叉融合共同促进智慧草业发展

提升农艺特性与装备参数的匹配度,针对精量播种机、智能割草机等设备,建立草种粒度、茎秆硬度与作业转速的动态适配模型,实现“良种 + 良法 + 良机”的精准协同,充分发挥各环节优势;在装备作业过程中注重控制对生态的扰动,在草原修复机械研发中融入生态学原理,通过模拟不同切根深度、松土强度对土壤微生物群落、植被多样性的影响,制定科学的机械化作业标准,在提升草原生产力的同时,减少对原生植被的破坏;拓展数字技术在装备中的应用,为田间管理设备加装多光谱识别模块,为丘陵山地自走式装备集成北斗导航与地形传感器,通过产业大数据平台联动干燥设备温湿度调控系统,构建“饲草生产-养殖-产品溯源”全链条数字体系。强化农艺与农机、生态与装备、数字技术与机械装备的交叉融合,全面提升智能草业装备的适配性与效能,推动智慧草业持续发展。

参 考 文 献

[1] 中共中央,国务院. 中共中央·国务院关于深入推进农业供给侧结构性改革 加快培育农业农村发展新动能的若干意见[Z/OL]. [2025-09-10]. http://www.gov.cn/zhengce/202203/content_3635258.htm.

[2] 中国农业机械流通协会. 中国农机市场发展报告(2022—2024)[M]. 北京: 中国财富出版社有限公司, 2024.

[3] 王德成,贺长彬,武红剑,等. 苜蓿生产全程机械化技术研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 1-25.

WANG Decheng, HE Changbin, WU Hongjian, et al. Review of alfalfa full-mechanized production technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 1 - 25. (in Chinese)
[4] 曹祥练,潘威,秦明松. 种子无损分选新技术研究进展[J]. 种子,2016,35(1):44 - 47.
CAO Xianglian, PAN Wei, QIN Mingsong. Development of the non-destructive technology of seed upgrading and sorting[J]. Seed, 2016, 35(1): 44 - 47. (in Chinese)
[5] 王旭,王春光,王全喜,等. 种子重力分选机预分层喂料系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 80 - 88.
WANG Xu, WANG Chunguang, WANG Quanxi, et al. Design and experiment of pre-stratified feeding system for gravity seed separator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 80 - 88. (in Chinese)
[6] 鹿瑶, 王伟, 钟斌,等. 融合光电色选的皮带筛式油茶果壳籽分选机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1): 429 - 439.
LU Yao, WANG Wei, ZHONG Bin, et al. Design and experiment of belt screen seed sorter for camellia oleifera fused with photoelectric color sorting technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 429 - 439. (in Chinese)
[7] 李永磊, 徐泽昕, 万里鹏程, 等. 种子清选机电磁变频激振清筛装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 123 - 133.
LI Yonglei, XU Zexin, WAN Lipengcheng, et al. Design and test of electromagnetic variable frequency excitation sieve-cleaning device of seed cleaner[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 123 - 133. (in Chinese)
[8] 宋学锋, 戴飞, 史瑞杰, 等. 基于非球形颗粒模型的胡麻脱粒物振动分选仿真与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 39 - 46.
SONG Xuefeng, DAI Fei, SHI Ruijie, et al. Simulation and experiment of the vibration separation of flax threshing material using non-spherical particles model[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(10): 39 - 46. (in Chinese)
[9] 李永磊, 徐泽昕, 万里鹏程, 等. 批次式种子清选机橡胶球清筛装置激振力模拟分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 23 - 33.
LI Yonglei, XU Zexin, WAN Lipengcheng, et al. Impulsive force simulation of the rubber ball sieve-cleaning device for batch seed cleaners[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(20): 23 - 33. (in Chinese)
[10] WANG Qiaohua, YU Chengdong, ZHANG Hongzhou, et al. Design and experiment of online cottonseed quality sorting device [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 210: 107870.
[11] HARDWICK J, MORGAN Z, HIRAYAMA R. Acoustophoretic system for seed separation on conveyor belts [J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 6975.
