



李蓉蓉,王超,李洪文,何进,卢彩云,苏欣彤,胡鹏. 秸秆还田技术与装备研究进展[J]. 中国农业大学学报,2025,30(10):103-120.

LI Rongrong, WANG Chao, LI Hongwen, HE Jin, LU Caiyun, SU Xintong, HU Peng. Research progress on technology and equipment for returning straw to fields[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(10): 103-120.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.10.09

秸秆还田技术与装备研究进展

李蓉蓉^{1,2} 王超^{1*} 李洪文¹ 何进¹ 卢彩云¹ 苏欣彤^{1,2} 胡鹏^{1,3}

(1. 中国农业大学 工学院, 北京 100083;

2. 农业农村部河北北部耕地保育科学观测实验站, 北京 100125;

3. 农业农村部保护性耕作农业装备重点实验室, 北京 100083)

摘要 秸秆还田是现代农业可持续发展的重要措施,其相关技术与装备已取得显著进展。本研究系统梳理秸秆粉碎覆盖、整秆还田、高留茬掩埋还田以及间接还田等关键技术环节的研究现状,并深入分析当前研究的热点、难点与不足。结果表明:1)通过优化作业参数和装备设计,秸秆还田技术在不同区域的适应性增强,有效改善了土壤结构和肥力,促进了生态循环;2)新型粉碎刀具、复式作业机具以及智能化控制系统的应用,显著提高了粉碎效率和秸秆抛撒均匀性,并提升了装备的智能化水平;3)创新秸秆腐解技术为加速还田效果提供了新途径,腐熟剂的合理应用和装备集成化设计进一步提升了生态效益与经济效益;4)秸秆覆盖检测技术的发展为精准评估秸秆还田效果提供了有力支撑;5)秸秆还田技术在复杂田间环境下的适应性仍需优化,机械装备在作业效率、能耗及智能化水平方面仍有提升空间。

关键词 秸秆还田; 秸秆腐解; 秸秆覆盖; 技术与装备

中图分类号 S223.3

文章编号 1007-4333(2025)10-0103-18

文献标志码 A

Research progress on technology and equipment for returning straw to fields

LI Rongrong^{1,2}, WANG Chao^{1*}, LI Hongwen¹, HE Jin¹, LU Caiyun¹,
SU Xintong^{1,2}, HU Peng^{1,3}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Scientific Observing and Experiment Station of Arable Land Conservation (North Hebei), Ministry of Agricultural and Rural Affairs, Beijing 100125, China;

3. Key Laboratory of Agricultural Equipment for Conservation Tillage of the Ministry of Agricultural and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract Returning straw to the field is an important measure for the sustainable development of modern agriculture, and its related technologies and equipment have made significant progress. This study systematically sorted out the key technical links, such as straw crushing and covering, whole straw returning to the field, high stubble burial returning to the field, and indirect returning to the field, and thoroughly analyzed the hot spots, difficulties, and shortcomings of current research. The results show that: 1) By optimizing the operation parameters and equipment design, the adaptability of straw returning to the field technology in different regions was enhanced, which effectively improved the soil structure and fertility and promoted the ecological cycle;

收稿日期: 2025-04-12

基金项目: 国家小麦产业技术体系(CARS-03)

第一作者: 李蓉蓉(ORCID:0000-0003-2598-6323),博士研究生,E-mail:rrli@cau.edu.cn

通讯作者: 王超(ORCID:0000-0001-9107-3915),副教授,主要从事保护性耕作技术与智能装备研究,E-mail:superc@cau.edu.cn

2) The application of new crushing tools, compound operation tools and intelligent control systems significantly improved the crushing efficiency and spreading uniformity, and the intelligence level of equipment; 3) Innovative straw decomposition technology provided a new way to accelerate the effect of returning to the field, and the reasonable application of decomposing agents and integrated equipment design further improve the ecological and economic benefits; 4) The development of straw covering detection technology provided a strong support for the accurate evaluation of the effect of straw returning to the field; 5) The adaptability of straw returning to the field technology in complex field environments still needs to be optimized, and there is still room for improvement in the operation efficiency, energy consumption and intelligence level of mechanical equipment.

