

沙生灌木机械化生产技术装备研究现状与发展展望

贺长彬^{1,2} 景红伟¹ 特宾古日布³ 石磊³ 图娜拉³

(1. 内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特 010018;

2. 牧草饲料生产全程智能化装备内蒙古自治区工程研究中心, 呼和浩特 010018;

3. 杭锦旗农牧技术推广中心, 鄂尔多斯 017400)

摘要: 沙生灌木是我国推进重点区域沙化土地综合治理的重要树种。本文在总结沙生灌木机械化生产主要技术模式的基础上, 重点对沙生灌木机械化种植、平茬收割和加工技术现状进行了概述, 并阐明了现阶段的问题及未来发展方向。我国沙生灌木产业基本形成了“营造-开采-加工-利用”的生产模式, 涵盖了种植、管理、平茬收割、加工利用等环节, 虽然已经具备了部分沙生灌木生产机械装备, 但仍存在以下问题: 机械化生产环节发展不均衡, 机械装备支撑力不足; 机械装备适用性和可靠性低; 沙生灌木生产机械装备关键技术研发不足, 生产工艺与机械化生产技术联动性差。构建完整的沙生灌木生产全过程机械化技术体系, 加强沙土-沙生灌木-机具相互作用关系理论体系等关键技术研究, 发展沙生灌木生产机械集成化、智能化, 是我国沙生灌木机械化生产技术的发展方向。

关键词: 沙柳; 柠条; 平茬复壮机械; 沙生灌木种植机械

中图分类号: S-1; S22

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)09-0021-21

OSID:



Review of Key Technologies for Mechanized Production of Sandy Shrubs

HE Changbin^{1,2} JING Hongwei¹ TE Binguribu³ SHI Lei³ TU Nala³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China

2. Inner Mongolia Engineering Research Center of Intelligent Equipment for the Entire Process of Forage and Feed Production, Hohhot 010018, China

3. Hangjinqi Agricultural and Animal Husbandry Technology Extension Center, Ordos 017400, China)

Abstract: Sandy shrubs are important tree species to promote the comprehensive management of sandy land in key areas in China. In order to provide references and supports to the development of sandy shrub industry in China, on the basis of summarizing the main technical modes of sandy shrub mechanized production technology, the current status of mechanized planting, harvesting, and processing technology of sandy shrubs was outlined, and the problems and development trends at the present stage were clarified as well. The sandy shrub industry basically formed a planting - harvesting - processing - utilization production mode, covering these links of planting, management, harvesting, processing and utilization. Although there were already some machinery and equipment, certain problems still existed in the current stage, i. e., uneven development of mechanized production links, insufficient machinery and equipment support, low applicability and reliability of mechanical equipment, insufficient research and development of key technologies of sandy shrub production machinery and equipment, poor linkage between process technology and machinery. Establishing complete mechanized technology system for the whole process of sandy shrub production, strengthening the theoretical system of sand - sandy shrub - machinery interaction relationship and other key technology research, and developing the integrated and intelligent sandy shrub production machinery would be the development direction of sandy shrub mechanized production technology in China.

Key words: *Salix psammophila*; korshinsk peashrub; harvester; sandy shrub planter

收稿日期: 2024-05-08 修回日期: 2024-06-10

基金项目: 鄂尔多斯市科技计划项目(2022YY022)和内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划项目(NJYT24046)

作者简介: 贺长彬(1991—), 男, 副教授, 博士, 主要从事草业生产机械化研究, E-mail: changbin_he@imau.edu.cn

0 引言

我国西北地区土地荒漠化和沙漠化现象非常严重,国家林业和草原局发布的“第六次全国荒漠化和沙化调查结果”显示,全国荒漠化和沙化土地面积分别达到 $2.573\,7\times 10^6\text{ km}^2$ 和 $1.687\,8\times 10^6\text{ km}^2$, 主要分布在新疆、内蒙古、西藏、甘肃、青海等省(自治区),其中内蒙古自治区荒漠化和沙漠化土地面积位居全国第2位^[1]。土地荒漠化和沙漠化不仅导致可耕种土地和草场面积减少、农牧业产量锐减^[2],而且使得生态环境恶化、生物多样性减少,威胁生态系统完整性,直接制约经济社会的可持续发展。2012年以来,国家将封山(沙)育林育草、飞播固沙造林种草、退化植被修复(沙地植被更新、沙生灌木平茬、沙地植被生态补水)、人工造林种草及辅助措施,以及配套设施建设,作为推进重点区域沙化土地综合治理的主要修复措施,通过在土地荒漠化和沙漠化重点地区开展防沙治沙活动,以及开展关键技术攻关研究,全国防沙治沙工作取得了明显成效^[3-4]。

以沙柳和柠条为代表的沙生灌木,是实现生物固沙的主要树种,在防风固沙方面有着至关重要的作用,因其生命力顽强,且具有根系发达、耐旱耐风沙、分蘖能力强等特点,许多地方将其作为防沙治沙的首选物种^[5-6]。同时,沙生灌木还是我国西部地区的重要森林资源,是板材、饲草料、生物燃料、造纸和药材等的重要原料^[7]。近些年,国内以构建生态安全屏障为目的,大面积种植沙柳和柠条等沙生灌木,用于制作固沙屏障,并重点开展了沙生灌木机械化平茬复壮方面的技术研究工作,研制了多种类型的沙生灌木平茬机械。国外则主要种植以柳树、杨树等为代表的灌木,用于制作燃料、饲料、工艺品,以及养殖蜜蜂等^[8-9],并围绕灌木的机械化种植、管理、收割和加工利用等开展了大量的研究工作,研制了多种生产环节的作业机械,来提高生产效率,降低作业强度。

本文在阐述沙生灌木机械化生产技术模式的基础上,阐明沙生灌木机械化生产技术路线,并重点对沙生灌木机械化种植、平茬收割和加工利用技术以及相关机械装备进行概述,同时指出我国沙生灌木机械化生产技术及机械装备存在的问题及发展趋势,以期沙生灌木机械化生产技术的发展提供参考。

1 沙生灌木机械化生产主要技术模式

沙生灌木林主要包括天然灌木林和人工灌木林

2种类型,其中天然灌木林植株生长较为分散,且分布不规律,人工灌木林相对规整,是发展沙生灌木产业的主要对象。目前,围绕沙生灌木的资源化利用,已基本形成了“营造-开采-加工-利用”的生产模式,涵盖了种植、管理、收割、加工利用等环节,如图1所示(图中的彩色图标引自文献[10-11])。

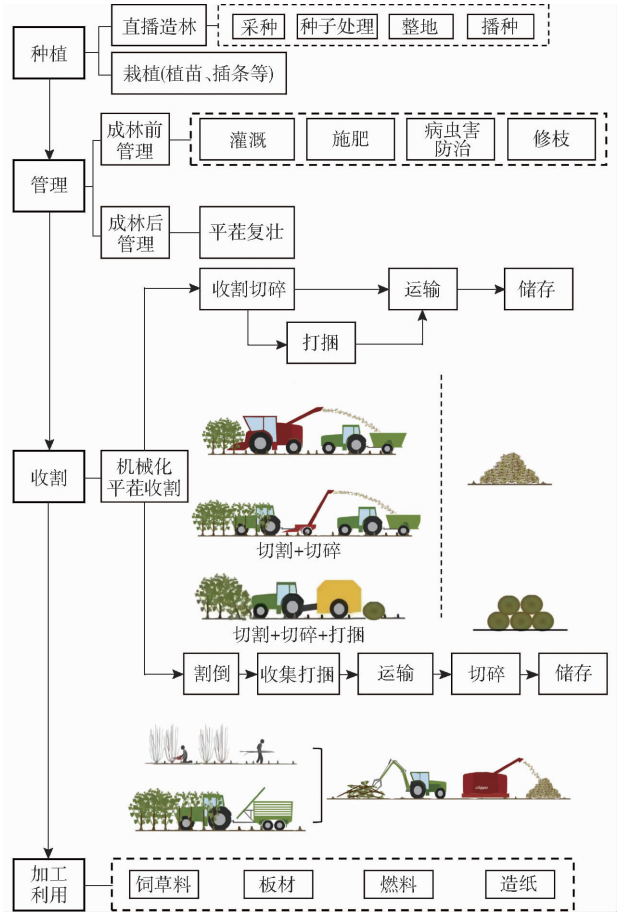


图1 沙生灌木机械化生产关键环节及技术模式

Fig. 1 Key aspects and technical models of mechanized production of sandy shrubs

结合现有的实际生产情况,种植、平茬收割和加工利用是目前沙生灌木机械化生产的关键环节。在机械化种植方面,一方面进行直播造林,以穴播或条播的方式,通过耕整地、播种、田间管理、苗期管理等环节,完成大田育苗与种植,另一方面,主要通过栽植的方式,进行插条和植苗造林^[12]。在平茬收割方面,一般采用整杆收割和切碎收割的方式,其中,整杆收割指的是先将灌木割倒,然后对割倒后的灌木整株收集,运输到指定地点后,进行进一步加工处理;切碎收割指的是收割时直接对灌木进行切割和切碎,通过割台将灌木切割,切割后的灌木直接进入机器的切碎装置进行切碎,将切碎后的灌木碎片运输到指定地点,以便后续加工利用^[13-15]。而在沙生灌木的加工利用方面,主要用于制作饲草料、板材和造纸及能源化利用等^[7]。

2 沙生灌木机械化种植技术

采用直播的方式进行沙生灌木造林时,可直接将种子播到土地表层,对于固定沙地、半固定沙地以及丘陵沟壑地区,常采用穴播的方式,对于地势平缓地区常采用条播的方式,作业时主要包括采种、种子处理、耕整地、播种、抚育管理等环节^[16-18]。其中,在种子采集方面,目前以人工收集的方式为主,在耕整地、播种、除草、灌溉等方面多采用大田作物生产机械进行作业,如条播机、旋耕机、植保灌溉设备等,部分学者还采用种子包衣技术进行沙生灌木播种作业^[19]。由于直播造林方式所用的机械装备主要是利用大田作物生产机械,相关的机具类别现有文献已经有详尽介绍,因此,本文重点对沙生灌木栽植造林机械化生产技术进行阐述。

沙生灌木主要采用植苗和插条等方式进行栽植造林,国内大多在沙地进行,主要用于实现沙区生态恢复和发展沙产业。对于植苗造林,现阶段大多以人工栽植为主,即先通过人工操作小型手持式挖坑机或简易工具构建苗穴,然后人工插入灌木苗完成栽植^[20]。采用的方法主要是微创气流法和螺旋钻法,其中,微创气流方法是以水为动力,在沙地里用水管冲出一个深 1 m 左右的孔洞,再把苗木插入孔内,让苗木与沙土层紧密结合,一次性完成挖坑、栽植、浇水 3 个步骤;螺旋钻法是用带螺旋钻的打孔杆在沙地里打孔,打孔杆连着储水车,可以一边打孔一边给沙土浇水,打孔同时,工作人员顺势在孔中插入苗木,然后再夯实沙土,完成栽种^[21]。

近些年,在国家相关政策和工程的引领下,以沙柳为代表的沙生灌木用于制作生物沙障,在防沙治沙方面起到了显著的作用。“十四五”时期,通过开展技术攻关,研制出了活沙障种植机、网式沙障铺设-灌木扦插造林一体机等沙生灌木栽植机械^[22]。机械栽植的方式多采用插条方式,一般包含开沟、插条、覆土镇压 3 个功能,主要的作业环节如图 2 所示。

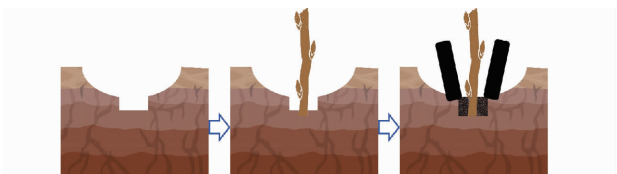


图 2 灌木栽植机械主要作业工序

Fig. 2 Main working processes of sandy shrub planter

如内蒙古宏昌机械制造有限公司^[23]研制的 SC-1 型沙障铺设灌木扦插一体机,作业时开沟深度为 70~80 cm,在铺设可降解材料带状沙障的同时,以人工投放的方式,在带状沙障后的迎风面扦插

灌木沙柳枝条(长度为 80 cm),并进行覆土压实,实现植被当年成活。该机器适用于坡度小于 20°、有 1~2 个主风向的流动沙丘,机具作业现场如图 3 所示。



图 3 SC-1 型沙障铺设灌木扦插一体机

Fig. 3 SC-1 type sandy shrub planter

国外大多通过专用的机械在生长环境较好的土地上栽植柳树和杨树等灌木,一般采用的枝条长度为 20~30 cm。采用的灌木栽植机械主要包含两种类型,一种可直接将枝条较长(≥ 2 m)的灌木苗木进行插条栽植,在作业的过程中,能够同时完成切断枝条和插条栽植的工序,也被称为“Step planter”;另一种是只对切断后的枝条进行插条栽植,在机器作业前需要将枝条切断至适宜的规格^[24]。

例如,Egedal Maskinfabrik 公司^[25]生产的灌木栽植机械(Energy planter),采用三点悬挂装置与拖拉机挂接使用,通过自研的切割插条装置,在液压系统提供动力的基础上,能够同时完成长枝条的喂入、切断和插条工序。作业时,枝条在带式输送装置的作用下,向下喂入约 20 cm 的长度后被切断,切断后的枝条垂直进入到下方开沟器划开的沟中,经过覆土压实完成栽植。该机具实现枝条株距 20~65 cm 可调,适合直径为 0.8~3 cm 的灌木枝条,作业效率为 1.5~3.0 hm^2/h (4 行),其原理图和实物图如图 4 所示。