[12] 马学杰, 刘敏, 侯占峰, 等. 小粒牧草种子丸粒化包衣数值模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(2): 43 - 52.
MA Xuejie, LIU Min, HOU Zhanfeng, et al. Numerical simulation and experimental study on the pelletized coating of small grain forage seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(2): 43 - 52. (in Chinese)
[13] 惠云婷, 席军辉, 王守炎, 等. 一种小微粒种子多环境胁迫适应及丸粒化工厂化处理方法: 202510178243.2[P]. 2025 - 04 - 11.
[14] 张帅扬, 吕程序, 白圣贺, 等. 油菜种子甩盘式丸化加工试验与参数优化[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊2): 131 - 140.
ZHANG Shuaiyang, LÜ Chengxu, BAI Shenghe, et al. Processing test and parameter optimization on rotary disc pelleting machine for rapeseeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 2): 131 - 140. (in Chinese)
[15] HAO Linjie, YOU Yong, HUI Yunting, et al. Structure optimization of gliding arc electrodes for seed treatment based on the study of plasma distribution characteristics[J]. Agriculture, 2024, 14: 1379.
[16] HUI Yunting, WANG Decheng, YOU Yong, et al. Effect of low temperature plasma treatment on biological characteristics and yield components of wheat seeds (*Triticum aestivum* L.)[J]. Plasma Chem Plasma Process, 2020, 40: 1555 - 1570.
[17] 王德成, 黄晨, 尤泳, 等. 基于等离子体处理的苜蓿种子活力综合评价[J]. 农业工程学报, 2024, 40(22): 234 - 242.
WANG Decheng, HUANG Chen, YOU Yong, et al. Comprehensive evaluation of alfalfa (*Medicago sativa* L.) seed vitality based on plasma treatment[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(22): 234 - 242. (in Chinese)
[18] 王瑞雪, 叶巴丁, 孔祥号, 等. 低温等离子体表面强化技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2021, 57(12): 192 - 207.
WANG Ruixue, YE Bading, KONG Xianghao, et al. Research progress of low temperature plasma surface strengthening technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(12): 192 - 207. (in Chinese)
[19] PARK S, CHOI Y B, SEOL B Y, et al. Low-temperature plasma modulates seed germination through reactive oxygen species in dose-dependent manner[J]. Free Radical Research, 2025, 59(6 - 7): 1 - 12.
[20] 李想, 张梦, 刘春增, 等. 等离子体处理对紫云英种子萌发和生理特性的影响[J]. 草业学报, 2023, 32(10): 129 - 140.
LI Xiang, ZHANG Meng, LIU Chunzeng, et al. Effects of dialectric barrier discharge plasma treatment on seed germination and physiological characteristics of *Astragalus sinicus*[J]. ACTA Prataculturae Sinica, 2023, 32(10): 129 - 140. (in Chinese)
[21] 谢建华, 张洪梁, 冯浩, 等. 摩擦调节式小区小麦精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(1): 164 - 173.
XIE Jianhua, ZHANG Hongliang, FENG Hao, et al. Design and experiment of friction adjustable precision seed feeder device for wheat experimental sowing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 164 - 173. (in Chinese)
[22] XIE Chunji, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Precision seeding parameter monitoring system based on laser sensor and wireless serial port communication[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 190: 106429.
[23] 顿国强, 毛宁, 刘文辉, 等. 四杆平移式大豆小区育种排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 70 - 78.
DUN Guoqiang, MAO Ning, LIU Wenhui, et al. Design and experiment of four-bar translational seed metering device for

