

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2024.09.048

石洪康, 陈义安, 祝诗平, 等. 我国蚕桑生产机械化研究进展[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(9): 318-326

Shi Hongkang, Chen Yi'an, Zhu Shiping, et al. Research progress on mechanization of sericulture production in China [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(9): 318-326

我国蚕桑生产机械化研究进展*

石洪康^{1, 2}, 陈义安¹, 祝诗平², 李林波^{1, 2}, 张剑飞¹

(1. 四川省农业科学院蚕业研究所, 四川南充, 637000; 2. 西南大学工程技术学院, 重庆市, 400700)

摘要:栽桑养蚕是农业体系中重要的组成部分, 机械化生产技术及装备成为目前关注的热点。介绍蚕桑产业的发展现状, 列举家蚕饲育和制种环节的主要农艺及特点。总结桑园管理、家蚕饲育、蚕茧采收与分选、家蚕制种等方面的机械化研究进展。对蚕桑生产机械化发展进行分析, 指出目前存在产业链长, 需要的机械种类多; 农艺复杂, 机械研发难度大; 家蚕生命周期短, 样机试验受限等问题。给出对应的建议, 包括开展多功能桑园管理和特有养殖装备研究; 注重宜机化研究, 推动农机与农艺的深度融合; 建立家蚕机械化养殖示范基地, 研究蚕桑机械化生产技术等方面。

关键词:蚕桑; 桑园管理机械; 养蚕机械; 工厂化养殖

中图分类号: S224; S225; S894 文献标识码: A 文章编号: 2095-5553 (2024) 09-0318-09

Research progress on mechanization of sericulture production in China

Shi Hongkang^{1, 2}, Chen Yi'an¹, Zhu Shiping², Li Linbo^{1, 2}, Zhang Jianfei¹

(1. Sericulture Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Nanchong, 637000, China;
2. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing, 400700, China)

Abstract: Mulberry planting and sericulture is an important part of the agricultural system, mechanized production technology and equipment have become the focus of attention. In this article, the development status of sericulture industry is introduced and main agronomy and characteristics of silkworm rearing and seeds production links are listed. Mechanized research progress in mulberry field management, silkworm rearing, cocoons harvesting and sorting, and silkworm seeds production are summarized in detail. The mechanization development of sericulture production is analyzed, the main problems at present are pointed out, such as long industrial chain resulting in the variety of machines are required, the difficulty of mechanical research and development because of complicated agronomy, and the short growth cycle of silkworm leads to the limited test conditions. Some corresponding suggestions are given, including research on multi-functional mulberry field management and unique silkworm rearing equipment, attaching importance to research on agronomic reform suitable for mechanized production, promoting the in-depth integration of machinery and agronomy, and establishing demonstration bases of mechanized silkworm rearing, researching mechanized sericulture production technology.

Keywords: sericulture; mulberry garden management machinery; sericulture machinery; factory farming

0 引言

近年来, 蚕桑成为许多地区实施脱贫攻坚和乡村振兴战略的主导产业, 为农业农村发展作出重要贡献。

但我国蚕桑生产主要依赖于手工操作, 存在劳动强度大, 生产效率低和工作环境恶劣等问题, 因此机械化生产成为目前行业共同关注的焦点^[1-3]。

由于我国蚕桑机械研究起步晚, 基础薄弱, 导致目前

收稿日期: 2023年1月18日 修回日期: 2023年5月22日

* 基金项目: 四川省农业科学院“1+9”揭榜挂帅科技攻关任务(1+9KJGG008); 国家蚕桑产业技术体系(CARS-18); 四川省财政自主创新专项(2022ZZCX087); 四川省科技计划项目(2021YFYZ0024-3)

第一作者: 石洪康, 男, 1993年生, 四川剑阁人, 博士研究生; 研究方向为智能农业装备。E-mail: swushk@163.com

通讯作者: 张剑飞, 男, 1974年生, 四川南充人, 硕士, 研究员; 研究方向为智能农业装备。E-mail: 783890694@qq.com

机械化生产程度较低。同时,外界对蚕桑的农艺特点了解不足,造成从事蚕桑机械研究的人员和机构也相对较少。因此,为有效引导蚕桑机械的研究工作,本文在对蚕桑产业发展现状介绍的基础上,总结近10年蚕桑机械研究取得的进展,并分析存在的主要问题,对未来发展作出展望。

1 蚕桑产业发展现状

1.1 蚕桑产业背景

栽桑养蚕在我国具有悠久的历史,造就了举世瞩目的丝绸之路。自20世纪90年代起,随着我国市场经济的全面发展,丝绸的外贸地位逐步下降。再加之东部地区产业结构调整以及蚕桑自身的生产水平落后等因素,造成蚕桑产业的整体规模出现严重下滑,产业发展步入低谷期^[4,5]。直至2008年,国家成立现代农业产业技术体系,将蚕桑纳入首批50个现代农业产业技术体系^[6],为产业发展注入科技力量。自“十三五”以来,我国大力实施脱贫攻坚战略,将产业发展作为脱贫攻坚中的主要措施。因蚕桑产业具备投资小、见效快,还有助于生态治理的优点,许多地区选择蚕桑为主导产业大力发展,推动产业迎来新的发展高潮。据国家茧丝办发布的数据,截止2020年,我国共有桑园面积764.3 km²,蚕茧发种量1 643.3万张,蚕茧产量715 kt,全国蚕农售茧总收入241亿元,在产业规模上,继续保持世界领先地位^[7]。

目前我国的桑园主要集中在西南地区,其中,广西的桑园面积为197.2 km²,四川的桑园面积为150.1 km²,这两个省区桑园面积约占全国总面积的45%。同时,四

川和广西的桑园大多分布于丘陵山区,该地区的农业机械化的整体水平偏低。

1.2 蚕桑生产模式

当前我国蚕桑生产模式发生转变,传统的家庭零散养蚕逐步被以园区、龙头企业和合作社为主的规模化养殖取代^[7],但主要生产方式还是手工生产。同时,蚕桑产业链也在不断增长,桑树除用于养蚕外,也广泛用于桑叶茶、桑叶面、桑果酒等综合开发^[8];蚕茧除用于纺织品外,也被用于医疗、生物和工业材料领域^[9],这对桑园田间管理和养殖技术提出更高的要求。