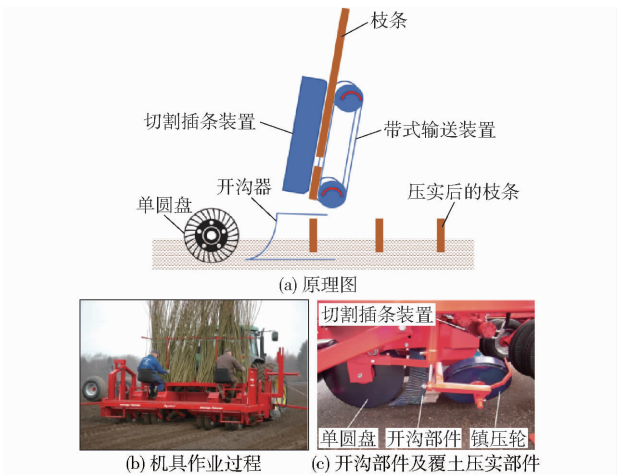


图 4 Egedal 灌木栽植机械

Fig. 4 Egedal energy planter

Nordic Biomass 公司和 Lignovis 公司^[24,26-27]生产的灌木栽植机械也采用直接对长枝条灌木进行插

条栽植的方式,与 Egedal Energy Planter 不同的是,其切割插条装置采用曲柄摆杆机构进行作业,能够同时完成长枝条的喂入、切断、开沟和插条工序。工作时,与拖拉机挂接使用,通过液压马达驱动链轮旋转,链轮转动带动曲柄摆杆机构进行工作,一方面,曲柄摆杆机构带动喂入装置进行工作,实现枝条的连续喂入和切断,另一方面带动切割插条装置下端在土壤中开沟插条,实现灌木枝条被切断后插入到土壤中,最后经过覆土压实完成栽植。机具原理图和实物图如图 5 所示。

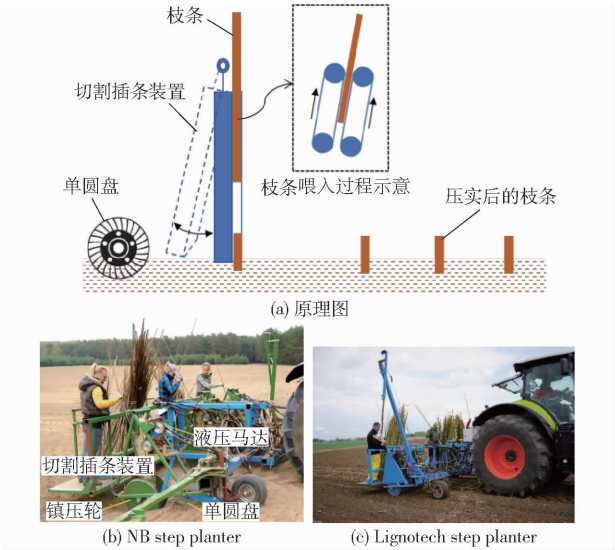


图 5 曲柄摆杆式灌木插条栽植机械

以上两种机具均省去了提前处理枝条的过程,但是对灌木品种和枝条直径有一定的适用范围,对于直径较粗的枝条不适用,且会产生损坏枝条表皮等问题。

第 2 种灌木栽植机械,由于只对切断后的枝条进行插条栽植,因此,相比于第 1 种栽植机械,其对作物的适用范围更广,这些机械在作业时只是将枝条准确地插入到土壤中即可,应用比较广泛。目前,应用较多的主要包含以下 3 种类型:

(1) 投放式栽植机。该种机具作业时,先由开沟部件开沟,然后人工直接将枝条投放到沟中,后经镇压轮覆土压实,完成灌木枝条的插条栽植作业过程^[25]。该机具原理图及实物图如图 6 所示。

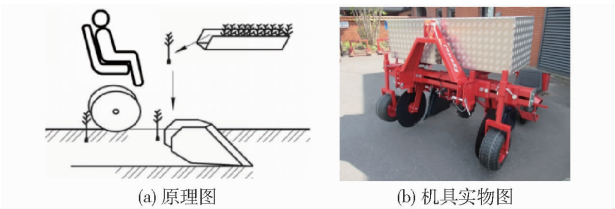


图 6 Egedal JT 系列栽植机

Fig. 6 Egedal JT planter

(2) 夹持式栽植机。该种机具采用旋转的夹持装置进行插条栽植,作业时,人工将枝条正确放入夹持装置中,通过夹持装置旋转,将枝条运移并插入到土壤中^[25]。机具原理图及实物图如图 7 所示。如 Egedal Maskinfabrik 公司设计的两种夹持装置:勺式金属夹持装置和橡胶圆盘夹持装置,通过改变作业时的姿态能够完成枝条的运移和插条过程。夹持装置实物图如图 8 所示。

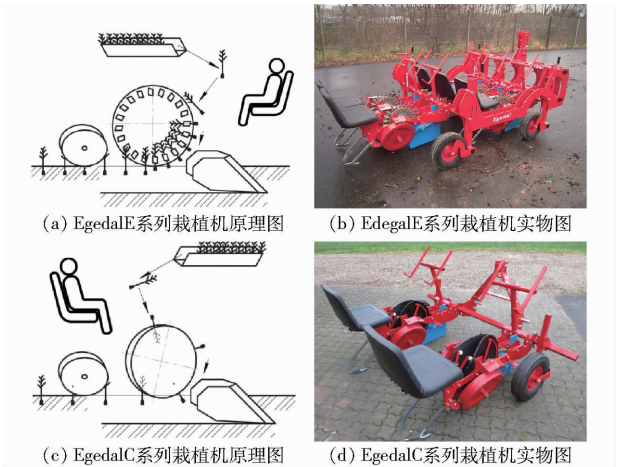


图 7 夹持式栽植机械

Fig. 7 Shrub planters with clamping devices

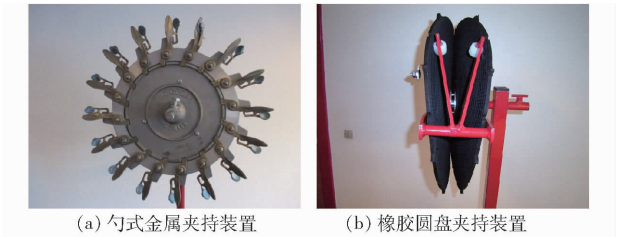


图 8 夹持装置

Fig. 8 Clamping devices

(3) 旋转履带式栽植机。该种机具类似于压路机,通过人工将切断后的枝条放入到履带上面的承载单元,随着机器向前移动,承载单元将枝条插入到土壤中完成栽植过程。如 Wimatec Matter 公司与 WALD21 公司^[28]共同开发的 SP5000 栽植机械、Lignovis 公司^[29]的 LIGNO PLANTER - C 系列栽植机。机具原理图和实物图如图 9 所示。

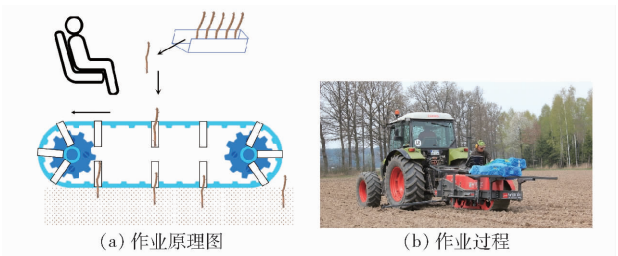


图 9 旋转履带式栽植机械

Fig. 9 Rotor-planter for shrubs

综上所述可以看出,国内沙生灌木采用机械化栽植

造林的方式还处于起步阶段,与国外相比存在一定差距,这与国内沙生灌木的栽植环境有一定关系,国内大多在沙漠或者沙化土地栽植沙生灌木,其生长环境与国外相比更为复杂。同时也可以看到,在进行机械化栽植的过程中,国内外的机械均需要人工参与,劳动强度较大,仍需要进一步发展自动化和智能化栽植技术。

3 沙生灌木机械化平茬收割技术

3.1 沙生灌木平茬技术要求

以柠条和沙柳为代表的沙生灌木,根据其生长特性,每 3~5 年需要对其进行平茬,不然会退化枯死^[30]。对萌蘖能力强的灌木进行平茬复壮,提高生态防护功能,对沙生灌木的正常繁育以及发挥其生态经济功能具有重要意义。沙生灌木机械化平茬技术要求如下:

(1)按期进行平茬作业。沙柳一般 3~5 年需要平茬一次^[31];柠条作为燃料物质时,平茬复壮周期不低于 5~6 年,作为饲料利用时则和沙柳一致;其他类型灌木 6~10 年不等^[32-33]。

(2)选择灌木休眠期平茬。一般为冬末春初,或是灌木生物含量最多时,一般为 4 月或 5 月。

(3)平茬高度要适宜。沙柳要求留茬高度一般为 3~5 cm,最长不能超过 7 cm,以便于周围形成土堆,柠条一般不超过 5 cm^[34]。

(4)茬口要求光滑整齐,无撕裂、毛刺等现象。

3.2 沙生灌木机械化平茬收割关键技术

3.2.1 切割理论及切割装置

沙生灌木的切割理论问题可以理解为灌木茎秆与切割装置的界面问题,二者的互动界面内包含 3 个元素,即灌木茎秆、切割装置及接触界面条件,3 个元素均对沙生灌木的切割效果产生直接影响。

从对象来看,沙生灌木茎秆的物理力学特性对切割时的剪切力有直接影响。因此,围绕灌木的切割作业受力方面,众多学者都对灌木茎秆的基本物理力学特性参数进行了分析^[35-37]。如 VARGAS 等^[38]研究了当地 4 种不同品种沙柳的密度、弹性模量、拉伸强度等物理力学参数。REJDAK 等^[39]研究了沙柳压块成型过程的基本参数(压力和温度)对成型压块力学参数的影响。朱珊^[40]对灌木气干密度、抗弯强度、抗弯弹性模量、顺纹抗剪强度等物理力学参数进行了测定,然后设计了灌木切割装置并对其进行了仿真分析。薄仕文^[41]采用同样方法测定灌木顺纹抗拉抗压强度、弹性模量、剪切模量等力学参数。ORLOWSKI 等^[42]从现代断裂力学的角度出发,对灌木切削力进行了研究,指出切削力不仅可

以用来确定韧性,还可以用来确定剪切屈服强度。KWON 等^[43]在分析切割刀具与灌木互作力学关系基础上,提出了无支撑柔性灌木切割理论。CHUCHEEP 等^[44]将层次分析法 (Analytic hierarchical method)应用到切割刀具的选择上,并给出了最佳的选择方案。围绕沙生灌木物理力学特性相关的研究成果主要用于灌木平茬收割机械化作业过程中的仿真分析与关键部件的优化设计。

从作业过程来看,在进行沙生灌木切割平茬作业时,切割过程都是通过切割刀具使得灌木茎秆的纤维层发生相对滑移,最终发生剪切破坏完成切割过程^[45]。这个过程可以视为切割部件与沙生灌木相互作用的过程,可以理解为瞬时互作的过程,一般可以分为以下几个阶段:切割作用发生初始,切割部件与灌木茎秆接触后,刃口对茎秆施加切割力,茎秆在惯性力和地面对根部支持力的作用下产生对切割部件的反作用力,灌木茎秆处于弹性变形阶段,随着切割部件的逐渐深入,茎秆在切割部位产生塑性压缩变形,同时在切割部件带动下产生绕根部的弯曲变形,灌木茎秆由变形的累积发展至局部应力屈服,最终切割应力达到失效条件时,产生失效应变,发生断裂失效,茎秆被切割部件切断^[46-47]。

切割装置是影响机具切割作业性能的关键部件,农业上常用的切割装置主要包括往复式、圆盘式、甩刀式和滚刀式 4 种,各切割装置特点如表 1 所示^[48-49]。

综合现有的沙生灌木平茬收割机械来看,在进行沙生灌木切割时主要包括 3 种切割方式,即往复式、回转式和循环式^[50]。其中,往复式的切割形式是指利用往复直线运动的动刀与固定在机架上的定刀相配合切割灌木茎秆,属于有支承切割;回转式的切割形式是指利用高速回转的圆盘锯片或刀盘,利用较高的转速对灌木茎秆进行切割,属于无支承切割;循环式切割主要是指通过链条切割的方式切割茎秆,链板上安装刀片或切割链,切割部件通过在固定的轨道上循环移动,完成切割过程。典型的切割平茬原理如图 10 所示(仿真图像引自文献^[47])。

利用 3 种切割方式在切割沙生灌木茎秆时,由于往复式切割方式切割阻力大,刃口磨损严重,且存在漏割和重割,以及割茬不平整等问题;而循环式切割部件在沙土地作业困难,保养和修理频繁且麻烦,工作效率低;因此,目前大多采用回转式切割方式切割沙生灌木^[50-52]。切割装置多采用圆盘式结构,有单圆盘配置和双圆盘配置,割刀的形式有刀盘式和锯齿式,一般都是无支承切割的方式,通过高速回转的圆盘锯片,利用较大的切割线速度切割茎秆,切割

表 1 典型切割装置
Tab.1 Typical cutting devices

类型	工作原理	结构形式	切割工具	切割方式	特点
往复式	往复直线运动的动刀片与定刀片配合剪切茎秆(秆)	常由动刀片、定刀片、护刃器、压刃器、摩擦片和刀杆组成	动刀片、定刀片	剪切	惯性力和振动较大,切割阻力大,主要应用于小麦、大豆等农作物秸秆
圆盘式	刀片在旋转运动下滑切茎秆(秆)	由刀片、固定架和主轴组成	圆盘刀或圆盘锯	滑切或锯切	运行较平稳,切割能力强,畜牧机械和玉米收割机上多用,一旦锯齿刃部磨损,切割效果急剧下降
甩刀式	刀具在离心力的作用下甩出,在与前进方向平行的平面内回转,将茎秆切断并拾起抛向后方	由水平横轴、刀盘或刀鞘、刀具、护罩等组成	甩刀	砍切	工作时,会产生偏移和摆动,致使茎秆切碎的长短不一,割茬不整齐。切割冲击大,切割性能较差,落地碎茎秆多
滚刀式	刀具固定在刀轴上,作业时刀轴带动刀具在与前进方向平行的平面内回转,将茎秆切断并拾起抛向后方	由水平横轴、刀具等组成	动刀片	砍切	依靠茎秆的静态惯性和弹力,产生支撑力而被切断。切割力较小,冲击小,割茬整齐,多用于收获玉米、高粱、王草等高茎秆饲草