soybean plot breeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(4):70 - 78. (in Chinese)
[24] 尚书旗, 吴秀丰, 杨然兵, 等. 小区育种播种装备与技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 1 - 20.
SHANG Shuqi, WU Xiufeng, YANG Ranbing, et al. Research status and prospect of plot-sowing equipment and technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(2):1 - 20. (in Chinese)
[25] 杨昌敏, 赵帮泰, 程方平, 等. 播种监控技术研究现状与展望[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(9): 345 - 352.
YANG Changmin, ZHAO Bangtai, CHENG Fangping, et al. Research status and prospect of sowing monitoring technology [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2024,45(9):345 - 352. (in Chinese)
[26] 丁幼春, 王凯阳, 刘晓东, 等. 中小粒径种子播种检测技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 30 - 41.
DING Youchun, WANG Kaiyang, LIU Xiaodong, et al. Research progress of seeding detection technology for medium and small- size seeds[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(8):30 - 41. (in Chinese)
[27] LI Yunxia, ZHAO Zhang, AZIZI A, et al. Seeding detection and distribution evaluation using the developed automatic maize seeding machine[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2024,220:108872.
[28] 陈文星, 万其号, 高英杰, 等. 苜蓿种子收获机械研究现状及问题探讨[J]. 农机化研究, 2023, 45(12): 1 - 6.
CHEN Wenxing, WAN Qihao, GAO Yingjie, et al. Discussion on problems existing in mechanical harvesting of alfalfa seeds [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2023,45(12):1 - 6. (in Chinese)
[29] 潘烤鑫, 张庆, 尤泳,等. 小粒径苜蓿种子机械梳脱增流式收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2): 342 - 356.
PAN Kaoxin, ZHANG Qing, YOU Yong, et al. Design and experiment of flow-enhanced mechanical combining harvester for small-seeded alfalfa[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 342 - 356. (in Chinese)
[30] 游兆延, 颜建春, 吴惠昌, 等. 稻田绿肥紫云英种子联合收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊2): 1 - 10.
YOU Zhaoyan, YAN Jianchun, WU Huichang, et al. Design and experiment of seed combine harvester for chinese milk vetch green manure in paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(Supp. 2):1 - 10. (in Chinese)
[31] 兰凌霄, 李凤鸣, 王强, 等. 基于 CFD 的牧草种子收获机沉降箱体改进设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊2): 150 - 155, 172.
LAN Lingxiao, LI Fengming, WANG Qiang, et al. Improvement design and experiment of settlement box of forage grass seed harvester based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(Supp. 2):150 - 155, 172. (in Chinese)
[32] 陈海霞. 苜蓿种子柔性梳脱装置的设计与试验[J]. 农机化研究,2023,45(10):159 - 165.
CHEN Haixia. Design and experiment of the flexible combing-stripping device of alfalfa seed[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2023,45(10):159 - 165. (in Chinese)
[33] 李凤鸣, 刘贵林, 张英俊, 等. 自走式牧草种子收获机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2023, 45(4): 66 - 73.
LI Fengming, LIU Guilin, ZHANG Yingjun, et al. Design and experiment of self-propelled grass seed harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2023,45(4):66 - 73. (in Chinese)
[34] QING Yiren, CHEN Lu, CHEN Dongquan, et al. Simulation and optimization of a self-cleaning device for the header of a rice seed harvester using fluent-EDEM coupling[J]. Agriculture,2024,14(12):2312.
[35] TIAN Fuyang, ZHANG Yinuo, SOOMRO S A, et al. SSOD - MViT: a novel model for recognizing alfalfa seed pod maturity based on semi-supervised learning[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2025,236:110439.
[36] 贺长彬. 天然草地土壤-根系复合体与窄齿类耕作部件作用关系研究[D]. 北京:中国农业大学, 2018.
HE Changbin. Interaction relationship research of soil - root composite and narrow tillage tools on natural grassland[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
[37] 尤泳. 退化羊草草地机械化破土切根改良技术优化研究[D]. 北京:中国农业大学, 2011.
YOU Yong. Optimization of mechanized subsurface tillage for rehabilitating degraded *Leymus chinensis* grasslands[D]. Beijing: China Agricultural University, 2011. (in Chinese)
[38] 张学宁. 羊草草地根土复合体板结层失效机理及机械化改良技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2024.
ZHANG Xuening. The failure mechanism and mechanized improvement technology of root-soil composite compacted layer in *Leymus chinensis* grassland[D]. Beijing: China Agricultural University, 2024. (in Chinese)
[39] 贺长彬,尤泳,王德成,等. 退化草地复合体力学特性与影响因素研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 79 - 89.
HE Changbin, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Mechanical characteristics of soil-root composite and its influence factors in degenerated grassland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 79 - 89. (in Chinese)
[40] 张学宁,王德成,尤泳,等. 草地切根下根土复合体本构关系研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 337 - 346.
ZHANG Xuening, WANG Decheng, YOU Yong, et al. Constitutive relationship of soil-root composite based on root-cutting of grassland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(7):337 - 346. (in Chinese)
[41] 张学宁,尤泳,王得伟,等. 板结羊草草地切根松土镇压机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(增刊1): 135 - 146, 164.
ZHANG Xuening, YOU Yong, WANG Dewei, et al. Design and experiment of root-cutting and subsoiler for compacted *Leymus chinensis* grassland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(Supp. 1):135 - 146,164. (in Chinese)