1.3 蚕桑生产农艺

1.3.1 桑园管理

桑园管理与果园管理相似,包含灌溉、施肥、嫁接、除草、病害防治等内容。较为特殊的在于桑园每年夏季或冬季需开展1次伐条。伐条时需将全部枝条去除,仅留下树干。由于桑枝的韧性高,伐条的劳动强度大,伐除的桑枝还需进行粉碎,用于还田或食用菌生产。在养蚕季节,每天都需要采摘桑叶,目前仅少部分地区使用机械收割草本桑,用作畜禽养殖的辅助饲料外^[10],桑叶采摘仍旧依赖手工操作,劳动密集且强度较大,是养蚕过程中最主要的人力支出。

1.3.2 家蚕饲养

饲养一般是指家蚕从卵到茧的过程,如表1所示,饲养的农艺主要包括桑叶喂食、消毒、除沙、移箔、上蔟、采茧和蚕茧分选等。饲养还涉及一些辅助农艺,例如桑叶清洗消毒、沥干和切碎等。

表1 家蚕饲养农艺及特点
Tab. 1 Agronomy and characteristics of silkworm rearing

农艺	内容	技术特点
喂食	将桑叶饲喂给家蚕	每天早、中、晚饲喂,桑叶需清洗、消毒并沥干,给桑量必须充足、均匀,饲喂小蚕的桑叶切碎成与蚕体相同大小的矩形片,饲喂大蚕的桑叶可不切碎
消毒	将石灰粉洒在蚕座中进行除湿和消毒;使用次氯酸钠溶液对蚕房地表和蚕具喷洒消毒;将漂白粉稀释后清洗桑叶消毒	每天早、晚饲喂之前洒2次石灰粉;蚕房每天消毒1次,蚕具在使用前后消毒;桑叶在饲喂前消毒并沥干
除沙	清理掉蚕箔中的家蚕粪便、未食尽的桑叶、石灰粉和个别病蚕	每天1次,操作方法是:先在蚕座上平铺一张蚕网,把桑叶撒在蚕网上,待家蚕爬上蚕网食桑后,将蚕网提起并放置到另一个干净的蚕箔中,再将原蚕箔中的蚕沙倒掉,通常需2人完成
移箔	互换蚕箔在蚕房中的位置,使家蚕生长环境均匀	在生产质量较高的地方开展,例如蚕种场和蚕业研究所,每天移动1~2次
提青	去除蚕箔中生长发育缓慢的家蚕	在绝大多数家蚕休眠后开展,方法与除沙相同,爬上蚕网的家蚕为青蚕
催青	孵化蚕卵	保持蚕卵的环境均匀,确保蚕卵孵化的一致性
上蔟	把即将吐丝的家蚕放置到营茧工具中	饲养要求较高时,需要人工逐个放置在营茧工具中。也可直接将营茧工具放在蚕座上,然后家蚕自行爬向营茧孔
采茧	将蚕茧从营茧工具中取出	为防止蚕蛹化蛾,需在2~3天内完成
烘干	去除蚕茧水分,防止蚕蛹化蛾和霉变	由蚕茧收购站、缫丝企业开展
选茧	对蚕茧进行品质分选	根据蚕茧的外观特征分选,目前主要依赖人工操作
削茧	将蚕茧削开,取出蚕蛹	削茧和倒出蚕蛹时均不能损伤蚕蛹,需在2~3天内完成
雌雄鉴别	鉴别蚕蛹的雌雄性别	主要由人工逐个鉴别,经验性较强,在削茧时同步完成

目前家蚕仍属于季节性饲养,我国的饲养季节集中在每年的4—10月,期间可饲养6~8批次。

1.3.3 家蚕制种

家蚕制种主要在科研机构 and 蚕种企业开展,目的是蚕种生产、品种杂交选育或资源保存,制种中涉及的主要农艺为削茧和蚕蛹的雌雄鉴别。

2 蚕桑机械研究进展

蚕桑的产业链长,包含的机械种类较多,根据NY/T 1640—2021《农业机械分类》标准^[11],桑园管理机械包括耕种地机械、种植施肥机械和田间管理机械。家蚕饲养机械归属的大类为畜禽养殖机械,小类为饲养设备,品目为桑蚕饲养设备。蚕茧采收被单独归类,大类归属在畜禽产品采集储运设备,小类归属在畜禽产品采集设备,品目为采茧机。

为便于归类叙述,本文在遵循NY/T 1640—2021《农业机械分类》标准的基础上,根据蚕桑生产的农艺流程,分别从桑园管理、家蚕饲养、蚕茧采收与分选和家蚕制种方面介绍蚕桑生产机械化的研究进展。

2.1 桑园管理机械

桑园管理与果园管理相似,目前桑园管理机械研究以引进果园管理机械为主^[12]。李法德等^[13]发明了一种多功能桑园管理机,使用微耕机为主动动力,通过改进优化工作部件,单机实现耕地、除草和变量施肥等功能。郭勇刚等^[14]改进了一种桑园管理机,通过在微耕机上加装水泵和喷水头的方式,单机实现灌溉、松土、喷药和除草等功能。卢营蓬等^[15]设计了一种桑园电动除草机,适用于丘陵山区桑园的除草作业。山东农业大学杨硕^[16]根据桑园种植农艺要求,设计了一种桑园动力耙,将刀具垂直安装在圆形刀盘上,采用回转的方式对土壤进行立式切削,可增加耕地深度,并在耙上设计了保护装置,避免在工作过程中损伤桑树。高天浩等^[17]对桑树枝条在不同取样位置、直径和品种下剪切、压缩和弯曲等力学性能进行了研究。吴建梅等^[18]设计了一种双杠杆省力桑枝大剪,通过增长动力臂和使用2级杠杆方式实现省力,在生产中推广良好。张增产^[19]设计了一种手持式桑园伐条机,采用倒V型刀片来防止桑枝脱落,适应不同高度桑枝伐条。张相恒^[20]在牧草收割机的基础上,改进了一种草本桑平茬机,主要由圆盘锯割台、传动系统、动力机构、丝杠调节机构等组成,可根据需要调节割茬高度,适用于草本桑的平茬作业。张晋^[21]设计了一种草本桑收割机,主要由行驶机构、切割机构、输送机构、打捆机构传动系统和测控系统等组成,可完成草本桑的连续收割和自动打捆作业,也可用于小麦、水稻和柳条等作物的收割试验。