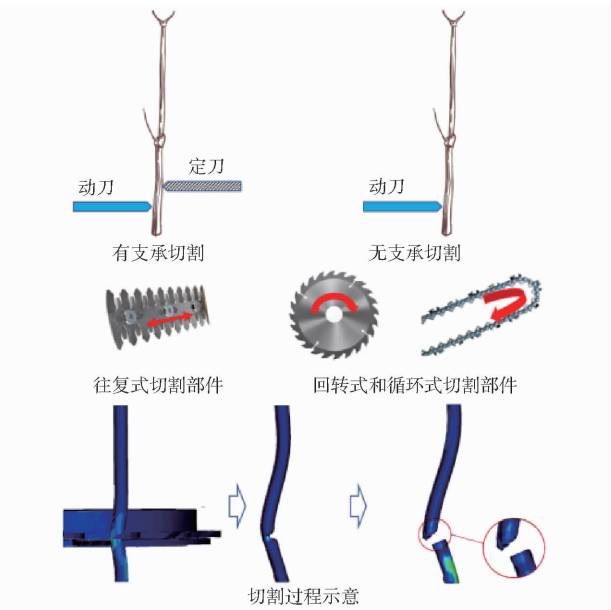


图 10 沙生灌木切割原理图

Fig. 10 Schematic of sandy shrub cutting process

能力强且振动小,具有较好的平茬效果^[53]。

为了提高灌木平茬效率及研发更优的平茬机械,很多学者集中在对沙生灌木的切割界面参数的研究上。一方面主要集中在切割装置的结构参数上,研究人员主要围绕齿数、齿形以及材料等方面开展研究。如文献[34,54–55]研究沙柳与柠条平茬作业中的圆锯片磨损机理,并分析了不同锯片在平茬过程中的锯切力、应力和磨损量等因素的变化过程,在此基础上对锯片结构参数进行了优化。邢东伦等^[56]研究发现锯片齿数增多,齿形变密,柠条平茬效果越好,但当超过一定阈值后,齿强度变弱,抗冲击能力变差,出现断齿。另一方面,研究人员重点研究了机器的工作参数,如前进速度、切割装置的锯切转速以及锯片参数等,通过探究其最优参数,可以

得到最佳的平茬效果^[57]。MENG 等^[58]基于显式动力学仿真和试验研究,研究了圆锯片切割系统的最佳工作参数,为桑树枝干切割作业参数的选取提供了理论依据。薄仕文等^[59]研究了锯片切割装置的振动特性,发现外部激励下产生的振动与进给速度对切割力均有影响,且外部激励下的振动影响更加显著。杨春梅等^[60]以转速、枝径和进给速度为因素,研究了灌木平茬切割系统的关键参数,研究发现圆锯片切割参数对切削质量和工作效率有很大影响,切割速度较大,会使割台振动加大、加剧磨损,缩短锯片使用寿命;切割速度较低,会使灌木产生撕裂,增大切割阻力,并降低平茬效率,且锯切速度与进给速度不匹配也会影响平茬效果。马中祥^[61]通过设计沙生灌木锯切试验台并进行试验,得出了沙柳平茬的最优锯切转速、进给速度和齿数。薄仕文^[41]基于圆锯式灌木切割试验台开展了灌木切割质量试验,确定了最佳锯片转速、进给速度和锯片直径参数组合。

3.2.2 仿形装置

仿形装置在灌木平茬收割作业中能使切割装置适应地形变化,确保切割刀片与地面始终保持一定的高度从而顺利实现平茬收割,同时,可以有效避免切割刀片与地面发生碰撞,减小设备磨损,提高收割质量。目前,割台仿形装置主要包括机械式(滑板式、轮式)和传感电控液压驱动式等类型,大多机械采用人工操作控制与机具自适应仿形相结合的方式实现割台的仿形作业过程^[53]。MANOR 等^[62]研制了一种机械臂式灌木收割机,可通过液压控制机械臂的伸缩,精准控制切割装置与灌木以及地面的距离,具有较好的仿形能力。马阿娟等^[63]提出了一种灌木平茬机械切割装置地面仿形方法,刀架外形仿

照灌木丛根部设计,形状为倒“V”形,切割装置在提升链及仿形支承轮的作用下随地面浮动,同时带动刀具浮动切割及升降,实现了切割仿形,其结构示意图如图 11 所示。冀振等^[64]针对现有的平茬机仿形能力差等问题,设计了一种非平行四连杆仿形机构,获得较为理想的平茬仿形效果,如图 12 所示。管燕燕^[65]设计了一种机、电、液一体化仿形装置,使割台仿形部件能随地表的起伏变化做上下仿形运动,保证割台离地高度在 5 ~ 15 mm 范围内,满足柠条平茬收割的农艺要求。

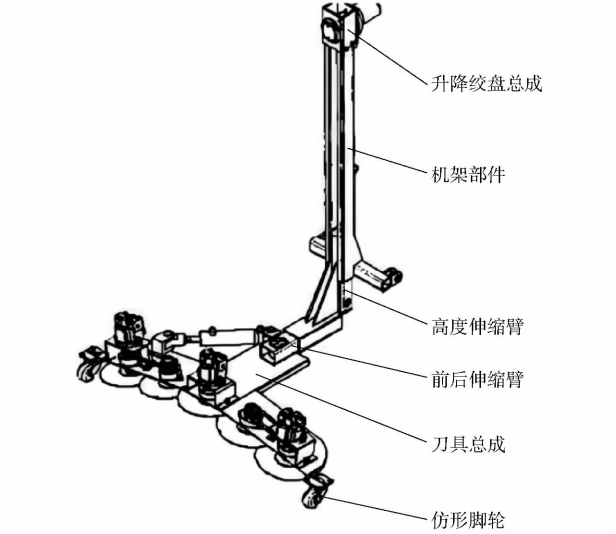


图 11 沙生灌木平茬机仿形切割装置总体结构图

Fig. 11 Overall structure of copying and cutting device of sandy shrub harvester

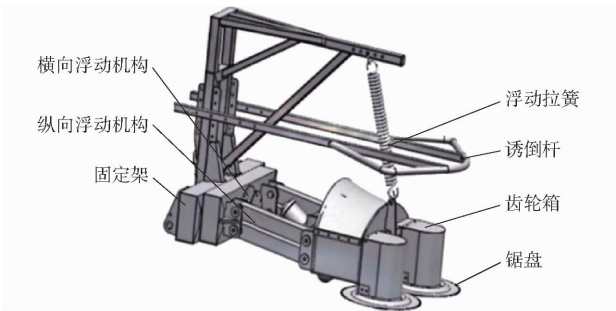


图 12 灌木平茬机仿形切割装置

Fig. 12 Copying and cutting device of sandy shrub harvesting machine

3.2.3 输送喂入与切碎装置

沙生灌木茎秆特性与农作物不同,枝条较长且韧性较强,目前主要采用齿辊结构进行输送,切割后的灌木茎秆在齿辊的作用下有效输送至切碎装置。如段震华^[66]和闫希宇等^[67]采用 3 级齿辊输送,前一级拨齿辊转速略小于后一级,使柠条被拉薄,可以均匀输送,然后进入后面的切碎装置。

切碎装置能够将喂入进来的灌木茎秆进行切削,其关键部件为切碎器。一般用于农作物收获机

械的切碎器多采用滑切的方式进行切碎,刀片大多倾斜安装以保证适宜的滑切角,而对于木质材料的机械多采用正切的方式。切碎器动刀片与定刀片的配置关系、动刀片结构参数、转速及茎秆力学特性,均影响其切碎能力^[53]。通过改变喂入速度和切碎器转速,可以获得所需要的切段长度。在沙生灌木茎秆切碎过程中,广泛采用滚筒式切碎器和盘刀式切碎器,其特点如表 2 所示^[68-69]。

表 2 典型切碎器对比

Tab. 2 Comparison of several chopping devices

	滚筒式切碎器	盘刀式切碎器
结构组成	切碎滚筒、动刀、定刀(常安装在机架或壳体上)	刀盘(一般带抛送叶板)、动刀、定刀(常安装在机架或壳体上)
动刀片形状	螺旋曲面式、平板式、弧面式	直线型、圆弧型(凸曲线、凹曲线)、折线型
适用范围	广泛应用于青饲料收获机上	适用于大多数单行侧悬挂的小功率机型
优缺点	优点:工作负荷均匀、机器振动小、切碎质量好、清洁率高,可获得 3 mm 以上不同的切段长度 缺点:结构复杂、功率消耗较大	优点:质量轻、结构简单、切碎均匀,可获得 3 mm 以上不同的切段长度 缺点:刀轴负荷不均匀、切削阻力变化大、生产率低,刀刃易磨损

3.3 沙生灌木平茬收割机械研究现状

国外对灌木平茬收割机械的研制比较早,且已经取得了一些成就,相关机械用于各种灌木种植林的收获作业。我国对于沙柳等沙生灌木平茬收割机械的研发开始于 20 世纪 60 年代,大多数产品是引进和吸收国外产品,或者在割草机械的基础上改进研发而来^[70]。灌木收割机械的发展主要经历了 4 个阶段,如图 13 所示。



图 13 沙生灌木收割机具发展阶段

Fig. 13 Sandy shrub harvester development stage

现阶段,根据沙生灌木用途的不同,其收获方法也不同,形成的产品也不同。一般灌木机械化收获方法和收获形成的产品如表 3 所示^[71-72]。

综合现有的机械化平茬收割技术来看,沙生灌木平茬收割机械主要包含 3 类。

3.3.1 人工灌木平茬收割机具

通过人工进行灌木平茬收割时,主要以小型和轻便为主,包括小型便携式割灌机、手扶式割灌机和

表 3 国内外典型机械化收获方法及产品
Tab.3 Typical mechanized harvesting methods
and products

收获方法	产品	产品特点
整杆收获	茎杆整杆	茎杆长度超过 8 m
切碎收获	切碎后的木屑	5 cm 左右的碎片
切段收获	茎杆段	长度一般为 5 ~ 15 cm 的切段
切割打捆收获	茎杆捆	多为圆捆

链条锯等,这些工具使用起来便携灵活、操作简单、质量轻,但存在振动噪声大、劳动强度大、效率低、不适合大面积平茬作业等问题。相关机具如图 14 所示^[73-75]。



图 14 人工灌木平茬收割机具
Fig. 14 Artificial shrub harvesters

3.3.2 沙生灌木专用收割切碎机械

根据不同的作业地点和用途,主要采用两种机械平茬收割方式:①联合收获方式,即在进行灌木平茬切割作业的同时,对茎杆进行切碎,使用的机械主要有与拖拉机挂接使用的灌木平茬收割机械和自走式灌木平茬收割机械。②分段收获方式,即先将灌木茎杆进行切割,然后收集茎杆,之后运送到指定地点进行处理,使用的机械大多通过与拖拉机挂接使用,来完成茎杆的切割和收集作业过程^[53]。

围绕沙生灌木专用收割机械的结构优化设计,近些年许多学者开展了大量的研究工作。如田增强^[76]参考联合收割机,设计了柠条捡拾切碎机,机具主要由捡拾装置、切碎装置以及贮存装置构成,整机由汽油发动机提供动力,可实现自动平茬收割。马阿娟等^[77]在综合考虑柠条生长特点和沙地整体环境的基础上,设计了履带自走式割灌平茬机,作业后,灌木新枝萌发数量是平茬前的 5 ~ 10 倍。张呈彬^[78]设计了一种柠条收获机,该机具集捡拾和切割功能于一体,同时设有分禾装置,可实现对柠条的梳理。邢东伦等^[56]设计了一种自走式柠条联合收获机,该机械的切割装置包含了两个圆锯片,作业时,液压装置驱动两圆锯片向内旋转切割,可一次性完成柠条的平茬、输送、粉碎和装箱等作业环节。胡政^[79]研制了柠条平茬揉丝一体机,主要包括割台机构、输送机构、截段机构和揉丝机构等,其中揉丝机构减少了切割后的收集工序,提高了收割效率。

能够同时进行沙生灌木平茬切割和切碎作业的收割机械,一般都包含了切割装置、喂入装置和切碎装置等关键装置。对于带有切碎功能的自走式灌木平茬收割机械,多采用通用式机身,并搭配不同割台进行作业,机身大多采用大型自走式青饲料收获机的机身,如 Claas、New Holland 和 John Deere 等公司,割台多为立式辊筒式,大多采用圆锯片进行切割,圆锯片将灌木切割后在立式辊筒的作用下进入喂入口,后经过喂入辊和切碎滚筒进行切碎,切碎后的物料由抛送滚筒经过出料筒抛出,作业示意图如图 15 所示(图像引自文献[11]),关键部件如图 16 所示(图像引自文献[11,80-82])。

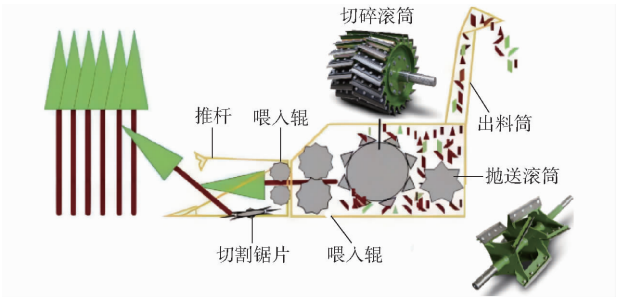


图 15 自走式灌木平茬收割机关键作业环节原理图
Fig. 15 Schematic of key operational aspects of self-propelled shrub harvester



图 16 自走式灌木平茬收割机割台及切碎装置示意图
Fig. 16 Schematic of cutting head and chopping device of self-propelled shrub harvester

国内外典型的自走式灌木平茬收割机械,如图 17 和表 4 所示。从表 4 可以看出,国外自走式灌木平茬收割机具大多采用机身搭配不同割台进行作业,通过收割机械将灌木切碎后向外喷出,需要有专门的运输设备,而国内则是专用的平茬收割机具,单机单用,大多带有收集装置,能够收集收割机械切碎后的灌木碎屑或对碎屑进行打捆。由于自走式灌木平茬收割机械规格较大,仅能应用于生长在相对平坦地面的灌木林,机具的灵活性相对较差,且作业耗费成本较高。