Keywords returning straw to the field; straw decomposition; straw covering; technology and equipment

秸秆还田技术是现代农业可持续发展的重要措施^[1-2],其核心在于对作物秸秆进行粉碎等方式处理后,以铺设、掩埋等形式将其直接或间接还田,从而改善土壤结构,提高土壤有机质含量,增强农田生态系统稳定性。与传统秸秆处理方式(如焚烧或直接移除)相比,秸秆还田可以有效减少环境污染,提升土壤肥力,促进农作物生长,并提高农业生产的可持续性^[3-5]。国内外围绕秸秆还田技术的研究主要集中在秸秆粉碎与抛撒^[6]、免少耕播种^[7]、整秆还田^[8]、秸秆腐解及覆盖率、覆盖量的检测^[9]以及间接还田等关键技术环节,并针对不同作物、不同土壤条件和不同农机装备进行了深入探索^[10]。然而,秸秆还田技术在实际应用中仍面临诸多挑战,如粉碎效果不佳、还田均匀性差、播种质量受影响等,这些因素在一定程度上限制了其广泛应用,在应对复杂多变的田间环境、机械装备性能提升以及长期生态效应评估等方面仍有许多亟待解决的问题。本研究旨在系统归纳秸秆还田技术与装备的研究进展,深入分析相关机械装备的发展现状及存在问题,并探讨未来技术发展趋势,以期为秸秆还田技术体系的完善及相关装备的高效利用提供参考。

1 秸秆资源现状

1.1 秸秆产量

土壤气候条件、作物类型和种植模式等产生的差异,造成我国各地区作物产量也存在差异。将我国31个省、市、区(不含港澳台)分成六大主要农区:1)华北农区,包括北京、天津、河北、山西、内蒙古、河南和山东;2)东北农区,包括黑龙江、吉林和辽宁;3)长江中下游农区,上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南;4)西北农区,陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆;5)西南农区,包括重庆、四川、贵州、云南和西藏;6)南方农区,包括福建、广东、广西和海南。

对选定的9种主要农作物:水稻(早稻、中稻和一季晚稻、双季晚稻)、小麦、玉米、薯类(包括马铃薯、甘薯、木薯)、花生、油菜、大豆、棉花和甘蔗进行秸秆可收集资源量统计汇总。其中农作物产量数据来源于2020—2022年《中国统计年鉴》^[11-13],秸秆可收集资源量 W_{cr} 按照式(1)^[14]计算:

$$W_{cr} = \sum W_{i,j} \times R_{i,j} \times K_{i,j} \quad (1)$$

式中: W_{cr} 为当年秸秆可收集资源总量,t/a; $W_{i,j}$ 为第*i*种作物在第*j*个省(市、区)的作物产量,t/a; $R_{i,j}$ 为第*i*种作物在第*j*个省(市、区)的草谷比; $K_{i,j}$ 为第*i*种作物在第*j*个省(市、区)的秸秆收集系数。

图1示出2020—2022年我国6大主要农区主要农作物秸秆可收集量的变化趋势,可以看出农作物秸秆可收集总量呈上升趋势,从2020年的 8.07×10^8 t/a增加到2022年的 8.35×10^8 t/a,且玉米、水稻、小麦的秸秆可收集量占比一直排前3位,其中2022年,这3种作物的秸秆可收集量之和占9种主要农作物秸秆可收集总量的89.69%,其次是油菜占2.41%,薯类2.33%,花生2.32%,大豆2.11%,甘蔗0.91%,棉花0.22%。2020—2022年,9种作物产生的秸秆可收集量比例由大至小依次为玉米、水稻、小麦、油菜、薯类、花生、大豆、甘蔗、棉花。