胡光荣等^[22]设计了一种单锯盘燃油伐条机,利用微耕机为主动动力,采用主轴带动蜗杆与蜗轮啮合,驱动拨枝器将行间两侧的桑枝向中间聚拢,然后割盘高速旋转完成桑枝伐条。张剑飞等^[23]研制了一种气动桑枝剪,使用微型柴油机驱动气泵,工作时手持气动剪刀进行桑枝剪伐,并使用微耕机带动设备在田间行进,适宜在丘陵山区的桑园管理。胡迎春等^[24, 25]在桑叶采摘方面开展了大量的研究,设计了往复式、摇杆式、螺旋式等多款采摘机,但目前仍处于前期理论研究阶段。翁连娟^[26]使用ZigBee技术,设计了一套桑园环境监控系统,实现在手机端对环境温度、光照强度和土壤湿度的实时监测。

综上所述,桑园管理机械已经受到研究人员的广泛关注,尤其在桑园施肥、除草和桑枝剪伐等环节,且现有装备可满足地势平缓地区的机械化生产要求,但丘陵山区的桑园由于作业环境复杂、土壤粘度高和基础设施落后等因素,管理装备的作业性能和效率还有待提升。另外,采用以微耕机为动力源,研发不同的作业机构实现“一机多用”是丘陵山区桑园管理机械研发的主要思路,但现有微耕机仍存在能耗高、功效低、操作舒适性差等问题,也是丘陵山区桑园管理机械化迫切需要解决的难题。

2.2 家蚕饲养机械

我国目前盛行“两段式”养蚕模式,将养蚕分为养小蚕(1~3龄蚕)和养大蚕(4~5龄蚕),其中小蚕采取集中共育模式,即将一个片区的蚕种集中在一处由技术人员饲养至2龄或3龄眠起,再分发给蚕农饲养。结合这一现状,家蚕饲养设备的研究也分为大蚕饲养机和小蚕饲养机研究。

2.2.1 小蚕饲养机

李林波等^[27]开发了一种带传送式小蚕饲养机,采用传输带对蚕箔进行传输,在机架的固定位置安装给桑装置和洒石灰粉装置,蚕箔传输时自动完成桑叶饲喂和洒石灰粉,实现小蚕的自动饲喂。石洪康等^[28]设计了一种螺旋升降式小蚕饲养机,采用码垛、拆垛和下传送式的原理进行蚕箔的拆解、传动和堆叠,在传送时进行洒粉消毒和桑叶饲喂。由于采用下传输式的蚕箔传输原理,使每个蚕箔的行程固定,传输还能改变蚕箔的堆叠次序,实现移箔功能。在此基础上,汤自强^[29]设计了一种自动小蚕饲养机,该设备对蚕箔传输机构和拆箔与叠箔机构进行了改进,将机械结构式的拆箔装置改为控制电机带动转臂转动,使其举升蚕箔更加稳固,并采用CAN总线开发出控制系统,使用触摸屏设计出控制界面,增强了设备人机交互能力。韦相立等^[30]采用工业流水线方式,设计了一种小蚕饲养自动化生产线总成,将蚕箔放置在传送带上传输,在固定位置上给桑的方式实现小蚕的自动化饲养。

机械化小蚕饲育的关键技术在于桑叶喂食的均匀性,难点在于需根据小蚕的个体大小确定桑叶的切碎程度,导致桑叶的物料特性不固定。同时,家蚕在生长过程中,体型每一天都会增长,所以蚕座分布在蚕箔中的位置也会不断变化,如何根据小蚕的生长范围进行精准给桑也是目前面临的难点。在这一问题上,何玉等^[31]使用图像处理技术进行了蚕座位置与桑叶饲喂均匀性研究。但其方法对均匀性的判断只局限于饲喂不足时,当过度饲喂时,很难提取到白色像素点。

2.2.2 大蚕饲育机

四川省农业科学院与南充某公司联合研制了一种双螺旋式大蚕饲育机。采用轨道传输的原理对蚕箔进行传输,在一根轨道安装了一根链条,将所有蚕箔一侧串联,另一根轨道上设计了滚动摩擦结构,使链条能够带动蚕箔行进并顺利通过弯道,再将传统的固定层蚕架改进为螺旋升降式结构,实现蚕箔可从蚕架的底层旋转移动至最顶层,也可从最顶层移动到底层。同样在固定位置进行桑叶喂食和洒石灰粉。

胡光荣等^[32]设计了一种多层循环式大蚕饲育机,采用将所有蚕箔挂在链条上,链条转动带动蚕箔在多层蚕台上依次循环移动,在固定位置进行桑叶喂食和撒粉消毒。郭曦等^[33]设计了一种垂直旋转式大蚕饲育机,采用将多个蚕台上下往复式旋转,在固定位置进行桑叶饲喂和撒粉消毒的方式,实现家蚕的机械化饲育。

针对将蚕箔进行传输的原理研发出的大蚕饲育机容易因局部故障导致整机停运的问题,西南大学和四川省农业科学院联合研发了一种自动化大蚕饲育机^[34],采用在多层固定蚕台上安装轨道,给桑和撒粉装置沿轨道行进,并使用升降机将给桑和撒粉装置送往不同层的蚕台,实现大蚕的自动化饲育。

针对部分地区在地面饲养家蚕的模式,广西某公司研发了一种喂蚕平台,在地面安装轨道,并架设操作平台沿着轨道行进,饲喂者站在轨道上手工铺洒桑叶,解决了蚕房内桑叶的搬运问题,可减轻部分劳动强度。铺洒桑叶的均匀度也是大蚕饲育机研发的关键点,在手工饲喂大蚕时将桑叶直接饲喂,而桑叶物料特性十分复杂。因此,采取将桑叶切碎后再进行饲喂可降低大蚕饲育机的研发难度。

综上,现有家蚕饲育机械根据其工作原理可分为两种,一种是蚕台(蚕箔)循环转动,给料装置在固定位置投喂桑叶和撒粉消毒,另一种是蚕台(蚕箔)位置固定,给料装置移动作业。从实际反馈来看,前者的优点是节约蚕房空间,上料便捷,缺点是效率较低,且蚕台(蚕箔)相互传输会造成一定的磨损;后者在稳定性,可靠性和工作效率上优势明显,不足之处是蚕房空间利

用率较低。进一步与目前采取的两段式饲养模式结合,前者适宜小蚕饲育机械,后者适宜大蚕饲育机械。

2.3 蚕茧采收与分选设备

2.3.1 采茧机

蚕茧采收是从营茧工具中取出蚕茧。我国目前主要使用的营茧工具包括纸板方格簇、塑料折簇和木板方格簇。

在采茧机研究方面,赵明岩等^[35]设计了一种用于纸板方格簇的蚕茧分选与自动采摘机,采用将方格簇沿轨道进行传输,使用摄像头采集方格簇的图像并进行处理,依据轮廓特征对上茧、双宫茧和下脚茧等进行判别,然后生成对应的位置信息,电磁手根据获取的位置信息依次对双宫茧、下茧和上茧进行采摘。