[42] 张学宁,尤泳,王昭宇,等. 板结羊草地折翼式松土铲优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(5): 213 - 221.
ZHANG Xuening, YOU Yong, WANG Zhaoyu, et al. Optimization design and experiment of folded-wing subsoiler for compacted *Leymus chinensis* grassland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(5):213 - 221. (in Chinese)

[43] 张学宁,尤泳,王德成,等. 基于离散元法的板结草地破土切根刀优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 176 - 187.
ZHANG Xuening, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Design and experiment of soil-breaking and root-cutting cutter based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(11):176 - 187. (in Chinese)

[44] 王昭宇,尤泳,贺长彬,等. 退化羊草地切根释压松土工艺研究与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(12): 404 - 417.
WANG Zhaoyu, YOU Yong, HE Changbin, et al. Research and experiment on loosening soil by cutting roots to release pressure for degraded *Leymus chinensis* grassland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024, 55(12):404 - 417. (in Chinese)

[45] ASHWORTH A J, MOORE P A, POTE D H, et al. Conservation management practices reduce non-point source pollution from grazed pastures[J]. Heliyon,2021,7(2):e06238.

[46] 尤泳,王德成,王光辉. 9QP - 830 型草地破土切根机[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 61 - 67.
YOU Yong, WANG Decheng, WANG Guanghui. 9QP - 830 soil-gashing and root-cutting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(10):61 - 67. (in Chinese)

[47] 尤泳,贺长彬,王德成,等. 土壤耕作部件极窄刀齿与土壤作用关系研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 50 - 58.
YOU Yong, HE Changbin, WANG Decheng, et al. Interaction relationship between soil and very narrow tine during penetration process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(6):50 - 58. (in Chinese)

[48] 梁方,王德成,尤泳,等. 草地切根施肥补播复式改良机设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(1): 231 - 241.
LIANG Fang, WANG Decheng, YOU Yong, et al. Design and experiment of root-cutter with fertilization and reseeding compound remediation machine for grassland[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition),2022,52(1):231 - 241. (in Chinese)

[49] 梁方,王德成,尤泳,等. 草地切根施肥补播开沟装置的设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2018, 37(1): 108 - 114.
LIANG Fang, WANG Decheng, YOU Yong, et al. Design and testing of an integrated root-cutting, fertilizing, reseeding, and furrow-opening implement for grassland improvement[J]. Journal of Huazhong Agricultural University,2018,37(1):108 - 114. (in Chinese)

[50] 天然牧草地免耕补播技术规程:DB5133/T 78—2024[S]. 2024.

[51] 廖洋洋. 苜蓿-无芒雀麦螺旋供种气送集排混播技术与装置研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2025.
LIAO Yangyang. Research on the technology and device of spiral feeding and air-blown centralized seeding for mixed sowing of alfalfa and awnless brome[D]. Beijing: China Agricultural University, 2025. (in Chinese)

[52] LI Jiamei, ZHANG Chaobo, ZHANG Qiang, et al. Exploring the influence of alfalfa root reinforcement on the loess slopes reliability analysis[J]. Natural Hazards,2025,121(5):6339 - 6356.

[53] MAO Zhengjun, BI Yinli, GENG Mimi, et al. Pull-out characteristics of herbaceous roots of alfalfa on the loess in different growth stages and their impacts on slope stability[J]. Soil and Tillage Research,2023,225:105542.

[54] 康佳惠,邹璨阳,郑敏娜,等. 紫花苜蓿生长年限对根系分泌物和土壤微生态的影响[J]. 中国草地学报, 2024, 46(9): 65 - 75.
KANG Jiahui, ZOU Canyang, ZHENG Minna, et al. Effects of growth years of alfalfa on root exudates and soil microecology [J]. Chinese Journal of Grassland,2024,46(9):65 - 75. (in Chinese)

[55] WU Bei, SHI Shangli, LIU Linbo, et al. Cinnamate 4-hydroxylase (MsC4H) mediates the biosynthesis of autotoxic substance scopoletin in alfalfa (*Medicago sativa*)[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2025,319:145398.

[56] YAN Wei, WAN Tao, WANG Zhennan. Effects of continuous cropping on seed germination and seedling growth, physiological characters of alfalfa[J]. Legume Research,2022,45(11):1434 - 1439.

[57] BRUNA B, ZHANYOU X, SAMADANGLA A, et al. Phenotyping seedlings for selection of root system architecture in alfalfa (*Medicago sativa* L.)[J]. Plant Methods,2021,17(1):125.

[58] 马文鹏,尤泳,王德成,等. 多年生苜蓿地切根补播机低阻松土铲设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 86 - 95.
MA Wenpeng, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Design and experiment of low-resistance soil loosening shovel for cutting roots and reseeding in perennial alfalfa field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(2): 86 - 95. (in Chinese)

[59] 赵小娜,王斌,王腾飞,等. 补播不同播量燕麦对退化苜蓿草地生产性能和营养品质的影响[J]. 中国草地学报, 2024, 46(12): 67 - 74.
ZHAO Xiaona, WANG Bin, WANG Tengfei, et al. Effects of different seeding amounts of oat reseeding on production performance and nutritional quality of degraded alfalfa grassland[J]. Chinese Journal of Grassland,2024,46(12):67 - 74. (in Chinese)