1.2 秸秆分布比例

在地域分布上,华北和长江中下游是秸秆可收集量生产的两大主要农区,2020—2022年这两大农区的9种主要农作物秸秆可收集量平均值分别为 2.79×10^8 和 1.93×10^8 t/a,占我国平均可收集总量的33.84%和23.40%,东北农区占22.77%,西南、西北分别占8.72%、6.52%,南方农区占比最小,为4.74%。图2示出2020—2022年我国六大农区9种主要农作物秸秆平均可收集量占总可收集量的比例。可以看出,玉米和小麦秸秆可收集量在华北农区较高,共占90.92%;东北农区的玉米秸秆可收集

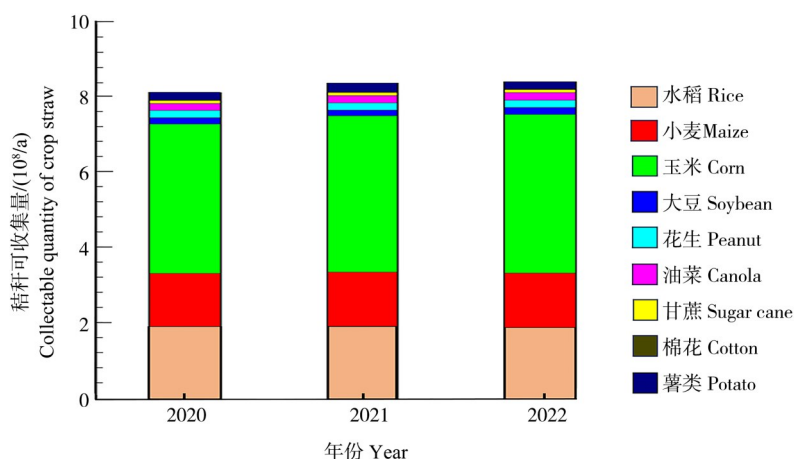


图 1 2020—2022 年我国六大农区主要农作物秸秆可收集量

Fig.1 Collectable quantity of major crop straw in six major agricultural regions of China from 2020 to 2022

量在当地达 78.17%，其次是水稻占 16.04%；水稻秸秆可收集量在长江中下游农区和南方农区的占比都较高，分别为 55.74%、55.30%；西北农区的玉米秸秆可收集量在当地达 63.06%，其次是小麦占 25.01%；西南农区的小麦、水稻和玉米秸秆可收集量在当地分别占 40.25%、31.01% 和 5.15%；南方

农区的甘蔗秸秆可收集量在当地仅次于水稻，为 15.94%。

综上，我国秸秆资源地域分布具有明显的区域特征，不同农区的主要作物类型决定了秸秆可收集量的结构差异。这些差异也为不同区域秸秆资源的分类利用和装备选型提供了依据。

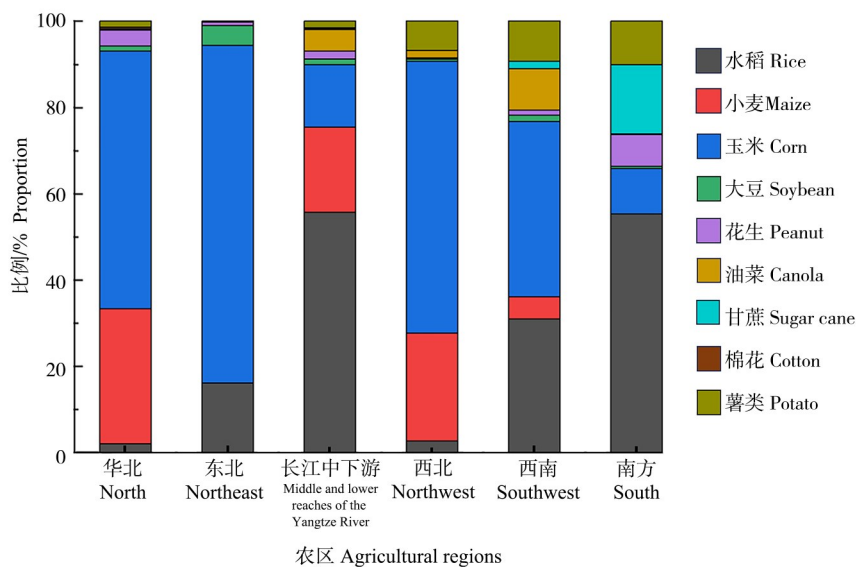


图 2 2020—2022 年我国六大农区 9 种主要农作物秸秆平均可收集量占总可收集量的比例

Fig.2 Proportion of the 2020–2022 average collectable straw yield of nine major crops in the six major agricultural regions to the total yield