针对纸板方格簇在多次使用后会发生形变,造成营茧孔位置不规律的问题,山东农业大学刘莫尘等^[36]提出了一种基于颜色和面积特征的方格簇蚕茧分割定位算法,可对蚕茧图像进行分割、中心点定位和位置坐标的测量。在此基础上,闫银发等^[37]设计了一种直角坐标式自动采茧机,使用刘莫尘等^[36]提供的方法生成每个蚕茧的位置坐标,然后步进电机和电磁采摘器根据位置坐标进行蚕茧的精确采摘。

江苏科技大学王孝祥等^[38]设计了一种纸板方格簇采茧机,采用顶杆面板自上向下将蚕茧从方格簇中顶出的方式进行蚕茧采收。针对纸板方格簇的变形问题,顶杆面板4个角设置有较长的顶杆,采收时会先进入方格簇4个角的孔进行定位和矫正。并用钢丝排梳将蚕茧的浮丝拉断,确保较高的采净率。李法德等^[39]设计了一种连续式方格簇自动采茧机,采用圆柱齿轮式的压茧装置和方格簇孔啮合的方式将蚕茧顶出,由于每次仅是对方格簇的单排进行采摘,可相对减少对方格簇的损伤,采摘效率与电机转速有关。马勇等^[40]设计了一种毛刷式采茧机,与李法德等^[39]设计采茧机结构相似,区别在于将圆柱齿轮式的压茧装置改为圆柱式柔性毛刷,通过毛刷旋转将蚕茧从方格簇中刷出的方式进行采收,对变形后的方格簇也能达到较好采收效果,但也会对方格簇造成新的损伤。闫银发等^[41]设计了一种塑料折簇采茧机,采取拉取塑料折簇穿过两个辊筒间隙方式,将蚕茧与塑料折簇分离,实现机械化塑料折簇的采收。

由于木板方格簇与纸板方格簇的结构相同,且刚性好,所以大部分用于纸板方格簇采收的机器也都能用于木板方格簇的采收。

现有的采茧机可完成机械化采茧工作,但生产实际的推广应用较少,原因一方面在于现有采茧机会对蚕茧和营茧工具造成一定损伤,造成生产耗损较高;另一方面是无法预先去除部分死笼茧和黄斑茧等,使用机械一次

性采收时造成其他蚕茧污染,导致采茧品质下降。因此,如何进一步优化作业装置,研究死笼茧和黄斑茧自动剔除装置,避免造成蚕茧损伤或品质下降,是采茧机研发和应用面临的难题。

2.3.2 蚕茧分选技术

由于家蚕个体差异、病害和茧格中存在杂物等原因,导致营茧的品质会有所不同,常见的蚕茧种类有上茧、柴印茧、黄斑茧和双宫茧等。为确保生丝的质量,在缫丝之前需对蚕茧进行分选。

中国计量大学蒋洪敏等^[42]设计了一种气悬式蚕茧品质分选装置,使用气流装置将蚕茧悬空并发生旋转,再使用摄像头采集不同姿态下的图像,将图像上传至数据库进行比对,根据结果控制承接机构左右移动,实现对优质茧和下品茧的分选。刘莫尘等^[43]提出了一种基于模糊C均值聚类(FCM)及HSV模型的方格簇黄斑茧检测算法,根据HSV空间积累颜色直方图的黄斑颜色H分量的比例来判定是否为黄斑茧,并使用方格簇自动采茧机对黄斑茧进行检测剔除试验,平均检测率达到81.2%。郑仲云等^[44]设计了一种用于蚕茧加工用的分选机,原理是根据同一品种不同类别蚕茧重量不同的特点进行分选。孙卫红等^[45]采用基于颜色特征和支持向量机(SVM)的蚕茧分类方法,对5种蚕茧进行了检测试验,准确率达到91%。梁军圣^[46]使用BP神经网络进行了异色异性茧的分类识别研究,对3类蚕茧的最好识别准确率为96.8%、96.3%和94.4%。王超^[47]开展了基于卷积神经网络的蚕茧分类研究,使用SE-GoogLeNet模型对上茧、双宫茧和斑点茧的识别准确率达到98.27%。

将蚕茧分选技术与采茧机研发相结合,是提升现有采茧机工作性能的重要方法,且随着深度学习与视觉技术的发展,基于深度学习的蚕茧分选技术具有十分广泛的应用前景,必然会受到越来越多的关注,但目前存在的主要问题在于,现有技术方法仅从一个角度开展识别,部分次茧,如柴印、黄斑等显著特征会被遮挡,导致识别可靠性较低。同时,现有技术未考虑蚕茧的多样性,例如一颗蚕茧既具备柴印茧特征,又具备黄斑茧的特征,需要使用多标签分类方法开展分选研究。

2.4 家蚕制种机械与技术

家蚕制种主要涉及的农艺为削茧和蚕蛹的雌雄鉴别,目的是将雌蛹和雄蛹准确识别,确保种杂交率。

2.4.1 蚕茧切削设备

削茧要求在刀具切削和将蚕蛹从茧壳中倒出过程中不能损伤蚕蛹。人工削茧时,通常是从蚕茧一端倾斜将蚕茧切开,然后轻轻倒出蚕蛹。

李法德等^[48]设计了一种气吸式削茧机,在转盘外周

上设置多个蚕茧孔用于夹持蚕茧,并使用风机气流与蚕茧孔产生压差将单个蚕茧吸在蚕茧孔上,便于刀具切削。削茧时,转盘转动依次吸取蚕茧,在固定位置设置刀具进行切削,切削后转盘转动至倒出蚕蛹,当蚕茧孔转到直接与大气相通的非气力区时,茧壳在重力的作用下掉落完成削茧。西南大学宋杰等^[49]设计了一种用于蚕茧切削的智能夹具,使用传感器和电机检测并调整蚕茧位置,能够将以任意方式进入夹具的单个蚕茧调整为竖直状态,并将其固定,从而有利于机械化切削。梁培生等^[50]设计了一种自动蚕茧削口机,先使用拨茧盘将蚕茧逐个分离排列,并逐个传输至输茧带上,输茧带将蚕茧逐个夹紧并传送,在固定位置使用电机带动刀片对蚕茧倾斜切削,切削后,传送带转动时蚕茧削口朝下,先倒出蚕蛹后,再将茧壳与输茧带分离。胡祚忠等^[51]设计了一种链条式斜位削茧分离机,主要采用链传动和夹具夹持采茧并传输,在固定位置倾斜安装刀具,能够使切口成倾斜,较好地完成切削和便于倒出蚕蛹。