[60] 马文鹏,尤泳,王德成,等. 苜蓿切根补播施肥机气送式集排系统优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 70 - 78.
MA Wenpeng, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Optimal design and experiment of pneumatic and pneumatic collecting and discharging system of alfalfa cut-root reseeding and fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(9):70 - 78. (in Chinese)

[61] JIN Qiao, YOU Yong, WANG Haiyi, et al. Calibration and experimental verification of finite element parameters for alfalfa

conditioning model[J]. Agriculture,2024,14(10):1724.
[62] 祝露. 自适应柔性接地仿形越障割草机关键技术研究与试验[D]. 北京: 中国农业大学, 2023.
ZHU Lu. Research and experiment on key technologies of adaptive flexible grounding and obstacle crossing mower[D]. Beijing: China Agricultural University, 2023. (in Chinese)
[63] 付作立. 双圆盘式刈割压扁机切割系统研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
FU Zuoli. Study on cutting system for two discs mower conditioner[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
[64] MOHAMED R, TAREK K A, HASSAN A A S, et al. Wear behavior and CO_2 emissions analysis of drum mower blades during alfalfa harvest[J]. SN Applied Sciences,2023,5(12):316.
[65] 高东明,黄志刚,李杰,等. 紫花苜蓿茎秆和叶片的解吸等温线模型及参数优化[J]. 草地学报, 2017, 25(4): 851 - 856.
GAO Dongming, HUANG Zhigang, LI Jie, et al. Water desorption isotherm models and parameters optimization of alfalfa (*Medicago sativa*) stems and leaves[J]. ACTA Agrestia Sinica,2017,25(4):851 - 856. (in Chinese)
[66] 金峤,尤泳,王德成,等. 苜蓿收割调制机六边异形齿压扁辊设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(12): 239 - 248.
JIN Qiao, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Design and experiment of conditioning roller for alfalfa mower conditioner based on hexagonal irregular teeth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(12):239 - 248. (in Chinese)
[67] 王新彦,江泉,吕峰,等. 基于参数化模型的零转弯半径割草机侧翻稳定性[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(5): 1908 - 1918.
WANG Xinyan, JIANG Quan, LÜ Feng, et al. Rollover stability of zero turning radius lawn mower based on parametric model[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition),2021,51(5):1908 - 1918. (in Chinese)
[68] 付作立,王德成,李卫,等. 双圆盘式苜蓿旋转切割器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊1): 214 - 220.
FU Zuoli, WANG Decheng, LI Wei, et al. Design and experiment of two-disc rotary mower of alfalfa[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(Supp.1):214 - 220. (in Chinese)
[69] 祝露,尤泳,王德成,等. 悬挂式割草机折叠机构优化与液压仿形系统研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 122 - 130.
ZHU Lu, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Optimal design and experiment of folding mechanism and hydraulic profiling system of hanging mower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(9):122 - 130. (in Chinese)
[70] 罗金海,王振华,李志杰,等. 牵引式V形折叠搂草翻晒机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊1): 107 - 112.
LUO Jinhai, WANG Zhenhua, LI Zhijie, et al. Design and experiment of trail-type V-shape folding hay rake[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(Supp.1):107 - 112. (in Chinese)
[71] 高连兴,梁港平,蔡依琳,等. 铲齿-双滚筒组合式花生捡拾装置研制[J]. 农业工程学报, 2024, 40(12): 13 - 22.
GAO Lianxing, LIANG Gangping, CAI Yilin, et al. Pickup device with shovel teeth and double cylinders for the bunch of peanuts[J]. Transactions of the CSAE,2024,40(12):13 - 22. (in Chinese)
[72] 仝振伟,李洪文,卢彩云,等. 直注式秸秆捡拾粉碎深埋机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 83 - 95.
TONG Zhenwei, LI Hongwen, LU Caiyun, et al. Design and experiment of direct-injection straw picking and crushing deep burying machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(7):83 - 95. (in Chinese)
[73] 许涛,刘志侠,高连兴,等. 曲柄-滑道-弹齿滚筒式花生捡拾机构设计与参数优化[J]. 农业工程学报, 2024, 40(4): 62 - 71.
XU Tao, LIU Zhixia, GAO Lianxing, et al. Design and optimization of crank-slide type spring-finger cylinder peanut pickup mechanism[J]. Transactions of the CSAE,2024,40(4):62 - 71. (in Chinese)
[74] 梅方炜,张志毅,李旭东,等. 果园秸秆覆盖机弹齿式解捆防堵装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(11): 25 - 34.
MEI Fangwei, ZHANG Zhiyi, LI Xudong, et al. Spring-tooth type unbaling anti-blocking device for orchard straw mulching machine[J]. Transactions of the CSAE,2023,39(11):25 - 34. (in Chinese)
[75] 曹鑫鹏,王庆杰,李洪文,等. 主动旋转集行式清秸装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(6): 26 - 34.
CAO Xinpeng, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Design and experiment of active rotating collective straw-cleaner[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(6):26 - 34. (in Chinese)
[76] 王申莹,胡志超,徐弘博,等. 全喂入式花生捡拾收获机捡拾输送装置研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 20 - 28.
WANG Shenying, HU Zhichao, XU Hongbo, et al. Design and test of pickup and conveyor device for full-feeding peanut pickup harvester[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(19):20 - 28. (in Chinese)
[77] 付乾坤,付君,陈志,等. 秸秆捡拾打捆机振动去土作业参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 26 - 33.
FU Qiankun, FU Jun, CHEN Zhi, et al. Optimization of working parameters on soil removal of stover pickup baler by vibration[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(8):26 - 33. (in Chinese)
[78] ZHAO Zhan, HUANG Hedong, YIN Jianjun, et al. Dynamic analysis and reliability design of round baler feeding device for rice straw harvest[J]. Biosystems Engineering,2018,174:10 - 19.
[79] LI Sibiao, ZHANG Xiaohang, MA Pengbo, et al. A review of research progress in the compaction of major crop waste by mechanical equipment[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2025,213:115484.
[80] 张姬,耿浩,耿爱军,等. 卡扣式方草捆打结器的集成与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 64 - 68.
ZHANG Ji, GENG Hao, GENG Aijun, et al. Integration and experiment of clip bale knotter[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(6):64 - 68. (in Chinese)