与自走式灌木平茬收割机械相比,悬挂式灌木平茬收割机械的作业适用性更广,操作也更加灵活,功率消耗小,但必须与相应的运输车辆相配套,才能满足灌木平茬切割、切碎和运输的作业需求。与拖拉机挂接使用的灌木平茬收割机械,机具挂接在拖拉机的后方、前方或侧方,通过割台将灌木进行平茬



图 17 国内外典型的自走式灌木平茬收割机械

Fig. 17 Typical self-propelled sandy shrub harvester

表 4 国内外典型的自走式灌木平茬收割机具功能特点	
Tab. 4 Typical self-propelled shrub harvester	
型号	功能与特点
New Holland FR 9000 + FB130 割台	通用机身搭配带有双切割圆锯片的割台，功率 450 kW；割台质量 2 100 kg，作业幅宽 1.3 m，可单行收获，也可双行收获，锯片直径 760 mm，最大切割灌木直径 150 mm；作业效率 2 hm ² /h ^[83]
Krone Big X + Woodcut 割台	通用机身搭配带有一个切割圆锯片的割台，功率 380 kW，割台质量 2 800 kg，作业幅宽 1.5 m，最大切割灌木直径 150 mm ^[14]
Claas Jaguar 900 - 830 + Salix HS2 割台	通用机身搭配带有双切割圆锯片的割台，功率 255 kW；割台质量 1 200 kg，作业幅宽 1.0 m，最大切割灌木直径 80 mm ^[14]
Claas Jaguar/John Deer + HSAB 割台	割台与 Claas Jaguar 和 John Deer 自走式饲料收获机匹配，纯液压驱动 ^[84]
4GM - 200A 型灌木联合收获机	集平茬、输送、粉碎、抛送和储运于一体；配套动力 118 kW，传动方式为液压传动，底盘为机械四驱，作业幅宽 2.0 m；最大切割灌木直径为 80 mm；作业速度（无级变速）0 ~ 6 km/h ^[56]
4QZ - 30 型自走式青饲料收获机	可收获柠条、竹子等坚硬木质作物；额定功率 176 kW，作业幅宽 2.2 m，作业速度范围 0 ~ 6 km/h，设计切段长度 15 mm ^[85]
内蒙古一机集团柠条灌木平茬收割机	集柠条平茬、切割、粉碎、收集于一体，整机采用液压驱动无级变速模式，功率 223 kW，作业幅宽为 2.3 m ^[86]
9ZFD - 2.0 型自走式灌木收割粉碎打捆一体机	用于收获种植在较结实、地面相对平坦的柠条等灌木林；采用切割、粉碎、收集、输送、打捆、卸捆的联合不停机收获工艺，配套动力 118 kW，作业幅宽为 2 m，切割形式为双圆盘锯，圆捆尺寸 φ700 × 700 mm ^[87]

切割，一种方式是切割后直接将灌木进行切碎，另一种方式是切割后将割倒的灌木进行收集和运输^[88]。如 GUERRA 等^[89]研发了一种切碎式收获机并进行

了初步试验，该机械使用一台功率为 276 kW 的四轮拖拉机驱动，切割后的灌木可直接切碎，并通过一个弯曲的喷口将切碎的物料排放到自卸卡车中，这样减少了收割后的收集工序。NIEMIEC 等^[90]设计了一种悬挂式小型短轮杨柳林采收机械，主要由分禾装置、切割装置以及传送装置 3 部分组成，正面割台使用圆盘锯进行切割，可直接将灌木切断，然后由传送装置输送至指定地点，机具三维结构示意图如图 18 所示。

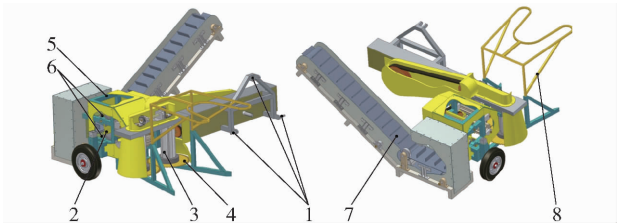


图 18 小型杨柳林采收机械结构示意图

Fig. 18 Schematic of small willow forest harvesting machinery

1. 悬挂架 2. 刀具 3. 滚筒 4. 圆锯片 5. 输送装置 6. 输送装置头部 7. 传输带 8. 扶禾装置

带有切碎功能的悬挂式灌木平茬收割机械，主要包含了切割装置、喂入装置和切碎装置等部件，一般割台均采用高速回转的圆锯片进行切割，喂入装置采用卧式喂入辊或立式喂入辊，切碎装置采用滚筒式切碎器或盘刀式切碎器。圆锯片将灌木切割后，割倒后的灌木茎杆经过喂入辊向切碎器输送，并通过切碎器进行切碎，切碎后的物料经过出料筒抛出，作业原理图如图 19 所示。

如 Ny Vraa 公司生产的 JF Z200 型牵引式灌木收割机，机具挂载在拖拉机侧方，可将灌木平茬切割并切碎，整机质量 1 500 kg，采用盘刀式切碎器，切割灌木直径为 30 ~ 40 mm，能够实现双行收获，作业效

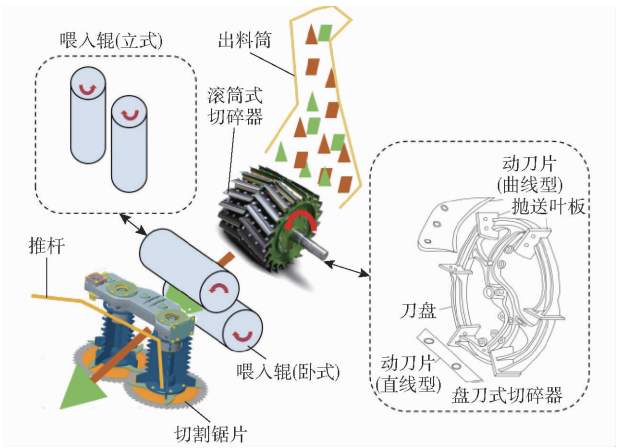


图 19 与拖拉机挂接使用的灌木平茬收割机原理图

Fig. 19 Schematic of key operational aspects of tractor-hitched shrub harvester

率 $0.59\text{ hm}^2/\text{h}$ ^[10,14,91]。JENZ 公司生产的 GMHT 140 型悬挂式灌木收割机,整机质量 3 500 kg,可进行单行或双行收割,能够将灌木平茬切割并切碎,机具挂接在拖拉机后方,配套动力为 75 ~ 400 kW,最大切割灌木直径 140 mm^[14]。上述两个平茬收割机具作业过程如图 20 所示。



(a) JFZ 200型灌木收割机 (b) JENZ GMHT 140型灌木收割机

图 20 与拖拉机挂接使用的灌木平茬收割机实物图

Fig. 20 Tractor-hitched shrub harvesters

LAZDINS 等^[92]设计了一款用于收割小径级灌木的灌木收割切碎一体机,如图 21 所示。该机器与拖拉机挂接使用,采用滚筒式切碎器,通过割台前端先将灌木收集靠拢并将灌木推弯,然后灌木进入割台被两个直径为 800 mm 的圆锯片切割,切割下来的灌木进入到切碎装置进行切碎,切碎长度最大 50 mm,拖拉机功率大于等于 70 kW,对于生长 5 年的灌木收获效率可以达到 6.1 t/h。

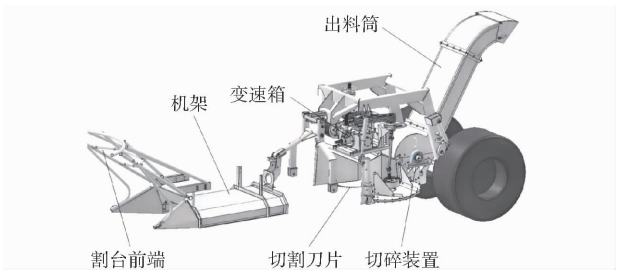


图 21 小径级灌木收割切碎一体机结构简图

Fig. 21 Structure diagram of integrated shrub harvesting and shredding machine for small diameter shrub

文献 [14,93] 研发了一种新型灌木收割机

(ATB mower-chipper),如图 22 所示。该机具具有结构简单、重量轻等特点,整个机械由中型标准拖拉机带动即可运行,具备收集、切割和输送切屑一体化的功能。切割装置由直径为 1 300 mm 的圆盘锯组成,与其他收割机中的大多数割刀相反,刀具转子是实心的,没有开槽,从而避免了切屑掉落在地面上,同时通过使用不同高度的垫块来改变切割长度。在切割和削片过程中,先由圆盘锯片将茎秆切断,然后切割的茎秆在导向臂和星轮的帮助下保持直立位置,同时被切割刀片切碎,切碎的材料以 1 000 r/min 的旋转速度向卸料口排出。整机质量为 1 400 kg,挂接在拖拉机前方,实现单行收割,生产效率为 6.6 ~ 9.9 t/h,最大切断长度为 120 mm,最大收割灌木直径为 15 cm^[8,14]。

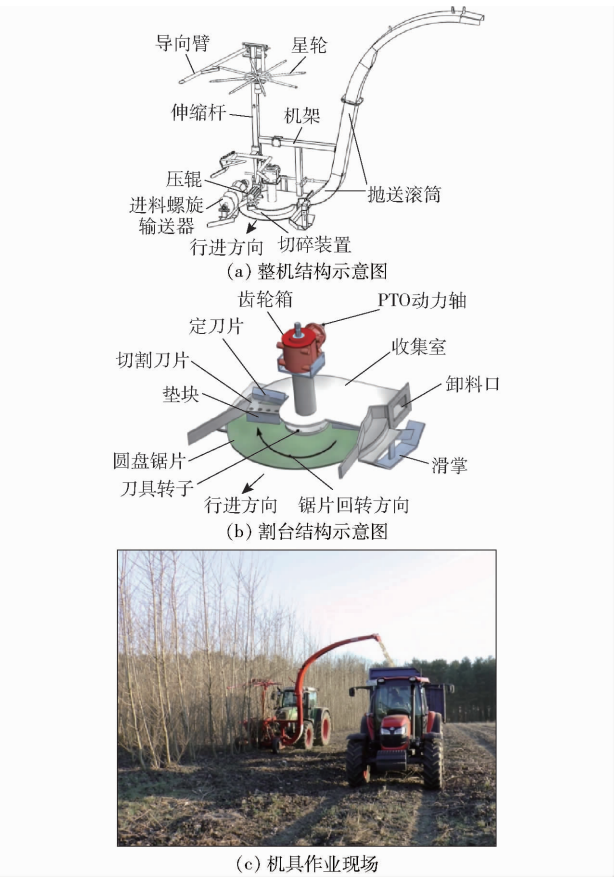


图 22 ATB mower-chipper 灌木收割机

Fig. 22 ATB mower-chipper

3.3.3 沙生灌木切割收集机械

采用整秆收获方法进行沙生灌木收获作业时,机械仅完成灌木切割平茬过程,然后对切割后的灌木茎秆进行收集,之后运输到储存地点,收获后的灌木茎秆仍需进一步干燥和加工。国内目前大多采用人工收集的方式,即先由机器切割沙生灌木,割倒后的茎秆由人工收集装车,一般机械作业后,茎秆都散放在切割地点,收集劳动强度大。如中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院有限

公司^[87]研制的自走式灌木平茬机,其作业过程如图 23 所示。该机具适合收割柠条、沙柳等各种灌木,主机还可以挂接相应的夹具,实现灌木切割和茎秆收集一机多用。韩宝生等^[94]设计了一种多功能沙生灌木集运装备,能对切割后的沙生灌木茎秆进行捡拾、装卸和运输,但尚未进行大面积推广应用。



图 23 9GZ 系列灌木平茬机
Fig. 23 9GZ type sandy shrub harvester

国外对于大面积的灌木林进行整秆收获时,主要采用两种方式,一种是对切割后的灌木茎秆整秆收集,采用边切割边收集的方式或先切割后收集的方式,另一种是对灌木进行打捆收集,一般采用边切割边打捆的方式,但大多仅适用于生长在平坦地面的灌木林。例如,Ny Vraa 公司^[91,95]生产的 Stemster MKIII 灌木收割机,与拖拉机挂接使用,能够在切割灌木的同时集中收集茎秆,可单行收获,也可双行收获,作业效率为 0.64 hm²/h,机具作业过程如图 24 所示。该机具工作时,由一对高速回转的圆锯片将灌木茎秆切断,切断后的茎秆在夹持链的作用下随着夹持链向后上方移动,当移动至末端时落到茎秆收集车厢中。



图 24 Stemster MKIII 系列灌木平茬机
Fig. 24 Stemster MKIII type shrub harvester

德国 BAECUT 公司生产的 Ernte Stembundler 灌木切割收集机^[96],能够完成灌木的切割收集工作,机具挂接在拖拉机前方,整机长 4.3 m、宽 2.3 m、高 3.1 m、质量 1.8 t,割幅 1.6 m,能够切割灌木的直径为 2 ~ 10 cm,最小功率为 88 kW,作业效率为 0.35 hm²/h,机具三维结构示意图和作业过程如图 25 所示。该机具带有收集筒,灌木茎秆被切割圆锯片切割后,在上下两条夹持链作用下向后移动,装入收集筒中,当收集筒中茎秆满了以后,打开收集筒侧门,通过拨料装置将筒中的茎秆向外拨出,收集的茎秆通过铺放板向侧边集中倾倒,最终落至地面上。