1.3 秸秆利用情况

根据《秸秆综合利用技术目录(2021)》^[15]，目前秸秆资源综合利用主要包括肥料化、燃料化、饲料化、原料化和基料化(“五料化”)。农业农村部资料显示^[16]：2021年，

全国秸秆利用量 6.47 亿 t，综合利用率达 88.1%，较 2018 年增长了 3.4%。肥料化、饲料化、燃料化、基料化、原料化利用率分别为 60%、18%、8.5%、0.7% 和 0.9%，其中秸秆肥料化利用主要以秸秆还田为主。

2 秸秆还田技术与装备

根据作物收获后剩余的秸秆是直接进行还田还是作为其他用途后产生的废弃物继续还田,分为直接还田和间接还田。直接还田根据对秸秆的处理方式又可分为高留茬还田、覆盖还田以及掩埋还田。间接还田包括菌糠沼肥还田、秸秆堆沤还田、外置式秸秆生物反应堆气液综合利用技术以及草木灰还田等。秸秆还田作为最直接的肥料化途径,不仅能增加有机质、促进微生物活动、提升土壤肥力,而且能通过覆盖作用减少土壤水分蒸发,达到保水保土的效果^[17]。随着世界各国环境保护意识的增强以及对秸秆还田技术的重视度逐步提高,各类相关装备的推广与应用也逐步开展。自20世纪70年代起,欧美率先推广秸秆还田技术,并配套研发了专用机械设备。国内自20世纪90年代起逐步应用,目前已有多种作业模式与装备类型。

2.1 秸秆直接还田

2.1.1 秸秆粉碎覆盖还田

粉碎还田按照作业形式可以分为秸秆粉碎还田机和根茬粉碎还田机。根茬粉碎还田机主要用于播种前的作物秸秆与根茬处理,作业对象为玉米、高粱、棉花等根茬粗壮硬实的作物。秸秆粉碎还田机是用机械粉碎装置将茎秆和茎叶粉碎抛撒覆盖地表,主要适用于小麦、水稻、高粱、玉米等软硬秸秆。对于粗大作物如玉米和高粱,其碎秆合格长度应 ≤ 100 mm;而小麦和水稻等细小作物碎秆合格长度应 ≤ 150 mm。秸秆粉碎后覆盖还田是当前秸秆还田的主流形式,因为相比于整秆还田,粉碎后的秸秆更容易分解为有机质,有助于提升土壤肥力,改善作物生长条件。机械化秸秆粉碎还田的主要设备为秸秆粉碎还田机,基本作业流程包括秸秆的切割、粉碎、抛撒及混土,主要由高速旋转的锤爪或甩刀对秸秆进行反复的锤击、切割和揉搓处理,将其粉碎成丝瓢状。通常,秸秆粉碎还田机与拖拉机配合工作,由动力输出轴驱动,作业时会将秸秆切碎并散布在土壤表面,随后经过旋耕或覆土实现还田效果。

根据秸秆粉碎还田机粉碎轴的结构不同,目前主要有卧式(刀轴呈横向水平配置,安装在刀轴上的甩刀在纵向垂直面内旋转)和立式(刀轴呈垂直方向配置,安装在刀轴上的刀片在横向水平面内旋