削茧与茧选分蚕研究面临的一个共同难点在于蚕茧表面覆盖有一层茧衣,造成蚕茧相互粘连成团,导致难以逐个排序,且削茧需在2~3天内完成,对设备的工作效率提出了更高的要求,逐个进行夹持切削机械的工作效率低于手工操作。同时,人工削茧时取出蚕蛹后会进一步完成蚕蛹的雌雄鉴别,但目前机械化研究是将削茧和雌雄鉴别分段开展。

2.4.2 蚕蛹雌雄分选技术

人工鉴别蚕蛹雌雄的方法是,同一家蚕品种,个体偏大的为雌蚕蛹,偏小的为雄蚕蛹,对大部分无法通过个体大小区分的蚕蛹,需观察其尾部的纹理特征,纹理呈“X”状的为雌蛹,纹理呈点状则为雄蛹。

西南大学陶丹^[52]在蚕蛹识别领域开展了大量研究,使用了包括图像处理、可见光谱、近红外线和卷积神经网络等方法,对特定品种的蚕蛹图像的识别准确率均在95%以上。代芬等^[53]使用近红外光谱分析仪,对3个品种共491粒蚕蛹在特定波段内进行光谱采集,并对光谱数据进行均值中心和一阶求导预处理,使用最小二乘判别法进行分析,识别准确率在92%以上。颜辉等^[54]同样使用近红外光谱和偏最小二乘判别分析模型,对6个品种394粒蚕蛹进行光谱采集和分析,测试的准确率达到96.2%。Zhang等^[55]利用基因编辑技术,选育出了雌性特异红色荧光蛋白标记品系。该品种的家蚕在卵、幼虫、蛹、蛾期,使用绿光的照射时,都能够显示出明显的橙色荧光,能够被人眼识别。在此基础上,赵明岩等^[56]设计了一种高速雌雄蚕蛹分选机,采用特定波长的绿光照射蚕蛹,当呈现橙色荧光则表明是雌蛹,否则为雄蛹,通过输送带分选叉的左右移动将蚕蛹放置在对应

的盒子里,试验表明,该设备对雌性特异红色蛋白标记品系的识别准确率可达到100%。于业达等^[57]使用深度学习对12个家蚕品种共700余粒蚕蛹进行了识别试验,以普通相机拍摄的蚕蛹图像为识别对象,设计了卷积神经网络提取图像深度特征,并与HOG特征进行融合,再进行分类识别,准确率在95%左右。

为了确保制种过程中家蚕品种的纯净度,石洪康等^[58]使用卷积神经网络进行了家蚕幼虫品种的识别研究,在实际养蚕环境下采集了10个家蚕品种在4龄第3天和5龄第3天共5000张生长图像,使用卷积神经网络进行了识别试验,测试准确率分别达到了98.9%和96%,表明了卷积神经网络可准确识别家蚕品种。

虽然关于制种机械与技术研究取得一定进展,但目前生产中削茧和蚕蛹雌雄鉴别主要依赖于人工操作,原因在于现有机械成熟度不够,削茧机需人工逐个放置蚕茧,导致其工作效率较低,且在分离蚕蛹和茧壳时会对蚕蛹造成损伤。在蚕蛹雌雄鉴别方面主要以识别方法研究为主,缺乏进一步将鉴别方法与装备研究相结合。此外,研究大多基于特定的家蚕品种开展,而对不同品种之间蚕茧存在的个体差异,以及不同品种蚕蛹的雌雄特征差异缺乏深入研究,导致技术的应用范围受到限制。

3 我国蚕桑生产机械化发展分析

3.1 蚕桑生产机械化面临的主要问题

虽然蚕桑机械研究已经广泛开展,但目前整体水平仍大幅落后于其他农作物或畜禽养殖领域,分析原因主要在于蚕桑的产业链长,需要的机械种类多;农艺复杂,设备研发难度大;季节性较强,样机试验条件有限等方面。

3.1.1 产业链长,需要的机械种类多,从事研发的机构相对较少

蚕桑生产的产业链长,农艺操作多,需要的设备类别也较多。在桑园管理上,虽然可引进部分果园管理机械,但我国桑园大多处在丘陵山区,受自然环境限制,适宜这些地区的农业机械类别本身较少,研发难度也非常大。在养殖环节,可以直接引进的设备非常少。同时,国内目前从事蚕桑机械研究的机构和从事蚕桑机械生产的企业数量都非常少,现有的企业规模小,其产品主要以方格簇、蚕网、消毒装置等蚕具为主,缺乏核心知识产权,易于复制,难以满足机械化发展需求。

3.1.2 农艺特殊,机械研发难度大

长久以来,养蚕都是依靠手工操作,长期形成的农艺操作较为复杂,难以直接用机械结构进行替代。例如上述提到的机械化采茧时,存在脓液污染其他蚕茧

的问题。在传统的养蚕过程中,会大量使用生石灰粉和次氯酸钠溶液消毒,而这会对机械设备造成腐蚀,导致设备的可靠性降低,影响了应用推广。此外,部分农艺还需要借助家蚕自身习性来完成,例如除沙和上簇时需利用家蚕向上爬行的习性,但家蚕属于密集养殖,活动能力差,无明显的规律,不可控因素较多,增加了机械研发难度,导致目前这两个环节仍面临无机可用。

3.1.3 生长周期短,季节性强,样机试验受限

养蚕属于季节性生产,饲养时间在每年的4—10月,单次饲养时间约为42天,其中,催青及孵化时间约为10天,幼虫期约在25天,营茧期约为7天,所以蚕桑生产的劳动非常密集,造成样机生产试验的时间和条件有限。而且在同一生命形态下,家蚕个体每一天都会生长,形态、纹理等均会发生变化,也造成了蚕桑机械的研发难,尤其表现在蚕蛹的雌雄鉴别上。品种多样性也会增加制种机械研发难度,不同品种的家蚕在蚕蛹的大小、纹理、体色等特征上均有差异,导致现有方法技术难以具备普遍性,影响了设备的研发。