另外,该公司生产的带有夹具的运输车,通过夹具可将上述铺放地面上的茎秆抓取至运输车中,最终运送至指定地点。

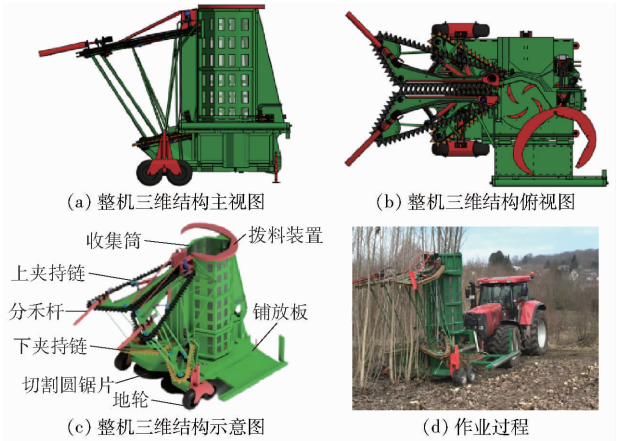


图 25 Ernte Stembundler 灌木切割收集机
Fig. 25 Ernte Stembundler harvester

欧洲 Segerslätt Empire 2000 型灌木收割机^[91]能够切割并收集全长茎灌木,功率为 130 kW,整机质量 12 000 kg,割台配备两个 700 mm 的圆锯,可以切割直径为 80 mm 的灌木,作业效率约为 6.7 t/h。工作时主要以液压为动力,通过圆锯片将灌木切割后,切断后的茎秆由夹持链输送到后面的收集箱中,完成切割收集工作。

LAVOIE 等^[97]设计了一种灌木平茬收割打捆机,如图 26 所示。该机具集成了切割器、切碎装置和打捆装置,可以实现对灌木的切割、切碎和打捆;一般包括两种割台:带 4 个锯片的割台和锤爪式割台,用于切割灌木茎秆;通过割台切割灌木茎秆,并通过切碎装置破碎灌木,将其输送到压缩室打捆。

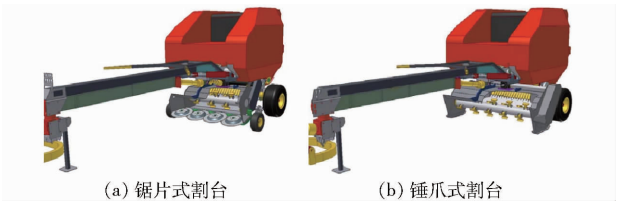


图 26 牵引式灌木平茬收割打捆机
Fig. 26 Biobaler for shrubs

加拿大安德森集团 (Anderson Group)^[11,98]生产的 WB-55 型灌木平茬收割打捆机,机具作业过程示意图和实物图如图 27 所示。该机具集切碎和打捆于一体,工作时位于机器前面的切割装置切割灌木部茎秆,割倒后的茎秆经过喂入辊进入卷压室,在卷压室被卷成直径为 1.22 m、宽度为 1.22 m 的圆捆。当捆束形成时,打捆机停止前进,捆绳进行打捆,尾门打开,圆捆弹出并落在地面上,完成切碎-打捆作业。



图 27 WB-55 型灌木平茬收割打捆机
Fig. 27 WB-55 biobaler

4 沙生灌木机械化加工利用技术

4.1 沙生灌木机械化削片加工及干燥技术

收获后的灌木一般有两方面的用途,用于灌木林的种植和进行资源利用(燃料、造纸、造板材、加工饲料等)。通常,用于制作生物燃料、造纸和造板材等的灌木加工产品是切碎并且干燥后的木屑^[99]。灌木主要通过削片机生产木屑,包括鼓式削片机和盘式削片机,二者主要是按照切碎器的结构不同来区分,鼓式削片机采用滚筒式切碎器,盘式削片机采用盘式切碎器,工作时,切碎器上面的动刀片与机架上的底刀相互配合进行枝条切削,其工作原理如图 28 所示。

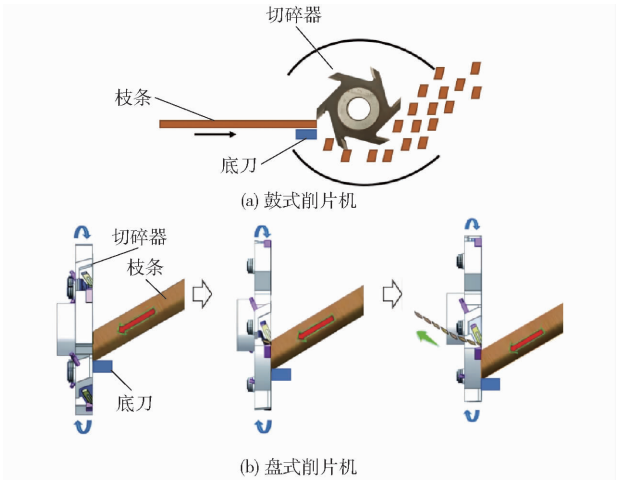


图 28 灌木削片机工作原理图
Fig. 28 Wood chipper

按照作业形式的不同,灌木削片机有固定式和移动式之分,按照规格有大型和小型之分。赵洪元^[100]设计的自走式削片机,采用履带式行走机构,以保证设备能够适应林区路况,可以切削林木径级

范围小于 110 mm,切削后得到的木片尺寸不大于 50 mm。美国 Sun Joe 公司^[101]生产的 DK2 OPC503 型削片机,配备 5.2 kW 燃气发动机和双高强度硬质合金钢切割刀片,作业时固定在指定地点,移动时可轻松牵引至工作地点。英国 Ben Burgess 公司生产的 HM8-400K 型削片机^[102],与拖拉机挂接使用,由拖拉机提供动力,能够对木材废料、锯木厂边角料、树枝和树干等进行削片。德国迪芬巴赫集团(Dieffenbacher Maier)^[103]生产的固定式鼓式削片机,可将直径小于 420 mm 的原木以及小径木、枝条、枝桠等加工成一定规格的木片,生产能力达到 10~190 m³/h。瑞典 Bruks Siwertell 公司^[104]生产的 DH 系列鼓式削片机,能够生产最大长度为 200 mm 的木屑,作业效率为 300 t/h。国内外典型灌木削片机如图 29 所示。



图 29 典型灌木削片机
Fig. 29 Typical wood chipper

鼓式削片机进料槽口大多呈矩形,截面积较大,对原料具有较广的适应性,但由于鼓式削片机动刀片是装在滚筒上,切削过程中更多是砍切的方式,易产生碎料,一般不适宜切削较大直径的灌木。盘式削片机进料槽口接近正方形,截面积较小,适宜加工原木、间伐木和成捆的枝桠等,作业时具有较好的剪切力,加工的木片质量好,碎料少,但是加工截面尺寸较小的原料时,喂料时不易将料槽充满,不能充分发挥其生产能力。在加工以沙柳为代表的沙生灌木时,一般多使用鼓式削片机^[105]。

目前,研究人员主要围绕沙生灌木削片过程中的切削性能及影响因素展开研究,目的都在于降低功耗和提高削片质量。如安珍^[106]基于木材切削理论,研究了沙柳材物理性能和切削参数对切削力与切削质量的影响规律,得出了相关数学模型,并探讨了刀具前角、切削量和含水率等对切削力的影响规律。马文龙等^[107]设计了沙柳试验削片机切削机构,以便研究适合沙柳削片最佳切削参数,为后期确

定切削速度、进料速度等参数和新型沙柳削片机的设计提供了理论依据。袁湘月等^[108]研究了灌木柠条削片质量的影响因素,发现切削转速和含水率对灌木柠条的削片质量有高度显著的影响,而切削间隙对其基本没有影响,并得到了含水率为 16% 左右灌木柠条的合理作业参数。

一般刚收获的灌木茎秆含水率范围为 40% ~ 60%,而商品化灌木木屑往往要求 30% 以下^[71]。对于机械收获形成的灌木茎秆的整秆、切段和茎秆捆,采用自然晾晒的方式,一般需要 4 ~ 6 个月,经过晾晒干燥后再进行加工利用。虽然上述方式成本比较低,但是干燥周期比较长,同时对干燥后的茎秆进行加工时,加工效果受含水率影响较大,茎秆在含水率较低情况下进行切碎,形成的木屑均匀性较差^[71]。结合实际生产情况来看,茎秆资源加工利用时,很多企业采用木屑集中干燥的方式,而将沙生灌木茎秆进行饲料化利用时,很多企业则采用先自然晾晒干燥再进行加工的方式。

典型的机械化干燥方法主要是采用热风干燥的方式,通过向堆放的木屑施加热风,带走木屑中的水分,降低含水率^[109]。比较简单的干燥设备是带有通风口的干燥厢,如图 30 所示。在干燥厢底部设有两个通风口,通过向通风口中施加热风,热风穿过木屑带走水分,最终排出厢外,同时,为了避免热风将木屑吹起,工作时木屑四周均被封闭。这种设备结构比较简单,但由于在干燥过程中木屑始终静止不动,因此,作业过程中干燥并不均匀,干燥效果比较难控制^[71,109]。



图 30 灌木木屑热风干燥厢

Fig. 30 Hot air drying compartment for shrub wood chips

另一种典型的设备是循环干燥设备^[71],如图 31 所示,通过结合提升机、传输装置和干燥设备,实现物理循环干燥,灌木木屑被反复运输经过干燥设备,干燥设备通过热风对经过的木屑进行干燥,直至符合相关要求。这种设备优点是能够对物料实现均匀干燥,但设备相对复杂,且需占用一定的场地,成本较高。

4.2 沙生灌木饲料化加工利用技术与设备

常见的柠条、沙柳等沙生灌木枝叶具有较高的饲用价值,如粗蛋白含量为 10% ~ 20.6%,粗纤维含量为 25.6% ~ 42.1%,粗脂肪含量为 4.6% ~



图 31 灌木木屑循环干燥设备

Fig. 31 Shrub wood chips cycle drying equipment

5.5%,钙含量为 1.14% ~ 2.15%,可作为稳定的动物饲料来源^[110]。沙生灌木作为饲料进行加工利用主要是以切碎、粉(揉)碎及制粒 3 种方式为主,通过切碎揉丝进行直接饲喂或与其他草料混合后饲喂或进行青贮饲喂;通过加工粉碎生成草粉,再与其他草粉或精饲料混合进行饲喂;粉碎成粉后加工成颗粒饲料进行饲喂^[111]。目前沙生灌木的饲料化加工技术尚处于起步阶段,加工装备主要利用现有的秸秆和牧草加工机械。

通过铡切揉碎的方式能够破坏沙生灌木枝条表面硬质与茎节,将枝条加工成丝状,提高适口性和牲畜消化吸收效果。目前加工作业过程,大多借鉴秸秆或牧草的揉碎、粉碎及制粒的机械化工艺技术,采用的机械主要也是秸秆或牧草的相关加工机械。目前,常用的揉碎方式有两种:通过揉搓的方式进行揉碎,使用的机械多为锤片式揉碎机(揉搓机),作业时,茎秆仅在锤片和齿条的共同作用下被揉搓成丝状;通过铡切揉搓的方式进行揉碎,即先将茎秆切段,然后再进行揉搓,使用的机械多为铡揉机,作业时,茎秆先由切碎器切碎,然后由锤片和齿条共同作用揉搓成丝状。研究人员主要围绕揉碎机械结构和性能优化,以及影响因素分析、物料运移机理和部件材质提升等方面展开相关研究工作。如刘飞等^[112]在设计 T 型结构锤片的基础上,分析了锤片式揉碎机内腔气流场结构与物料运动之间的关系,并发现 T 型锤片能增大秸秆的搓擦效果,有效减少回流和涡流的产生。袁洪方等^[113]优化了秸秆铡切揉搓装置,将传统的凸型刀刃加工成锯齿形状,实现高水分玉米秸秆破节率大于 96%,有效提高了揉搓效果。刘禹辰^[114]基于离散元数值模拟方法分析了秸秆揉丝运移过程,并设计研发了一款铡切转速可调的玉米秸秆揉丝机,为玉米饲料数值化研究提供了模型支撑,并为分析玉米秸秆揉丝机理提供一定的理论参考。陈涛等^[115]以苜蓿为加工对象,设计了一种铡切揉碎协同式牧草揉丝机,并进行了结构和参数优化,解决牧草揉丝机效率低、揉丝质量差、对高含水率牧草不适用等问题。

近些年,研究人员在秸秆或牧草的揉碎机械基础上进行改进和优化,得到了专用的沙生灌木揉碎加工机械。如马卫民等^[116]设计了一种柠条的专用揉碎设备,经过铡切和揉搓后,柠条被加工成柔软的丝条状,能完全被牛羊采食,大大提高了利用率。山东五征高北农牧机械有限公司等^[117]提出了一种灌木收割揉丝打捆一体机及灌木加工方法,能够解决现阶段收割机收割的柠条仍为枝条段状,无法直接作为饲料用于畜牧养殖等问题,实现了收获、揉丝、打捆一体作业,机具作业过程及效果如图 32 所示。



图 32 灌木收割揉丝打捆一体机
Fig. 32 Shrub harvesting, shredding and baling machine

收获后的沙生灌木经过粉碎以后,与秸秆等物料按比例混合后可作为优质的动物饲料,粉碎作业的机具大多采用秸秆或牧草粉碎作业使用的锤片式粉碎机,现有的关于锤片式粉碎机的研究也主要集中在优化结构、降低能耗以及提高筛分效率方面,而对于沙生灌木的专用锤片式粉碎机研究较少,存在产品种类较少且处于小范围试验阶段^[118]。如陈海林^[119]在传统 9FC-60 型锤片式粉碎机的基础上,通过增加电机功率、改进锤片结构和风运系统,获得了较好的柠条粉碎效果,实现草粉细度为 5~10 mm。白海洋^[120]以柠条为研究对象,在已有的锤片式粉碎机基础上,提出了一种针对于新鲜柠条的粉碎装置,确定了粉碎装置关键部件的最佳参数,解决了粉碎过程中絮状物缠绕问题,提高了粉碎效果。