[81] 张安琪,冯洋洋,董浩,等. D 型打结器夹绳盘-打结嘴空间角度参数分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 100 - 109.
ZHANG Anqi, FENG Yangyang, DONG Hao, et al. Parameter analysis of spatial angle about rope-cliping and hook of D-knotter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(8):100 - 109. (in Chinese)
[82] 马赛,李凤鸣,钱旺. 基于 TRIZ 理论的 D 型打结器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊 1): 327 - 331.
MA Sai, LI Fengming, QIAN Wang. Design of D-type knotter based on triz theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(Supp. 1):327 - 331. (in Chinese)
[83] 尹建军,刘丹萍,李耀明. 方捆机捡拾器高度自动仿形装置参数分析与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 86 - 92.
YIN Jianjun, LIU Danping, LI Yaoming. Design and parameters analyses of automatic height profiling device of quadrate-bale baler pickup[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(8):86 - 92. (in Chinese)
[84] 尹建军,王新新,高强. 打结器连续打结试验方法与疲劳试验台设计[J]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 84 - 91.
YIN Jianjun, WANG Xinxin, GAO Qiang. Continuous knot-tying test method of knotter and knotter fatigue test bench design [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(10):84 - 91. (in Chinese)
[85] SHANG Yehua, MENG Zhijun, CONG Yue, et al. Development of a control system with remote monitoring function for round baler[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2021,182:106044.
[86] 郭辉,高国民,周伟,等. 轮式自走方捆打捆机行走速度控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 107 - 114.
GUO Hui, GAO Guomin, ZHOU Wei, et al. Design and test of automatic control system for walking speed of wheeled self propelled square baler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(12):107 - 114. (in Chinese)
[87] MAHDI V, MICHAEL N, CLAUSG S. A system for optimizing the process of straw bale retrieval[J]. Sustainability,2021, 13(14):7722.
[88] TOMÁS C, JOHN W, CONOR S, et al. On the limit: estimating round baler torque for grass harvesting scenarios[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2025,232:110056.
[89] WANG Junyue, LI Xuying, HUANG Wei, et al. Mathematical model for bale-density prediction in large steel roller-type round balers during bale rolling[J]. Bioresource Technology,2024,396:130445.
[90] 尤泳,马朋勃,陈科,等. 基于卷压力的圆捆机成捆密度监测系统设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(9): 158 - 166.
YOU Yong, MA Pengbo, CHEN Ke, et al. Design and experiment of density monitoring system for round baler based on rolling pressure[J]. Journal of China Agricultural University,2024,29(9):158 - 166. (in Chinese)
[91] 张安琪,孟志军,陈立平,等. 小型方捆机草捆动态称量系统信号分析与处理[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2): 243 - 248.
ZHANG Anqi, MENG Zhijun, CHEN Liping, et al. Design and experiment of dynamic weighing system for small square baler [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp. 2):243 - 248. (in Chinese)
[92] COBLENTZ W K, AKINS M S. Silage review: recent advances and future technologies for baled silages[J]. Journal of Dairy Science,2018,101(5):4075 - 4092.
[93] 罗帅,孙志民,张莉,等. 饲草缠膜装备发展现状及展望[J]. 农业装备与车辆工程, 2023, 61(4): 30 - 35.
LUO Shuai, SUN Zhimin, ZHANG Li, et al. Development status and prospect of forage wrapping equipment[J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering,2023,61(4):30 - 35. (in Chinese)
[94] 杨莉. 牧草割草机研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(11): 35 - 40, 72.
YANG Li. Research situation and development tendency of herbage mower[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019,40(11):35 - 40, 72. (in Chinese)
[95] 王海翼. 仿生河狸门齿青饲料切碎刀具设计方法及滑切特性研究[D]. 北京:中国农业大学, 2025.
WANG Haiyi. Study on bionic design method and sliding cutting characteristics of silage chopping blade for beaver incisors [D]. Beijing: China Agricultural University, 2025. (in Chinese)
[96] 陈美舟,徐广飞,宋志才,等. 青贮玉米收获机平板式动刀自动磨削装置及控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(1): 22 - 33.
CHEN Meizhou, XU Guangfei, SONG Zhicai, et al. Design and experiments of the automatic grinding device and control system for the flat moving blade of silage maize harvesters[J]. Transactions of the CSAE,2022,38(1):22 - 33. (in Chinese)
[97] 尤泳,李芳旭,纪中良,等. 基于旋转目标检测的青贮机精准抛送系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(21): 36 - 45.
YOU Yong, LI Fangxu, JI Zhongliang, et al. Design and experiment of the precise throwing system for silage machines based on rotating target detection[J]. Transactions of the CSAE,2024,40(21):36 - 45. (in Chinese)
[98] 沈帅,何义川,汤智辉,等. 果园行株间避障割草机的设计与试验[J/OL]. 甘肃农业大学学报,2025: 1 - 11. https://link.cnki.net/urlid/62.1055.s.20240511.1514.014.
SHEN Shuai, HE Yichuan, TANG Zhihui, et al. Design and testing of an orchard obstacle-avoidance grass cutting and sweeping machine[J/OL]. Journal of Gansu Agricultural University,2025: 1 - 11. https://link.cnki.net/urlid/62.1055.s.20240511.1514.014. (in Chinese)
[99] 冯志超. 打捆包膜一体机半挂式底盘与上料系统设计及试验[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
FENG Zhichao. Design and test of semi-railer chassis and feeding system of the baling and wrapping machine[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020. (in Chinese)
[100] PAGE HARRISON H. Preservation of large round bales at high moisture[J]. Transactions of the ASAE,1985,28(3):675 - 679.