3.2 蚕桑机械研究建议

针对目前蚕桑生产机械化面临的问题,建议开展多功能桑园管理和家蚕特有养殖装备研究;注重宜机化研究,推动农机与农艺的深度融合;开展家蚕全龄机械化养殖示范,研究机械化养蚕技术;以及选育草本桑品种,实现桑叶条的机械化收割,从而助推蚕桑生产的机械化发展。

3.2.1 开展多功能桑园管理和家蚕特有养殖装备研究

针对蚕桑生产机械化研究面临产业链长,需要的设备种类多,从事研发的机构相对较少的问题。一是建议继续加大从林果、茶叶和蔬菜领域引进管理设备,再根据桑园管理特点对部分关键零部件进行改进,使其满足桑园管理要求。二是建议研发多功能的桑园管理机械,例如以微耕机为动力,设计出具有除草、灌溉、喷雾等通用功能外,还能满足桑枝伐条的管理机械,并且尽可能实现设备轻量化和部件易更换的功能,重点放在使用电动微耕机为动力。三是建议在养殖机械研究上,重点围绕喂食、上簇、除沙等养蚕特有环节开展装备研究,其他环节注重从家禽、畜禽和其他昆虫养殖领域引进给料、环境控制和清洗等常规通用设备。并根据蚕房布局,研发高效环保的自动消毒系统,优化消毒方法,避免消毒剂与设备直接接触,破解传统消毒方法对设备造成损伤的问题。四是建议管理部门和从业人员积极做好对外宣传,吸引更多的研究力量投身到蚕桑机械的研究中,共同推动产业的机械化发展。

3.2.2 注重宜机化研究,推动农机与农艺的深度融合

宜机化是实现机械化生产的重要途径,有效助推

了农业机械化的全面发展。但在蚕桑领域,宜机化未能够得到足够的重视,相关研究处于空白状态。蚕桑生产的农艺较为复杂,尤其是在养殖环节,更需要重视宜机化研究,推动农机农艺的深度融合。在桑园管理环节,宜机化包括桑树栽培的标准化,桑园布局和田间道路改造,桑枝的宜机化嫁接和伐条等。在养蚕环节包括对蚕房和配套设施进行科学规划,选育强健性好、抗病能力强的家蚕品种,以及定量的农艺规程,精简和标准化部分农艺操作。

3.2.3 建立家蚕机械化养殖示范基地,研究蚕桑机械化生产技术

针对家蚕生长周期短、样机试验受限等问题,建议有条件的研发机构,集中力量开展家蚕全龄的机械化饲养试验,实现从蚕卵到蚕蛾的全程机械化养殖,并全面对比全龄机械化生产与手工养蚕在人工支出、饲喂效率、蚕茧质量、成本耗费等方面的数据,以此制定出蚕桑机械化生产的农艺规程,为产业的标准化发展和设备研究提供技术支持和数据参考。同时,在设备研发过程中,注重原始数据的积累,为研究蚕蛹雌雄鉴别、蚕茧品质分选机械和病害防治机械等不断积累原始数据,增加设备对多个品种的适用能力。此外,还应当积极鼓励蚕桑生产企业、合作社等为蚕桑机械应用创造条件。

3.2.4 选育草本桑品种,积极需求桑叶替代品

针对桑叶采摘是养蚕过程中劳动强度最大、用工量最多的农艺,且目前还依赖人工采摘的问题,建议以实现桑树的草本化为目标,加大对草本桑品种的选育研究,并积极探索使用草本桑进行家蚕饲喂,然后通过改进牧草和粮食收割机的方式,开展草本桑的收割机的研制,以突破桑叶采摘完全依靠人工操作的问题。

同时,需求桑叶替代品也是一种可行的方法,近年来,家蚕人工饲料研发也是广受关注的一个热点,目前实现了小蚕人工饲料养殖。但小蚕食量小,采桑叶所需的劳动强度也小,而大蚕的人工饲料养殖才是决定未来发展的关键所在。同时,人工饲料也需要使用桑叶作为部分原材料,因此有必要开展草本桑的品种选育和机械化收割装备研究。

3.3 蚕桑生产发展趋势

随着科技的不断发展,我国农业生产方式发生了巨大变化,除使用农机装备代替人工进行田间劳作外,前沿技术不断被应用到农业生产中,例如使用农业机器人进行田间管理;使用深度学习进行病虫害检测预警和畜禽个体生长发育监测;使用物联网技术开展信息化管理,使用大数据分析进行发展决策和产品溯源等,极大推动了农业生产的信息化和智能化,也为蚕桑产业发展提供了大量参考。

因此,蚕桑生产不仅要突破长期依赖手工操作的问题,还应当融入一批前沿核心技术在蚕桑机械上的应用,面向工厂化养殖、管理信息化和多元化发展的方向前行,才能确保产业的转型升级和可持续发展。

3.3.1 工厂化养殖

家蚕的工厂化养殖可以突破季节性局限,提升蚕茧产量,增加产业的综合价值,确保长期发展。工厂化养殖下,饲喂设备根据家蚕生长状态自动进行精准饲喂,并对生长状态进行智能识别与预警。通过环境感知与精准调控系统对蚕房环境进行精准控制,结合新的病害防治方法,最大程度确保养殖安全。

3.3.2 信息化管理

信息化管理是智能蚕桑发展的一个重要方向,随着家蚕饲养模式发生转变,平均养蚕规模将显著提升,用工量也将大幅度减少,信息化管理成为必然的趋势。在信息化管理中,使用传感器、现代通讯和大数据等技术对蚕桑生产原始数据采集、传输和处理,建立起专家系统,用于在线指导一线生产、大规模病害监测预警、产品溯源等和提供产业发展决策分析,不仅能提升管理效率与可靠性,还能够确保安全科学生产。

3.3.3 多元化发展

栽桑养蚕不仅是一项农业生产,还蕴含着丰富的文化背景。未来,蚕桑也将继续凭借着其生态价值、经济价值和文化价值进一步服务“乡村振兴”、“一带一路”等国家战略。因此,蚕桑生产机械化在解决生产问题的同时,还应当有助于促进蚕桑文化的传播与发展,满足不同用户的需求,更好地促进产业的多元可持续发展。