沙生灌木在粉碎过程中,受冲击作用和剪切作用,当剪切力达到物料屈服极限时,发生断裂、粉碎,其剪切作用及冲击作用的大小与粉碎效果成正比^[120]。由于灌木枝条纤维较长,外皮较厚,入机后难破碎,易磨损和损坏机具,因此,实际生产中都是先进行一次或二次破碎,然后再进行粉碎来提高粉碎机具的生产效率。一般粉碎的方式主要有两种:一种是直接对木屑进行粉碎,如瑞典 Bruks Siwertell 公司生产的 HH 系列锤片式粉碎机,可以直接粉碎干的和湿的木屑,生产率达到了 60~100 t/h^[104],如图 33 所示。另一种是对灌木枝条进行粉碎,一般先将枝条晾晒干燥后,先将枝条进行初步破碎,然后再将破碎后的枝条(木屑或木段)通过锤片式粉碎机粉碎。在实际生产中,大多采用枝条破碎机(很多企业 and 研究人员也称为粉碎机)进行沙生灌木枝条

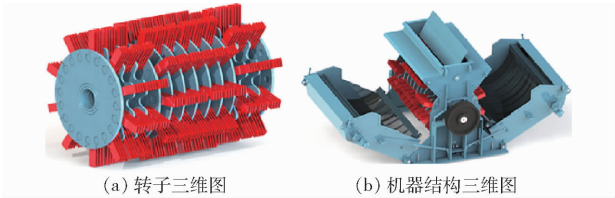


图 33 HH 系列锤片式粉碎机
Fig. 33 HH type hammer mill

的初步破碎。如王珊^[121]研制了能够实现树枝均匀连续粉碎的果园树枝破碎机,该机包括喂料机构、粉碎机构、传动系统、液压系统、控制系统等,粉碎机构是基于旋转浮动式喂料机构和叠加式刀辊粉碎机构,能够实现树枝的连续、均匀粉碎,降低了树枝粉碎机功耗,粉碎直径在 80 mm 以下,树枝粉碎机木屑合格率大于 90%,生产能力为 1 000 kg/h。魏万成^[122]设计了一款多功能枝条粉碎机,机器生产率为 430 kg/h,成品率为 80% 左右。日本玛雅公司^[123]生产的 CXC-703-1E 型树枝粉碎机,可粉碎直径 12 cm 的枝条,机具如图 34a 所示。美国威猛公司 (Vermeer)^[124]生产的 TG7000 型立式破碎机,机器自带动力工作,发动机功率 708.4 kW,采用特殊的切削刀具,能够对灌木枝条进行破碎,如图 34b 所示。该公司还生产 BC1000XL 型大型破碎机,如图 34c 所示,该机采用四缸水冷涡轮增压发动机,送料速度 82 m/min,采用无离合 PTO 传动系统,配有发动机转速感应器、自动刹车系统、机油压力感应系统、发动机预热系统、程序控制管理系统等,破碎效率高、适应性强^[125]。山东宏鑫机械制造有限公司^[126]生产的 HX 系列枝条破碎机,如图 34d 所示,机具通过安装在刀辊上的飞刀或虎爪与底刀相配合,对小径木、枝条等原料进行破碎,生成木屑或碎段物料,生产能力可达 10~80 t/h。



图 34 枝条破碎机
Fig. 34 Branch crusher

沙生灌木粉碎后再进行制粒加工,能够有效提

高其饲喂利用率,提高畜牧业养殖效果^[127]。由于沙生灌木粗纤维含量较高,在制粒的过程中要综合考虑营养性、适口性、消化率和利用率等因素,一般都是在沙生灌木粉碎成粗粉的基础上,进一步粉碎制成细粉,再进行制粒加工,且多与其他饲草进行混合制粒,以提高灌木类饲料的利用率,充分发挥饲料间的互补机能^[128]。目前大部分研究主要集中在沙生灌木与其他饲草的制粒效果及饲料利用价值方面。如朝鲁孟其其格^[129]研究了“苜蓿-柠条”和“苜蓿-秸秆”混合草颗粒的制粒工艺条件及饲用价值,发现不同工艺条件生产的“苜蓿-柠条”和“苜蓿-秸秆”型混合草颗粒的适口性均好于单体柠条和玉米秸秆颗粒。安治臻^[130]以制粒密度为指标,研究了柠条与玉米秸秆的混合制粒性能,得到了影响制粒密度的主要因素,并对混合成型的饲料颗粒进行了力学特性参数分析,为实际生产提供了工艺参数。

沙生灌木制粒主要采用秸秆或牧草的制粒机械,包括平模式和环模式制粒机,其中平模式制粒机主要用于小型企业或个体用户,环模式制粒机多用于大型饲料加工企业。制粒时,物料通过进料区、变形压紧区和挤出成形区,在制粒室形成颗粒,原料的成分、含水量、喂入速度等均会对制粒效果产生影响。近些年,针对制粒机方面的研究主要围绕关键结构优化设计、关键部件磨损机理、振动特性等方面展开,以提高制粒机的可靠性和制粒质量^[131-132]。如丛宏斌等^[133]在对环模制粒机成型过程和机构受力分析的基础上,建立了设备产能与能耗模型,分析了环模制粒机技术参数和物料特性参数对设备产能与能耗的影响规律。彭飞等^[134]为实现小批量颗粒饲料生产,设计出一种小型可调剂间隙饲料制粒机,能够在不停机的状态下实时调节模辊间隙,保证颗粒饲料的连续生产。王伟等^[135]设计了一种移动式秸秆制粒机作业速度自动调控系统,以实现秸秆制粒机作业速度的自动调控,解决玉米秸秆收获过程中作业速度与喂入量不匹配的问题。贾开发^[132]对制粒机动力学振动响应进行了理论与试验分析,分析了制粒机不确定性外载荷的影响和载荷的特征,揭示了多激励耦合的转子动力学响应规律特性,以降低系统随机振动、提高关键零部件使用寿命和可靠性。

关于秸秆和牧草加工所用的粉碎机械和制粒成型机械,文献^[136]已经有过详细表述,本文不再做具体论述。

5 问题分析与发展展望

以柠条、沙柳等为代表的沙生灌木,是实现我国

沙化土地治理的重要生物固沙树种,发展沙生灌木生产机械化技术,能够有效提高生产效率、降低劳动强度,且赋能沙产业发展的新质生产力。目前,我国沙生灌木机械化生产技术主要存在以下问题:

(1)机械化生产环节发展不均衡,机械装备支撑力不足

整个沙生灌木产业链条包含种植、田间管理、平茬收割和加工利用等环节,但各个环节发展并不均衡。在沙生灌木平茬收获环节方面,相关的机械化技术水平发展相对较快,但在沙生灌木机械化栽植、收集、加工利用等环节仍属于薄弱环节,大多通过人工来完成,劳动强度大,缺乏适宜的专用生产装备,部分生产环节虽然有相关机型,但仅局限在小范围试验与测试,未能大范围转化和推广应用,装备支撑力不足,直接限制了产业发展。

(2)机械化生产装备适用性和可靠性低

沙生灌木种植与生长环境较为复杂,一方面体现在沙生灌木生长分布区域既包含了地面较为结实、平坦的地势,还包含了沙石遍布的复杂沙丘地势,另一方面体现在沙区生长多年的灌木,在其根部都会形成一个较大的半球形沙包,形成凹凸不平的作业环境,这些复杂的环境直接影响相关机械的作业效果,使得机具的适应性和可靠性低。如现有的自走式沙生灌木平茬收割机具,大多仅适用于地面较为结实、平坦的人工种植灌木林,对于沙丘等丘陵地带等生长的灌木林无法进行作业,同时在机械化平茬技术方面仍然存在平茬茬口质量差、收割效率低、环境适应性差、机具仿形性差等问题。

(3)沙生灌木生产机械装备关键技术研发不足,生产工艺与机械化生产技术联动性差

围绕沙生灌木的机械化生产技术大多集中在其机械化平茬收割方面,而在机械化开沟-栽植-覆土一体化技术、机械化加工利用技术等方面研究不足,直接影响关键装备的研发与优化设计,同时针对机械-灌木茎秆相互作用系统理论和共性技术、沙生灌木饲料化利用技术工艺等方面的研究比较缺乏。例如,平茬收割机械的作业路径沿着灌木植株分布路线行走,根部不平整的地表对切割装置的仿形能力要求较高,以保证合适的留茬高度,而我国的灌木平茬机械发展研究起步较晚,大多数都是借鉴国外产品和对饲草收获机械的改进上获得的,更多适用于地面平坦的地表情况,对于沙丘、沙石遍布的复杂地表情况,存在切割装置仿形能力弱等问题,影响切割效果。另外,我国灌木平茬机械大多数采用圆盘回转式和往复式的切割形式,同时现有的切割刀片大多选用大径级的伐木刀具为参考,而沙柳和柠条

等沙生灌木大多成堆生长,且在平茬作业时枝条径级较小,切割装置的刀具作业时很难达到茬口平整光滑的理想效果。对沙生灌木的作物模型以及小径级枝条与切割刀具之间的互作关系等基础理论研究薄弱,使得农机农艺融合性薄弱,制约了高效高性能的作业机械及关键部件的研发与优化设计。此外,沙生灌木种植经营规模和种植条件对机械要求不同,但现有的机械大多集中于一种生产状况进行研发设计,生产工艺与机械化生产技术联动性差,出现农户无合适机具可用或选用机具不适合作业等情况,降低了生产效率。

结合我国沙生灌木生产实际情况,未来我国沙生灌木机械化生产技术的研究方向为:

(1)构建完整的沙生灌木生产全过程机械化技术体系

推进沙生灌木生产全程机械化,建立健全并完善包括种子收获、种植、平茬复壮、运输、后加工等在内的沙生灌木全程机械化生产技术体系,解决沙生灌木机械化生产环节的短板,尤其在栽植环节和收获加工环节等方面,针对薄弱项目实施沙生灌木生产机械化提升示范行动,针对不同区域的生长环境、

生产条件及现状,加快发展适宜的机械化生产技术体系。

(2)加强沙土-沙生灌木-机具相互作用关系理论体系等关键技术研究

以进行高效低损的沙生灌木机械化生产作业为前提,依据作物生长特性,围绕栽植、收获、加工利用等生产环节中涉及到的沙土-沙生灌木-机具界面耦合问题,开展相关理论体系与关键技术研究,提高机具及关键部件的适用性与可靠性,提高作业效果和生产效率。

(3)实现沙生灌木生产机械集成化、智能化

在现有基础上,进一步开展沙生灌木生产机械集成化研究,如发展开沟-栽植-覆土集成机械装备、收割-粉碎(揉丝)-收集打捆一体机等机械装备,提高作业机械的生产效率,降低作业成本和劳动强度;开展智能化沙生灌木生产机械研究,如进行规范种植的沙生灌木林作业路径的自动识别、巡航技术研究、高精度的沙生灌木平茬机器人技术研究、平茬作业全过程监测与预警技术研究等,实现沙生灌木机械化生产作业时的集成作业工序和智能化操作控制系统。

参 考 文 献

[1] 国家林业和草原局政府网.《第六次全国荒漠化和沙化调查结果》[EB/OL]. (2022-12-30)[2024-05-06]. <https://www.forestry.gov.cn/main/5906/20221230/201705747872944.html>.

[2] 魏海燕,胡方彩.我国荒漠化的现状及防治对策[J]. 贵州科学,2014,32(6):83-87.
WEI Haiyan, HU Fangcai. The present situation of desertification and countermeasures in China[J]. Guizhou Science,2014, 32(6):83-87. (in Chinese)

[3] 国家林业和草原局政府网.《国家林业和草原局关于发布“三北工程攻坚战关键技术研发”揭榜挂帅项目榜单的公告》[EB/OL]. (2023-11-24)[2024-05-06]. <https://www.forestry.gov.cn/lyj/1/gsgg/20231124/533619.html>.

[4] 国家林业和草原局. 关于印发《全国防沙治沙规划(2021—2030年)》的通知[EB/OL]. (2023-09-07)[2024-01-06]. <https://www.forestry.gov.cn/c/www/lczc/521554.jhtml>.

[5] 张兵. 主要防风固沙植物及其应用价值[J]. 内蒙古林业调查设计,2012,35(5):62-65.
ZHANG Bing. Research on characteristics and application value of major plants for winosheltering and sand fixation[J]. Inner Mongolia Forestry Survey and Design,2012,35(5):62-65. (in Chinese)

[6] 路东晔,张国盛,张磊,等.北沙柳研究进展[J]. 分子植物育种,2020,18(10):3427-3432.
LU Dongye, ZHANG Guosheng, ZHANG Lei, et al. Progress in the research of *Salix psammophila* [J]. Molecular Plant Breeding, 2019,18(10):3427-3432. (in Chinese)

[7] 梁建平,慕厚春,杨浩生. 沙生灌木产业及平茬技术装备探讨[J]. 内蒙古林业科技, 2010, 36(2): 43-46.
LIANG Jianping, MU Houchun, YANG Haosheng. Discussion on desert shrubs industry and stumping technology equipment [J]. Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2010, 36(2): 43-46. (in Chinese)

[8] PECENKA R, HOFFMANN T. Harvest technology for short rotation coppices and costs of harvest, transport and storage[J]. Agronomy Research, 2015, 13(2):361-371.

[9] VERWIJST T, LUNDKVIST A, EDELFELDT S, et al. Development of sustainable willow short rotation forestry in northern Europe[J]. Biomass Now-sustainable Growth and Use, 2013(20): 634.

[10] BERHONGARAY G, KASMIQUI O E, CEULENMANS R. Comparative analysis of harvesting machines on an operational high-density short rotation woody crop (SRWC) culture: one-process versus two-process harvest operation [J]. Biomass & Bioenergy, 2013, 58:333-342.

[11] OGURI G. Colheita mecanizada de biomassa florestal: desempenho operacional e econômico[D]. Rua Quirino de ndrade: Universidade Estadual Paulista,2016.

[12] 王晓梅. 柠条种植技术要点[J]. 现代园艺, 2023, 46(6): 56-58.

[13] ECKEL H, HARTMANN S, SCHROERS J O, et al. Produktion von Pappeln und Weiden auf landwirtschaftlichen Flächen

[J]. Agricultural Engineering. Eu, 2008, 63(6): 351 – 353.