[101] 杜韧,孟奇凯,赵忠贤,等. 新型圆草捆缠膜机设计及试验研究[J]. 机械设计, 2019, 36(增刊2): 59 - 62.
DU Ren, MENG Qikai, ZHAO Zhongxian, et al. Design and experimental study of diameter adjustable round straw wrapper [J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(Supp. 2): 59 - 62. (in Chinese)
[102] 孙庆运,于启娜,贾振超,等. 牧草干燥技术与装备研究进展[J]. 草地学报, 2022, 30(1): 1 - 11.
SUN Qingyun, YU Qina, JIA Zhenchao, et al. Research progress of forage drying technology and equipment[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(1): 1 - 11. (in Chinese)
[103] 孙榆欢,张克平,张鹏,等. 人字橡胶辊式苜蓿压扁调制装置设计与试验[J]. 草业科学, 2023, 40(6): 1695 - 1704.
SUN Yuhuan, ZHANG Keping, ZHANG Peng, et al. Design of and experiment on herringbone rubber roller flattening and conditioning mechanism for alfalfa[J]. Pratacultural Science, 2023, 40(6): 1695 - 1704. (in Chinese)
[104] 邬备,王德成,王光辉,等. 割草机切割压扁装置运行参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 76 - 83.
WU Bei, WANG Decheng, WANG Guanghui, et al. Optimization and experiments of cut-condition device working parameter on mower conditioner[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 76 - 83. (in Chinese)
[105] 刘丽英,贾玉山,范文强,等. 影响苜蓿自然干燥的主要环境因子研究[J]. 草业学报, 2022, 31(2): 121 - 132.
LIU Liying, JIA Yushan, FAN Wenqiang, et al. An investigation of the main environmental factors affecting the natural drying of alfalfa for hay, and hay quality[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(2): 121 - 132. (in Chinese)
[106] CHITSUTHIPAKORN K, THANAPORNPOONPONG S. Effect of large-scale paddy rice drying process using hot air combined with radio frequency heating on milling and cooking qualities of milled rice[J]. Foods, 2022, 11(4): 519.
[107] LINGAYAT A, BALIJEPALLI R, CHANDRAMOHAN V P. Applications of solar energy based drying technologies in various industries—a review[J]. Solar Energy, 2021, 229: 52 - 68.
[108] ALOMAR D, FUCHSLOCHER R, DE PABLO M. Effect of preparation method on composition and NIR spectra of forage samples[J]. Animal Feed Science and Technology, 2003, 107(1 - 4): 191 - 200.
[109] DONNELLY D M, DÓREA J R R, YANG H, et al. Technical note: comparison of dry matter measurements from handheld near-infrared units with oven drying at 60℃ for 48 hours and other on-farm methods[J]. Journal of Dairy Science, 2018, 101(11): 9971 - 9977.
[110] 胡亚强,苑亚,杨鲁伟,等. 苜蓿薄层干燥特性及颜色和品质[J]. 草业科学, 2022, 39(9): 1861 - 1868.
HU Yaqiang, YUAN Ya, YANG Luwei, et al. Study on thin layer drying characteristics and color and quality of alfalfa[J]. Pratacultural Science, 2022, 39(9): 1861 - 1868. (in Chinese)
[111] 刘丽英,贾玉山,王志军,等. 苜蓿干燥过程中叶绿素与营养物质含量的变化及相关性[J]. 中国草地学报, 2021, 43(11): 60 - 68.
LIU Liying, JIA Yushan, WANG Zhijun, et al. The law and correlation of chlorophyll and nutrient content changes during alfalfa drying[J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(11): 60 - 68. (in Chinese)