参 考 文 献

- [1] 陈联新,何建梅,陈义安. 宜宾乌蒙山片区蚕桑产业扶贫的创新与实践[J]. 四川蚕业, 2020, 48(4): 6-7, 18.
- [2] 龚昕. 我国蚕桑机械化现状分析及对策研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2016.
- [3] 六部门关于印发《蚕桑丝绸产业高质量发展行动计划(2021—2025年)》的通知[EB/OL]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/xfpgys/wjfb/art/2020/art_a57fd110740b49fdb7ad8efa728364f0.html, 2020-9-25.
- [4] 胡兴明. 中国蚕桑产业转移驱动因素与影响研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- [5] 陈涛. 中国蚕桑产业可持续发展研究[D]. 重庆: 西南大学, 2012.
- [6] 胡祚忠, 吴建梅, 张剑飞, 等. 我国蚕桑生产机械设备的研究概况[J]. 蚕业科学, 2010, 36(6): 998-1003.
Hu Zuozhong, Wu Jianmei, Zhang Jianfei, et al. Research progress on mechanical equipment for sericultural production in China [J]. Acta Sericologica Sinica, 2010, 36(6):

- 998—1003.
- [7] 李建琴,顾国达. 蚕桑产业精准扶贫的机理与成效[J]. 中国蚕业, 2018, 39(4): 1—9.
- [8] 郑升海,黄丹,罗惠波,等. 冠突散囊菌发酵桑叶茶品质研究[J]. 食品科技, 2021, 46(3): 44—48.
Zheng Shenghai, Huang Dan, Luo Huibo, et al. Study on the quality of mulberry leaf tea fermented by Eurotium Cristatum [J]. Food Science and Technology, 2021, 46(3): 44—48.
- [9] Johari N, Madaah Hosseini H R, Samadikuchaksaraei A. Mechanical modeling of silk fibroin/TiO₂ and silk fibroin/fluoridated TiO₂ nanocomposite scaffolds for bone tissue engineering [J]. Iranian Polymer Journal, 2020, 29(3): 219—224.
- [10] 杜周和,左艳春,严旭,等. 饲料桑生理活性物质及其饲用价值[J]. 草业学报, 2017, 26(10): 227—236.
Du Zhouhe, Zuo Yanchun, Yan Xu, et al. Physiologically active and feed value of mulberry for livestock and poultry [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(10): 227—236.
- [11] NY/T 1640—2021, 农业机械分类[S].
- [12] 易文裕,程方平,王攀,等. 桑园轻筒型修剪机械研究现状及发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(10): 72—76.
Yi Wenyu, Cheng Fangping, Wang Pan, et al. Current situation and development trend of mulberry garden light-weight trimming machinery [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(10): 72—76.
- [13] 李法德,王勇斌,宋占华,等. 一种多功能桑园管理机[P]. 中国专利: CN201510996632.2, 2016—03—16.
- [14] 郭勇刚,赵安郡,刘益州,等. 一种桑园管理机[P]. 中国专利: CN201922111566.2, 2020—08—04.
- [15] 卢营蓬,易文裕,程方平,等. 轻筒型桑园电动除草机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(9): 76—81.
Lu Yingpeng, Yi Wenyu, Cheng Fangping, et al. Design and experiment of light-weight electric weeder for mulberry garden [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(9): 76—81.
- [16] 杨硕. 桑园动力耙的优化设计与试验[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- [17] 高天浩,闫银发,李法德,等. 秋伐期桑条力学性能试验[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2016, 47(3): 338—344.
Gao Tianhao, Yan Yinfa, Li Fade, et al. Mechanical properties during cutting mulberry shoots in Autumn [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2016, 47(3): 338—344.
- [18] 吴建梅,张剑飞,叶晶晶,等. 双杠杆双曲省力桑枝大剪的设计与剪伐试验[J]. 蚕业科学, 2013, 39(2): 390—393.
- [19] 张增产. 一种手持式桑园伐条机[P]. 中国专利: CN201710964834.8, 2018—01—09.
- [20] 张相恒. 割茬高度可调的草本桑平茬机的研制[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- [21] 张晋. 草本桑田间收割试验平台的研制与试验[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- [22] 胡光荣,石洪康,叶晶晶. 手扶式单锯盘燃油伐条机的设计与工作原理[J]. 蚕业科学, 2018, 44(4): 649—653.
Hu Guangrong, Shi Hongkang, Ye Jingjing. Structure design and working principle of fuel-driven walking cutting machine with single saw disc [J]. Acta Sericologica Sinica, 2018, 44(4): 649—653.
- [23] 张剑飞,吴建梅,叶晶晶,等. 桑枝气动剪配用带自动控制装置的燃油空压机研制[J]. 四川蚕业, 2014, 42(4): 24—26.
- [24] 胡迎春,胡裔志,牟向伟. 桑叶采摘机构的多目标优化设计[J]. 机械设计, 2020, 37(3): 23—27.
Hu Yingchun, Hu Yizhi, Mou Xiangwei. Multi-objective optimization of mulberry-leaf picking machines [J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(3): 23—27.
- [25] 胡迎春,齐勇落,胡裔志,等. 摇杆式桑叶采摘机采摘装置的有限元分析[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(22): 255—257, 268.
- [26] 翁连娟. 基于 ZigBee 技术的桑园环境监控系统设计[D]. 杭州: 中国计量大学, 2018.
- [27] 李林波,吴建梅,石洪康,等. 半自动小蚕饲育机的设计开发[J]. 四川蚕业, 2018, 46(4): 28—29, 37.
- [28] 石洪康,蒋猛,李林波,等. 螺旋升降式小蚕饲育机的设计与应用试验[J]. 蚕业科学, 2018, 44(6): 891—897.
Shi Hongkang, Jiang Meng, Li Linbo, et al. Design of young silkworm feeding machine with spiral lifting system and its production test [J]. Acta Sericologica Sinica, 2018, 44(6): 891—897.
- [29] 汤自强. 基于 CAN 总线的小蚕共育智能饲养机控制系统设计[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- [30] 韦相立,韦东,覃倩映,等. 小蚕饲育自动化生产线总成[P]. 中国专利: CN201811403869.5, 2019—03—08.
- [31] 何玉,石洪康,田涯涯,等. 基于图像识别的小蚕饲育中蚕座位置与桑叶饲喂均匀性研究[J]. 蚕业科学, 2019, 45(5): 740—745.
He Yu, Shi Hongkang, Tian Yaya, et al. Study on rearing bed position and feeding uniformity of mulberry leaf in young silkworm rearing based on image recognition [J]. Acta Sericologica Sinica, 2019, 45(5): 740—745.
- [32] 胡光荣,石志鸣,石洪康,等. 智能调控单闭环式大蚕全自动养蚕机[P]. 中国专利: CN202010956268.8, 2020—12—04.
- [33] 郭曦,罗俊,梅林森,等. 自动循环式大蚕饲养设备研究及应用[J]. 四川农业与农机, 2020(2): 44—46.
- [34] 李林波,张剑飞,石洪康,等. 家蚕饲育传输平台[P]. 中国专利: CN201920103368.9, 2019—11—15.
- [35] 赵明岩,何如涛,檀中强. 用于纸板方格簇不同品质蚕茧分选与自动采摘的机具设计[J]. 蚕业科学, 2016, 42(1): 105—110.