转)两种类型。卧式秸秆粉碎还田机根据传动方式可分为单边传动和双边传动。单边传动通常只在刀轴的一侧设置传动装置,占用空间小,广泛应用于小型或轻型秸秆还田机;而双边传动两侧同时向刀轴输入动力,适用于秸秆产量大的情况,能够承受更大的载荷。双边传动的设备不仅可以安装在拖拉机后方,还可以放置在收割机前中后方,并且能够与其他作业机具配套,形成复式机具,一次性完成多项作业任务,从而提高作业效率。

粉碎刀片的设计对秸秆与根茬的切碎质量、机具功耗及使用寿命有显著影响。目前市场上应用较为广泛的刀型为锤爪式^[18]、直刀型^[19]及各类甩刀等。为提高秸秆粉碎质量,国内已对甩刀结构进行了大量研究,并设计了Y型^[20]、L型^[21]等,以及新型刀片V-L型^[22]、Y直型锯齿型^[23]、双排定刀^[24]、立轴锯片型^[25]等。近些年,关于秸秆粉碎过程中刀片力学特性的研究较多,大多通过理论分析和试验验证,优化刀片结构和动力学性能,以提高粉碎效率并降低能耗。刘鹏等^[26]基于异速圆盘动态支撑式玉米秸秆粉碎装置的设计,研究秸秆粉碎过程各阶段的力学和能量变化规律,优化后秸秆粉碎长度合格率为93.34%;陈黎卿等^[27]研究了刀具入土深度、粉碎速度对秸秆还田机功耗的影响,结果表明机具功耗随深度和速度增加而增大;Aygün等^[28]研究了不同形状、尺寸和排列方式的刀片,并量化了其对粉碎率、能耗、堵塞频率以及粉碎后秸秆分布均匀性的影响。此外,针对刀片作业参数,已有研究深入分析了速度、切削角度等与刀片动力学性能之间的关系,进一步优化了作业效率,如林涵等^[29]基于等径凸轮机构往复运动原理,实现粉碎装置参数快速匹配。为了提高秸秆粉碎均匀性、延长刀片使用寿命并改善土壤破碎效果,已有研究出现了一些创新设计,刀片设计逐步与多功能装置整合,研究开发了锯盘支撑式、支撑式差速切锯式^[30]和多轴复合式等装置,以提高还田机在不同地块条件下的适应性。郭俊等^[31]基于鼯鼠足趾设计锯齿状正、侧切削刀刀片,耕后地表质量、秸秆粉碎均匀性及秸秆掩埋率方面明显优于国标旋耕刀,实现了一种刀片同时完成旋耕和秸秆粉碎两种不同作业目标;张春岭等^[32]开发了等角螺线的等滑切角二次切刀,专门应对稻茬密集田块的粉碎需求,降低了机具功耗并提高了粉碎率。表1示出部分常用粉碎刀的优缺点及

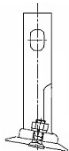
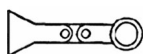
其适应秸秆种类。

针对秸秆缠绕问题,尤其是香蕉秸秆,具有纤维粗且韧性强的特点导致其极易缠绕机具,目前已出现大量相关的防缠设计。如张喜瑞等^[33]针对香蕉秸秆设计了一种双定刀滑切防缠式粉碎还田机,使粉碎室内长秸秆数量减少达到增大关键部件防缠性能的目的;李粤等^[34]设计的定甩刀防缠式秸秆粉碎还田机,

其中粉碎定刀与高速运转中的Y型甩刀相互配合,从而有效避免秸秆缠绕;欧忠庆等^[35]研制的正反转倒U型甩刀能对秸秆正反转进行二次作业,提高了秸秆粉碎率并解决了缠绕问题。综上,从刀具结构与运动方式入手,通过优化粉碎路径、提升切割效率及减少长秸秆残留,可以有效增强粉碎还田机具的防缠性能,并为复杂纤维秸秆的高效处理提供技术支撑。

表 1 部分常用粉碎刀优缺点及其适应秸秆种类

Table 1 Advantages and disadvantages of some commonly used crushing knives and their application in straw types