[112] CHAKRAVARTULA S S N, BANDIERA A, NARDELLA M, et al. Computer vision-based smart monitoring and control system for food drying: a study on carrot slices[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 206: 107654.
[113] WANG Dong, WANG Yong, NIU YAO, et al. Development of an intelligent control system of high efficiency and online monitoring for hot air drying of peony flowers[J]. Journal of Food Science, 2025, 90(1): e17652.
[114] PEI Yongsheng, LI Zhenfeng, LING Caijin, et al. An improvement of far-infrared drying for ginger slices with computer vision and fuzzy logic control[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2022, 16(5): 3815 - 3831.
[115] 李震,李志强,张冬会,等. 单轴压缩下沙柳颗粒致密成型力链特性[J]. 林业工程学报, 2023, 8(2): 124 - 130.
LI Zhen, LI Zhiqiang, ZHANG Donghui, et al. Characterization of dense forming force chain of salix granules under uniaxial compression[J]. Journal of Forestry Engineering, 2023, 8(2): 124 - 130. (in Chinese)
[116] 宁廷州,俞国胜,皮森淼,等. 对辊柱塞式成型机成型参数优化[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 208 - 215.
NING Tingzhou, YU Guosheng, PI Senmiao, et al. Optimization of forming parameters on roller briquetting machine with plungers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 208 - 215. (in Chinese)
[117] 邓尧,那日苏,贾开发,等. 环模制粒机原理及其发展[J]. 科技与创新, 2023(3): 9 - 11.
DENG Yao, NA Risu, JIA Kaifa, et al. Working principles and evolutionary trajectory of ring die pellet mills[J]. Science and Technology and Innovation, 2023(3): 9 - 11. (in Chinese)
[118] 黄晓鹏,万芳新,黄建龙,等. 基于挤压模拟试验的苜蓿草颗粒成型工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 354 - 358.
HUANG Xiaopeng, WAN Fangxin, HUANG Jianlong, et al. Parameter optimization of granulated alfalfa pelleting process based on extrusion simulation experiment[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 354 - 358. (in Chinese)
[119] 周晓杰,王春光. 压缩条件对苜蓿草径向受力的影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(2): 115 - 118.
ZHOU Xiaojie, WANG Chunguang. Effect of compressing conditions on radial force of alfalfa[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(2): 115 - 118. (in Chinese)
[120] 黄晓鹏. 环模制粒机成型工艺及关键部件磨损机理研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2012.
HUANG Xiaopeng. Study on the pelletizing process and wear mechanism for the key components of hoop standard granulator [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012. (in Chinese)
[121] 宁国鹏,王德成,王光辉,等. 苜蓿干燥与茎叶分离设备设计与 CFD 模拟[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 84 - 89.
NING Guopeng, WANG Decheng, WANG Guanghui, et al. Design and CFD simulation of quad-pass rotary drum dryer-separator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 84 - 89. (in Chinese)