- Zhao Mingyan, He Rutao, Tan Zhongqiang. Design of automatic picking machine for sorting different quality silkworm cocoons based on checker-cardboard cocooning frame [J]. *Acta Sericologica Sinica*, 2016, 42 (1): 105-110.
- [36] 刘莫尘, 许荣浩, 李法德, 等. 基于颜色与面积特征的方格簇蚕茧分割定位算法与试验[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(3): 43-50.
- Liu Mochen, Xu Ronghao, Li Fade, et al. Algorithm and experiment of cocoon segmentation and location based on color and area feature [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(3): 43-50.
- [37] 闫银发, 韩守强, 宋占华, 等. 一种垂直坐标式自动采茧机[P]. 中国专利: CN201621156120.1, 2017-05-17.
- [38] 王孝祥, 杨毅, 顾宇翔, 等. 纸板方格簇采茧机的研制[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(4): 2493-2494, 2528.
- [39] 李法德, 宋占华, 陈超科, 等. 一种新型连续式自动采茧机[P]. 中国专利: CN201510413010.2, 2015-09-30.
- [40] 马勇, 卢伟康, 石洪康, 等. 毛刷式采茧机的研制初报[J]. *四川蚕业*, 2020, 48(4): 27-29.
- [41] 闫银发, 王广瑞, 李法德, 等. 一种塑料折簇采茧机[P]. 中国专利: CN201820082821.8, 2018-08-17.
- [42] 蒋洪敏, 赵明岩, 王红彬, 等. 气悬式蚕茧品质分选方法[P]. 中国专利: CN201910298640.8, 2021-04-16.
- [43] 刘莫尘, 许荣浩, 闫筱, 等. 基于FCM及HSV模型的方格簇黄斑茧检测与剔除技术[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(7): 31-38.
- Liu Mochen, Xu Ronghao, Yan Xiao, et al. Detection and elimination of yellow spotted cocoon in mountage based on FCM algorithm and HSV color model [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(7): 31-38.
- [44] 郑仲云, 宋定英, 秦培旭, 等. 一种蚕茧加工用的分选机[P]. 中国专利: CN202020413009.6, 2021-01-12.
- [45] 孙卫红, 黄志鹏, 梁曼, 等. 基于颜色特征和支持向量机的蚕茧分类方法研究[J]. *蚕业科学*, 2020, 46(1): 86-95.
- Sun Weihong, Huang Zhipeng, Liang Man, et al. Cocoon classification method based on color feature and support vector machine [J]. *Acta Sericologica Sinica*, 2020, 46(1): 86-95.
- [46] 梁军圣. 基于机器视觉的蚕茧外观检测系统算法研究[D]. 柳州: 广西科技大学, 2014.
- [47] 王超. 基于机器视觉的蚕茧图像识别研究[D]. 柳州: 广西科技大学, 2019.
- [48] 李法德, 谢雪文, 宋占华, 等. 气吸式剖茧机[P]. 中国专利: CN201820074267.9, 2018-08-14.
- [49] 宋杰, 李光林, 马驰, 等. 家蚕种茧切割智能夹具设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(10): 59-65.
- Song Jie, Li Guanglin, Ma Chi, et al. Design and experiment of intelligent fixture for cutting breeding cocoons of bombyx mori [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(10): 59-65.
- [50] 梁培生, 孙辉, 张国政, 等. 自动蚕茧剖口机的研制[J]. *中国农机化学报*, 2016, 37(1): 100-103, 107.
- Liang Peisheng, Sun Hui, Zhang Guozheng, et al. Development of automatic cocoon cutting machine [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2016, 37(1): 100-103, 107.
- [51] 胡祚忠, 袁良军, 吴建梅, 等. 一种链条式斜位剖茧分离机[P]. 中国专利: CN201510555599.X, 2015-12-23.
- [52] 陶丹. 基于机器视觉的家蚕蛹雌雄识别研究[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- [53] 代芬, 吴玲, 叶观艳, 等. 基于近红外漫透射光谱信息的蚕茧雌雄检测[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(12): 280-284.
- Dai Fen, Wu Ling, Ye Guanyan, et al. Non-destructive detection of male and female silkworm cocoon based on transmission Near Infrared Spectroscopy [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(12): 280-284.
- [54] 颜辉, 梁梦醒, 郭成, 等. 利用在线近红外光谱鉴别雌雄蚕蛹的方法[J]. *蚕业科学*, 2018, 44(2): 283-289.
- Yan Hui, Liang Mengxing, Guo Cheng, et al. A study on method of online discrimination of male and female silkworm pupae by Near Infrared Spectroscopy [J]. *Acta Sericologica Sinica*, 2018, 44(2): 283-289.
- [55] Zhang Z, Niu B, Ji D, et al. Silkworm genetic sexing through W chromosome-linked, targeted gene integration [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(35): 8752-8756.
- [56] 赵明岩, 蒋昕余, 牛宝龙, 等. 雌性特异红色荧光品系蚕蛹高速雌雄分选机的设计[J]. *蚕业科学*, 2018, 44(5): 711-715.
- Zhao Mingyan, Jiang Xinyu, Niu Baolong, et al. Design of high speed sorting machine for male and female silkworm pupae on basis of female with red fluorescence [J]. *Acta Sericologica Sinica*, 2018, 44(5): 711-715.
- [57] 于业达, 高鹏飞, 赵一舟, 等. 基于深度卷积神经网络的蚕蛹雌雄自动识别[J]. *蚕业科学*, 2020, 46(2): 197-203.
- Yu Yeda, Gao Pengfei, Zhao Yizhou, et al. Automatic identification of female and male silkworm pupa based on deep convolution neural network [J]. *Acta Sericologica Sinica*, 2020, 46(2): 197-203.
- [58] 石洪康, 田涯涯, 杨创, 等. 基于卷积神经网络的家蚕幼虫品种智能识别研究[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(12): 34-45.
- Shi Hongkang, Tian Yaya, Yang Chuang, et al. Research on intelligent recognition of silkworm larvae races based on convolutional neural networks [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2020, 42(12): 34-45.