刀具类型 Type of crushing knives	适应秸秆种类 Suitable straw types	优点及缺点 Advantages and disadvantages	刀具示例 Knife examples
锤爪型 ^[37] Hammer claw	硬秸秆,如玉米、高粱	粉碎效果好,使用寿命高; 震动较大,能耗高	
直刀式 ^[38] Straight knife	轻秸秆,如小麦、水稻	结构简单,制造容易,低油耗; 捡拾效果差	
L型刀 ^[38] L-Shaped knife	硬秸秆,如玉米、高粱、棉花	捡拾效果好,混埋效果好; 粉碎刀长度短,强度低	
Y型刀 Y-Shaped knife	硬秸秆,如玉米、高粱	捡拾效果好,低油耗; 寿命较短	
V-L型刀 ^[22] V-L-shaped knife	硬秸秆,如玉米、高粱,与Y型刀相似	动平衡良好,惯性大、砍切效果好;刃线较短	
T型刀 ^[38] T-shaped knife	玉米秸秆和根茬	惯性大,砍切效果好; 结构复杂	
三节鞭式 ^[39] Three-section whip	玉米、小麦秸秆;兼具灭茬功能	粉碎质量好,工作效率高; 工作阻力大,使用寿命短	

在秸秆粉碎后的抛撒环节,现有研究主要集中在刀片与抛撒装置的协同作用上,许多创新方案如旋切后抛撒和Y型刀多次切割被提出,以优化抛撒均匀性并减少堵塞问题。如黄椿等^[40]提出立式双轴异向转动粉碎方案,提高了秸秆的抛撒均匀度。图3为意大利Maschio公司生产的Scorpione976型秸秆粉碎抛撒机,该设备由拖拉机前方的水平切割圆盘割断秸秆,秸秆经过链条输送进入粉碎箱,在强气流作用下被抛撒到田间地表,最后拖拉机后方的收集箱回收碎秸秆。



图 3 Scorpione976型秸秆粉碎抛撒机

Fig.3 Scorpione976 straw crushing and spreading machine

秸秆粉碎还田装置可与其他作业机具形成复式机具组合。除了秸秆粉碎免耕播种机和秸秆催腐还田机,西方发达国家的玉米秸秆还田通常采用联合收获机将秸秆粉碎后直接抛撒还田,这一方式可同时完成摘穗、脱粒和秸秆粉碎还田等多项作业,实现作业环节的高度集成和效率提升。表2示出国外部分具有特色秸秆处理技术的联合收获机。

表2 国外部分具有特色秸秆处理技术的联合收获机
Table 2 Some foreign combine harvesters with unique straw processing technologies

型号 Model	机具外型 Machine appearance	技术特点 Technical characteristics
Lexion 8900 型联合收获机 Lexion 8900 combine harvester		应用 CEMOS 自动切碎系统,实现了收获机自动根据作物优化秸秆切碎的功能,传感器测量秸秆进入联合收割机时的水分含量和秸秆厚度,并将这些信息用于切碎机为适应收割环境而做出动态调整
John Deere Y215 玉米联合收获机 John Deere Y215 corn combine harvester		茎秆粉碎器覆盖范围宽于行距,弥补行距种植偏差和转向影响,粉碎效果好。茎秆粉碎器后方浮动辊,可使茎秆粉碎器随着地况的起伏进行仿形,有效防止粉碎器的刀片与地面接触造成损坏,使粉碎器具有更长的使用寿命和较高的可靠性。还可选装不同秸秆铺放装置,以满足秸秆处理需求
Premos5000 移动式颗粒联合收获机 Premos5000 mobile grain combine harvester		幅宽 2.35 m 的捡拾器将田间的作物秸秆捡起梳理后,无需切碎,由转子将物料平铺在传送带上,接着进入到直径为 800 mm 的 2 个压模滚筒中间进行碾压。生产的秸秆颗粒自然堆放密度达到 600~700 kg/m ³ ;作业效率为 5 000~6 000 kg/h
New holland CR11 联合收割机 New Holland CR11 combine harvester		适用于处理大量秸秆并要求精细切碎的大面积作物收割场景。其割刀宽度可达 6~10 m。配备了切碎机和谷壳撒布机系统,专为高质量切碎和均匀撒布而设计