[14] PECENKA R, SILVA J N, EHLERT D, et al. Mechanised harvest of energy wood: state-of-the-art and new developments[J]. Revista Engenharia na Agricultura-REVENG, 2016, 24(1): 32 – 40.

[15] PECENKA R, LENZ H, JEKAYINFA S O, et al. Influence of tree species, harvesting method and storage on energy demand and wood chip quality when chipping poplar, willow and black locust[J]. Agriculture, 2020, 10(4): 116.

[16] 内蒙古自治区林业厅. 沙柳丰产栽培技术规程:DB15/T 838—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.

[17] 国家林业局. 柠条播种育苗技术规程:LY/T 2628—2016[S]. 北京:中国标准出版社,2016.

[18] 内蒙古自治区林业和草原局. 柠条造林技术规程:DB15/T 2225—2021[S]. 北京:中国标准出版社,2021.

[19] 太中凯. 包衣柠条种子喷播机排种器设计与试验[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.

TAI Zhongkai. Design and experiment of seed metering device of coated caragana seed sprayer[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2023. (in Chinese)

[20] 刘文军, 吕广林, 邬满平, 等. 库布其沙漠沙柳造林技术要点[J]. 内蒙古林业, 2020(9): 35 – 36.

[21] 库布其治沙里藏着这些“黑科技”_鄂尔多斯市林业和草原局[EB/OL]. (2023 – 08 – 28)[2024 – 05 – 06]. http://lcj.ordos.gov.cn/xb/zzms/lckj/202308/t20230828_3478030.html.

[22] 新材料新装备助力机械化治沙产业发展-林草快讯-内蒙古自治区林业和草原局[EB/OL]. (2023 – 11 – 10)[2024 – 05 – 06]. https://lcj.nmg.gov.cn/xxgk/zxxz/202311/t20231110_2408763.html.

[23] 内蒙古宏昌机械制造有限公司. 一种苗木栽植铺网机:CN202221254368.7[P]. 2022 – 10 – 18.

[24] HUTSOL T, YERMAKOV S, FIRMAN J, et al. Analysis of technical solutions of planting machines, which can be used in planting energy willow[C]//Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation: ICORES 2020, 2020: 99 – 111.

[25] EDGEDAL. Egedal maskinfabrik A/S produces machinery for nurseries, christmas trees/forestry, horticulture and specialty crops[EB/OL]. [2024 – 05 – 06]. <https://egedal.dk/en/>.

[26] Lignotech. Stepplanter[EB/OL]. [2024 – 05 – 06]. <https://www.lignotech.de/stepplanter/>.

[27] Lignovis. Planting of agroforestry systems & short rotation plantations [EB/OL]. [2024 – 05 – 06]. <https://lignovis.com/leistungen/anpflanzung-von-agroforst-kurzumtriebsplantagen.html>.

[28] WALD21 GmbH. Maschinelle Pflanzung [EB/OL]. [2024 – 05 – 06]. <https://wald21.com/maschinelle-pflanzung-kurzumtriebsplantage/>.

[29] LIGNOTECH. ÜBER UNS[EB/OL]. [2024 – 05 – 06]. <https://www.lignotech.de/>.

[30] 刘启嵘. 平茬对沙柳生长及碳汇能力的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2022.

LIU Qirong. The influence of stubble on the growth and the carbon sink function of *Salix psammophila*[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2022. (in Chinese)

[31] 秦伟,段广东,裴志永. 毛乌素沙地穿沙公路路域沙柳防护带平茬复壮技术[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版),2019, 50(3):294 – 301.

QIN Wei, DUAN Guangdong, PEI Zhiyong. Stumping rejuvenation technology of *Salix psammophila* protected belt on desert-crossing highway in Mu Us sandy land[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2019,50(3):294 – 301. (in Chinese)

[32] 王丽莉. 柠条平茬复壮更新技术研究[J]. 现代农业科技,2013(8):156 – 157.

[33] 刘学鹏,陵军成. 平茬技术在多年生花棒林更新复壮中的应用[J]. 林业科技通讯,2018(2):3 – 5.

[34] 段明泽. 沙柳平茬圆锯片的磨损机理研究及参数优化[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学,2021.

DUAN Mingze. Research on wear mechanism and parameter optimization of circular saw blade when stumping *Salix psammophila*[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology,2021. (in Chinese)

[35] 杨伟康. 柠条平茬机的设计与截梢切削试验研究[D]. 南京:南京林业大学,2024.

YANG Weikang. Design of caragana stubble machine and experimental research on cutting tip[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University,2024. (in Chinese)

[36] LIU X Y, NING W X, WANG Z T. Tensile properties of six desert shrub species in Hobq Desert, China[J]. Israel Journal of Plant Sciences, 2022, 70(1 – 2): 104 – 112.

[37] 张少勇,刘志刚,裴承慧,等. 沙柳力学性能试验及数值模拟[J]. 东北林业大学学报,2022,50(6): 105 – 110.

ZHANG Shaoyong, LIU Zhigang, PEI Chenghui, et al. Mechanical properties test and numerical simulation of *Salix psammophila*[J]. Journal of Northeast Forestry University,2022,50(6): 105 – 110. (in Chinese)

[38] VARGAS C A, NASCIMENTO M B, MUÑOZ G I B, et al. Physical and mechanical properties of four salix species[J]. Revista Ciência da Madeira,2012, 3(2): 10 – 12953.

[39] REJDAK M, CZARDYBON A, IGNASIAK K, et al. Compaction studies of torrefied willow [J]. Journal of Ecological Engineering, 2017, 18(1): 183 – 192.

[40] 朱珊. 基于虚拟样机技术的灌木切割装置设计与仿真分析[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2017.

ZHU Shan. The design and simulation analysis on shrubs cutting device based on virtual prototype technology[D]. Harbin: Northeast Forestry University,2017. (in Chinese)

[41] 薄仕文. 基于圆锯式灌木切割试验台的动力学仿真分析[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2022.

BO Shiwen. Dynamic simulation analysis based on circular sawing test bench for bush cutting[D]. Harbin: Northeast Forestry

- University,2022. (in Chinese)
- [42] ORLOWSKI K A, OCHRYMIUK T, ATKINS A. An innovative approach to the forecasting of energetic effects while wood sawing[J]. *Drvna Industrija*, 2014, 65(4): 273 – 281.
- [43] KWON H W, CHOI W K, PARK S J, et al. Cutting theory of unsupported brushes using peripheral blades[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2018, 19(1): 103 – 108.
- [44] CHUCHEEP T, MAHATHANINWONG N, JANUDOM S. Analytic hierarchical method applied to brush cutter blade selection [J]. *South African Journal of Industrial Engineering*, 2019, 30(1): 187 – 195.
- [45] 马永康. 柠条切割机理及收割机切割器设计研究[J]. *山西农业大学学报*, 2006, 26(6): 119 – 122.
MA Yongkang. The cutting theory of *Cargana microphylla* and the design of the cutting machine of harvester[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University*, 2006, 26(6): 119 – 122. (in Chinese)
- [46] 吴昆,宋月鹏. 农作物茎秆切割理论与方法研究进展分析[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(6): 1 – 20.
WU Kun, SONG Yuepeng. Research progress analysis of crop stalk cutting theory and method[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(6): 1 – 20. (in Chinese)
- [47] 郇晓龙,尤泳,王德成,等. 王草收获机旋转刀盘式平茬切割装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(5): 112 – 124.
HUAN Xiaolong, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Design and experiment of rotary cutter disc type flat stubble cutting device for king grass harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(5): 112 – 124. (in Chinese)
- [48] 刘建华. 灌木收获机技术性能分析[J]. *农业机械*, 2016(10): 116 – 118.
- [49] 李晓栋,方宪法,韩增德,等. 基于 ANSYS/LS – DYNA 的滚刀式甜高粱切割器动力学仿真[J]. *中国农业科技导报*, 2015, 17(3): 70 – 76.
LI Xiaodong, FANG Xianfa, HAN Zengde, et al. Dynamic simulation of sweet sorghum cutting based on ANSYS/LS – DYNA [J]. *China Agricultural Science and Technology Review*, 2015, 17(3): 70 – 76. (in Chinese)
- [50] 刘金南. 灌木平茬机的设计及试验研究[D]. 南京:南京林业大学,2014.
LIU Jinnan. Design and experimental study of the shrub stumping machine[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2014. (in Chinese)
- [51] 刘志刚,王德成,翟改霞,等. 往复式双动刀灌木收割机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(增刊2): 102 – 106.
LIU Zhigang, WANG Decheng, ZHAI Geixia, et al. Design and experiment on reciprocating double knife shrub harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(Supp. 2): 102 – 106. (in Chinese)
- [52] 陈诚. 往复切割器式灌木平茬机切割力的研究[D]. 北京:北京林业大学,2011.
CHEN Cheng. Research of cutting force for reciprocating knife bush harvester[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011. (in Chinese)
- [53] 苏飞保,王振华,翟改霞,等. 柠条机械化收获技术与装备研究现状及发展趋势[J]. *农业工程*, 2021, 11(10): 20 – 27.
SU Feibao, WANG Zhenhua, ZHAI Gaixia, et al. Research status and development trend of *Caragana korshinskii* mechanized harvesting technology and equipment[J]. *Agricultural Engineering*, 2021, 11(10): 20 – 27. (in Chinese)
- [54] 常涛涛. 基于磨损量预测的平茬圆锯片齿形结构优化设计[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学,2023.
CHANG Taotao. Optimal design of tooth profile structure of flat stubble circular saw blade based on wear prediction[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [55] 杨洋. 基于有限元软件对柠条切断刀具结构优化及切削参数的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.
YANG Yang. Research on structure optimization and cutting parameters of korshinsk peashrub cutting tools based on finite element software[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [56] 邢东伦,陈月锋,高威,等. 自走式柠条联合收获机平茬试验[J]. *农业工程*, 2020, 10(9): 21 – 25.
XING Donglun, CHEN Yuefeng, GAO Wei, et al. Stubble experiment of self-propelled *Caragana microphylla* combined harvester[J]. *Agricultural Engineering*, 2020, 10(9): 21 – 25. (in Chinese)
- [57] 高海洋. 刺五加灌木收割机的设计与技术研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2024.
GAO Haiyang. Study on design and technology of shrub manyprickle acanthopanax root[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2024. (in Chinese)
- [58] MENG Y, WEI J, WEI J, et al. An ANSYS/LS-DYNA simulation and experimental study of circular saw blade cutting system of mulberry cutting machine[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 157: 38 – 48.
- [59] 薄仕文,李耀翔,王海滨. 灌木切割试验装置切割振动分析[J]. *森林工程*, 2022, 38(5): 75 – 82.
BO Shiwen, LI Yaoxiang, WANG Haibin. Cutting vibration analysis of shrub cutting experimental device [J]. *Forest Engineering*, 2022, 38(5): 75 – 82. (in Chinese)
- [60] 杨春梅,高海洋,刘九庆. 灌木平茬机切割系统参数优化设计与验证[J]. *农机化研究*, 2024, 46(8): 42 – 49.
YANG Chunmei, GAO Haiyang, LIU Jiuqing. Parameter optimization design and verification of cutting system of shrub stubble leveler[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2024, 46(8): 42 – 49. (in Chinese)
- [61] 马中祥. 沙生灌木圆盘锯切试验台的设计与试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学,2020.
MA Zhongxiang. Design and experimental study of a disc sawing test bench for sandy shrubs[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [62] MANOR G, SION D. Cleared dirt roads and towed bridges for moving in forests[C]//2003 ASAE Annual Meeting, 2003.

[63] 马阿娟,俞国胜.沙生灌木平茬机仿形切割装置设计[C]//全国林业机械新产品新技术示范推介会暨第三届全国林业机械发展论坛论文集,2014.

[64] 冀振,刘志刚,余剑南,等.灌木平茬机仿形机构的设计及仿真分析[J].机械设计与制造,2021(8):70-74.
JI Zhen, LIU Zhigang, YU Jiannan, et al. Design and simulation analysis of profiling mechanism on shrub cutter[J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(8):70-74. (in Chinese)

[65] 管燕燕.柠条平茬收获装备技术分析与设计思路[J].农业技术与装备,2018(8):9-11.
GUAN Yanyan. Analysis on the technology and design of *Caragana korshinskii* planting stubble harvesting equipment[J]. Agricultural Technology and Equipment, 2018(8):9-11. (in Chinese)

[66] 段震华.柠条联合收获机输送切碎机构设计[D].太谷:山西农业大学,2015.
DUAN Zhenhua. Design of conveying and shredding mechanism of *Caragana korshinskii* combine harvester[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2015. (in Chinese)

[67] 闫希宇,丁学谊,邱灶杨,等.自走式沙柳联合收获机设计和分析[J].农业机械,2011(24):59-61.

[68] 王教滨,阿力木·买买提吐尔逊,李谦绪,等.青饲料收获机切碎装置设计与试验[J].农机化研究,2024,46(5):31-36,44.
WANG Jiaobin, ALIMU Maimaititursun, LI Qianxu, et al. Design and test of shredding device of green feed harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(5):31-36, 44. (in Chinese)

[69] 滕绍民,华荣江,兰宁,等.青饲料收获机自动磨刀装置及弧形弯刀设计[J].农业工程,2022,12(6):100-103.
TENG Shaomin, HUA Rongjiang, LAN Ning, et al. Design on automatic knife sharpening device and curved cutlass for silage harvester[J]. Agricultural Engineering, 2022, 12(6):100-103. (in Chinese)

[70] 范利海,傅万四.我国灌木收割平茬机械发展现状调查分析[J].木材加工机械,2010,21(6):30-32.
FAN Lihai, FU Wansi. Study investigation of development of bush harvesting machinery[J]. Wood Processing Machinery, 2010, 21(6):30-32. (in Chinese)

[71] IOANNIS D, DOMINIK R. Sustainable short rotation coppice: a handbook[M]. WIP Renewable Energies, Munich, 2015.

[72] KOFMAN P. Harvesting short rotation coppice willow[J]. COFORD Harvesting/Transport, 2012, 29: 1-6.

[73] 买农机网[EB/OL]. [2024-05-06]. https://www.mainongji.com/nongji/shouhuo/geshaiji/2014-11-05/mainongji_73119.html.

[74] HOMELITE. 16" Electric Chainsaw[EB/OL]. [2024-05-06]. <https://www.homelite.com/catalog/chainsaws/UT43122>.

[75] 曲阜志成机械有限公司[EB/OL]. [2024-05-06]. <https://qfzjx.cn.china.cn/supply/4475155560.html>.

[76] 田增强.柠条捡拾切碎机设计研究[D].太谷:山西农业大学,2014.
TIAN Zengqiang. Design and research of pickup cutting mechanism on *Caragana korshinskii*[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2014. (in Chinese)

[77] 马阿娟,陈忠加,俞国胜,等.履带自行式沙地灌木林平茬机的研制及应用[J].林业科学,2015,51(7):99-106.
MA Ajuan, CHEN Zhongjia, YU Guosheng, et al. Development and application of crawler self-propelled desert shrub stumper[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(7):99-106. (in Chinese)

[78] 张呈彬.柠条收获机的设计[D].银川:宁夏大学,2018.
ZHANG Chengbin. Design of caragana harvester[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2018. (in Chinese)

[79] 胡政.基于柠条生物学特性的平茬揉丝一体机设计与仿真[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.
HU Zheng. Design and simulation of stumping and rubbing silk machine based on the biological characteristics of *Caragana korshinskii*[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021. (in Chinese)

[80] EISENBIES M, VOLK T, ABRAHAMSON L, et al. Development and deployment of a short rotation woody crops harvesting system based on a case New Holland forage harvester and SRC woody crop header[R]. State Univ. of New York College of Environmental Science and Forestry (SUNY-ESF), Syracuse, NY (United States), 2014.

[81] VOLK T A, EISENBIES M H, HALLEN K. The development of harvesting systems in woody biomass supply chains: a case study of short rotation woody crops[M]. Sustainable Biorefining of Woody Biomass to Biofuels and Biochemicals. Woodhead Publishing, 2024: 43-63.

[82] Rostselmash[EB/OL]. [2024-05-06]. <https://en.rostselmash.com>.

[83] SCHWEIER J, BECKER G. New Holland forage harvester's productivity in short rotation coppice: evaluation of field studies from a German perspective[J]. International Journal of Forest Engineering, 2012, 23(2): 82-88.

[84] HSAB. HSAB fully hydraulic head on John Deere[EB/OL]. [2024-05-06]. <https://salixab.se/machines/>.

[85] 五征高北.4QZ-30自走式青饲料收获机[EB/OL]. [2024-05-06]. <https://nyzb.wuzheng.com.cn/webProduction/showDetail?id=4028e58b7a752074017ce4832a630056>.

[86] 内蒙古自治区科学技术厅.“兵工造”柠条平茬收获机助力乡村振兴[EB/OL]. [2024-05-06]. https://kjt.nmg.gov.cn/kjdt/mtjj/202302/t20230228_2263750.html.

[87] 中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院有限公司.饲草饲料收获装备[EB/OL]. [2024-05-06]. http://www.caamshb.org.cn/qyry_56/.

[88] STEFAN P P V, RAFFAELE S, MARK E, et al. Mechanised harvesting of short-rotation coppices[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 76:90-104.

[89] GUERRA S P S, OGURI G, EUFRADE H D J, et al. Mechanized harvesting of bamboo plantations for energy production;

- preliminary tests with a cut-and-shred harvester[J]. *Energy for Sustainable Development*, 2016, 34: 62 – 66.
- [90] NIEMIEC W, STACHOWICZ F, TRZEPICIEŃSKI T, et al. Small-scale harvesting machinery for short rotation willow coppice [J]. *Czasopismo Inżynierii Lądowej Środowiska i Architektury*, 2015, 62: 315 – 324.
- [91] VANBEVEREN S P P, SPINELLI R, EISENBIES M, et al. Mechanised harvesting of short-rotation coppices[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 76: 90 – 104.
- [92] LAZDINS A, MAKOVSKIS K, ZIMELIS A, et al. Productivity of new harvester prototype in willow plantations with different growing stock[C]//22nd International Scientific Conference, Engineering for Rural Development, 2023.
- [93] HOFFMANN T, EHLERT D, PECENKA R, et al. An efficient harvest line for short rotation coppices with a new mower-chipper[J]. *Mechanization in Agriculture & Conserving of the Resources*, 2015, 61(3): 3 – 5.
- [94] 韩宝生, 刘树民, 朱守林, 等. 多功能沙生灌木集运装备的研制[J]. *农机化研究*, 2014, 36(2): 123 – 126.
HAN Baosheng, LIU Shumin, ZHU Shoulin, et al. Development on multifunctional device for collection loading and transportation of desert shrub[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2014, 36(2): 123 – 126. (in Chinese)
- [95] SCHWEIER J, BECKER G. Harvesting of short rotation coppice-harvesting trials with a cut and storage system in Germany [J]. *Silva Fennica*, 2012, 46(2): 287 – 299.
- [96] Baecut. Der Stembundler[EB/OL]. [2024 – 05 – 06]. <https://www.baecut.de/produkte/stembundler/>.
- [97] LAVOIE F, D'AMOURS L, SAVOIE P. Development and field performance of a woody biomass harvester[C]// International Conference of Agricultural Engineering XXXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Brazil, 2008.
- [98] SAVOIE P, HÉBERT P, ROBERT F, et al. Harvest of short-rotation woody crops in plantations with a biobaler[J]. *Energy and Power Engineering*, 2013, 5(2A): 39 – 47.
- [99] RUTZ D, JANSSEN R, HOFER A, et al. Biofuels assessment on technical opportunities and research needs for Latin America [R]. *Proceedings of the 16th European Biomass Conference and Exhibition*, 2008: 2661 – 2669.
- [100] 赵洪元. 自走式削片机的设计与研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
ZHAO Hongyuan. Design and research of selfpropelled chipper[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017. (in Chinese)
- [101] BOBVILA. The 7 wood chippers that cut best in our tests[EB/OL]. [2024 – 05 – 06]. <https://www.bobvila.com/articles/best-wood-chipper/>.
- [102] BEN BURGESS. Heizohack HM8 – 400 chipper[EB/OL]. [2024 – 05 – 06]. <https://www.benburgess.co.uk/shop/heizohack-hm8-400/>.
- [103] DIEFFENBACHER. Maier drum chipper-HRL[EB/OL]. [2024 – 05 – 06]. <https://www.dieffenbacher-maier.de/en/products/products/size-reduction/hrl-drum-chipper/index.html>.
- [104] BRUKS. Market-leading machines that process any waste wood product[EB/OL]. [2024 – 05 – 06]. <https://bruks-siwertell.com/chipping/drum-chipper-horizontal>.
- [105] 马弘跃. 沙柳专用削片机切削性能测试及振动特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
MA Hongyue. Test and vibration characteristic study on the cutting performance of the special salix-psammophila chipper [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [106] 安珍. 沙柳材切削加工性能研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
AN Zhen. Study on the cutting performance of salix[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2007. (in Chinese)
- [107] 马文龙, 韩望, 安珍, 等. 沙柳试验削片机切削机构的设计[J]. *林业工程学报*, 2016, 1(4): 124 – 128.
MA Wenlong, HAN Wang, AN Zhen, et al. Design on the cutting mechanism of experimental sandy-shrub chipper[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2016, 1(4): 124 – 128. (in Chinese)
- [108] 袁湘月, 王磊, 李翀. 灌木柠条削片质量影响因素的试验研究[J]. *林业机械与木工设备*, 2010, 38(6): 11 – 13.
YUAN Xiangyue, WANG Lei, LI Chong. Experimental study on the factors influencing the quality of *Caragana korshinskii* chip[J]. *Forestry Machinery and Woodworking Equipment*, 2010, 38(6): 11 – 13. (in Chinese)
- [109] RUTZ D, MERGNER R, JANSSEN R. Sustainable heat use of biogas plants; a handbook[M]. Munich: WIP Renewable Energies, 2015.
- [110] 赵宁爽. 沙生灌木平茬揉丝一体机的优化设计与关键结构仿真[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
ZHAO Ningshuang. Optimization design and key structure simulation of an integrated machine for sand shrubs cutting and rolling[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [111] 巴音达来. 柠条灌木饲料加工流程及饲喂利用试验初报[J]. *内蒙古林业科技*, 2006(2): 14 – 15, 24.
BA Yindalai. Technological process of *Caragana microhylla* feed and utilization of feeding[J]. *Inner Mongolia Forestry Science and Technology*, 2006(2): 14 – 15, 24. (in Chinese)
- [112] 刘飞, 王伟, 张涛, 等. 锤片式揉碎机气流场数值模拟与试验[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(增刊): 227 – 232.
LIU Fei, WANG Wei, ZHANG Tao, et al. Air flow field numerical simulation and test of hammer rubbing machine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(Supp.): 227 – 232. (in Chinese)
- [113] 袁洪方, 王德成, 王光辉, 等. 秸秆铡切揉搓装置优化设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(增刊): 153 – 157.
YUAN Hongfang, WANG Decheng, WANG Guanghui, et al. Design and experiment of straw cutting and rubbing process device[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(Supp.): 153 – 157. (in Chinese)
- [114] 刘禹辰. 基于离散元法的玉米秸秆揉丝仿真与试验研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2023.

LIU Yuchen. Simulation and experimental study of corn stalk kneading based on discrete element method[J]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[115] 陈涛,衣淑娟,李衣菲,等. 铡切揉碎协同式牧草揉丝机设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(2):149–159.

CHEN Tao, YI Shujuan, LI Yifei, et al. Design and test of cutting and crushing cooperative silk kneading machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(2):149–159. (in Chinese)

[116] 马卫民,刘宝军. 柠条专用揉碎设备的研制[C]//国际农业工程大会现代畜牧业装备创新与产业化分会场, 2010.

[117] 山东五征高北农牧机械有限公司,山东倍托农牧机械有限公司,山东五征集团有限公司. 一种灌木收割揉丝打捆一体机及灌木加工方法:CN202410004247.4[P]. 2024–04–05.

[118] 谢婉莹,马少辉,赵丽. 秸秆粉碎设备的研究现状与技术分析[J]. 新疆农机化,2023(5):14–17, 24.

XIE Wanying, MA Shaohui, ZHAO Li. Research status and technical analysis of straw crushing equipment[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization,2023(5):14–17,24. (in Chinese)

[119] 陈海林.9FC–60 型锤片式柠条饲草粉碎机的设计与改进[J]. 当代农机,2016(12):64–66.

[120] 白海洋. 柠条粉碎特性分析及其粉碎装置设计研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.

BAI Haiyang. Research on comminution characteristics of *Caragana korshinskii* and its design of comminution device[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2023. (in Chinese)

[121] 王珊. 果园树枝粉碎机的设计与试验[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2021.

WANG Shan. Design and experiment of orchard branch shredder[D]. Yangling: Northwest A&F University,2021. (in Chinese)

[122] 魏万成. 多功能枝条粉碎机设计与优化研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2020.

WEI Wancheng. Research on design and optimization of multi-functional branch shredder[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University,2020. (in Chinese)

[123] CRISTÓVÃO L, BROMAN O, GRÖNLUND A, et al. Main cutting force models for two species of tropical wood[J]. Wood Material Science & Engineering, 2012,7(3):143–149.

[124] VERMEER. TG7000 tub grinder[EB/OL]. [2024–05–06]. <https://www.vermeer.com/na/tub-grinders/tg7000>.

[125] EYMA F, MÉAUSOONE P J, MARTIN P. Strains and cutting forces involved in the solid wood rotating cutting process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004,148(2):220–225.

[126] 宏鑫机械. 综合破碎机[EB/OL]. (2020–09–05)[2024–05–06]. <https://www.sdzphx.com/content/?1176.html>.

[127] 韩葆颖. 柠条智能收获制粒装备技术现状及发展趋势[J]. 农产品加工,2020(13):79–81.

HAN Baoying. Current situation and development trend of intelligent harvesting and pelletizing equipment for caragana[J]. Agricultural Products Processing,2020(13):79–81. (in Chinese)

[128] 王超,金海,李长青,等. 内蒙古沙生灌木资源饲料化利用的生态和经济效应[J]. 畜牧与饲料科学,2021,42(1):78–82.

WANG Chao, JIN Hai, LI Changqing, et al. Ecological and economic effects of forage utilization of desert shrub resources [J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2021,42(1):78–82. (in Chinese)

[129] 朝鲁孟其其格. 混合草颗粒制粒技术及饲用价值评价的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.

CHAO Lumengqiige. Research on granulation technology and feeding evaluation of mixed forage particles[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2010. (in Chinese)

[130] 安治臻. 柠条与玉米秸秆混合制粒性能试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.

AN Zhizhen. Experimental study on pelletizing performance of caragana and corn straw mixeture[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2023. (in Chinese)

[131] 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.

[132] 贾开发. 环模制粒机振动特性与优化研究[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学,2023.

JIA Kaifa. Research on vibration characteristics and optimization of ring die pelleting machine[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology,2023. (in Chinese)

[133] 丛宏斌,赵立欣,姚宗路,等. 生物质环模制粒机产能与能耗分析[J]. 农业机械学报,2013,44(11):144–149.

CONG Hongbin, ZHAO Lixin, YAO Zonglu, et al. Analysis on capacity and energy consumption of biomass circular mould granulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(11):144–149. (in Chinese)

[134] 彭飞,王红英,康宏彬,等. 小型可调间隙饲料制粒机设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(4):103–110.

PENG Fei, WANG Hongying, KANG Hongbin, et al. Design and experiment on small-scale adjustable clearance pellet feed mill[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(4):103–110. (in Chinese)

[135] 王伟,宫元娟,白雪卫,等. 移动式秸秆制粒机作业速度调控系统研究[J]. 农业机械学报,2021,52(10):186–195.

WANG Wei, GONG Yuanjuan, BAI Xuewei, et al. Investigation on operating speed regulation system of mobile straw granulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(10):186–195. (in Chinese)

[136] 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)