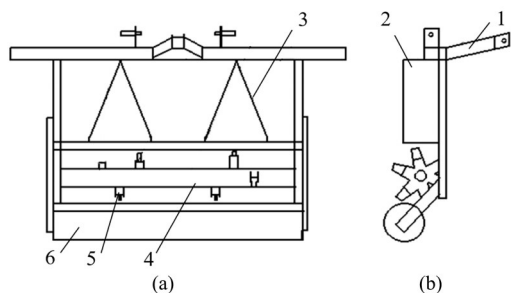
2.1.2 整秆覆盖还田技术

整秆还田指对作物摘穗后直立在田间的整株秸秆进行机械作业,将其倒置并覆盖在农田内,以实现秸秆还田。该方法主要适用于东北和西北一年一熟的旱作农业地区,如玉米、高粱等粗秆作物及小麦的高茬还田。其优点包括抗旱保墒、减少秸秆粉碎作业环节、降低生产费用等。

20 世纪 90 年代,山西省长治市农机研究所研制了 4 FJY-2 型玉米整秆半覆盖机,配合玉米宽窄行种植法使用。该机配有直径 400 mm,宽度 900 mm 的压辊,质量 150~170 kg,一次性镇压 2 行玉米秸

秆^[41]。胡春胜等^[42]于 21 世纪初研制了玉米秸秆梳压机,该机利用圆形压辊防止秸秆反弹,作业时梳导板将玉米秸秆引导至玉米带,并进行免耕播种,图 4 示出该机具的结构简图。

何建怀^[43]研发了适用于黄淮海一年两季地区的玉米秸秆顺行铺放机(图 5),能够有效覆盖整秆并解决根茬难处理问题,减少土壤扰动并节约能耗,提供良好的播种防堵效果。作业后,地表秸秆覆盖率可达 55%~70%,平均为 61.8%。李建群^[44]针对华北地区的一年两熟玉米小麦种植模式,研制了玉米秸秆顺行铺放小麦免耕播种联合作业机



1. 机架; 2. 梳齿; 3. 梳导板; 4. 粉碎刀轴; 5. 粉碎刀; 6. 压辊
1. Frame; 2. Comb teeth; 3. Comb guide plate; 4. Crushing blade shaft; 5. Crushing blade; 6. Pressing roller

图 4 玉米秸秆梳压机结构正视(a)和侧视(b)图

Fig.4 Corn stalk combing machine structure front view(a) and side view(b)

(图 6), 实现了秸秆压倒、切碎、清理及免耕播种等多项作业的集成, 切刀往复式运动将行间玉米秸秆粉碎, 随后将粉碎秸秆用圆盘梳理装置进行梳理,

在清理后的玉米行间免耕播种小麦。梁泉强^[45]设计了一种小型滚压式秸秆压倒田间覆盖机(图 7), 利用手扶拖拉机为动力, 能够高效完成秸秆压倒、压伤和覆盖作业, 压倒作业可有效加速植株失水死亡。

在巴西、美国、巴拉圭等国家, 广泛应用于秸秆和覆盖物处理的田间覆盖机称为“Roller Crimper”, 常用于压倒覆盖作物、杂草、秸秆(表 3), 该机具以其结构简洁、价格低廉和便于本地制造的优势, 在当地已成为农业系统中不可或缺的一部分^[46]。Roller Crimper 通常在圆形滚筒表面安装刀片, 构成刀辊“Knife Roller”。刀辊直径一般为 304~914 mm, 刀片高度 76~102 mm, 刀片间距为 178~203 mm^[47-48]。根据结构类型, Roller Crimper 主要分为刀辊、圆辊和双辊 3 类, 目前国外相关研究多聚焦于其对覆盖作物的压倒效果进行定量分析。



图 5 玉米秸秆顺行铺放机(a)及其田间作业效果(b)

Fig.5 Corn straw laying machine(a) and its field operation effect diagram(b)

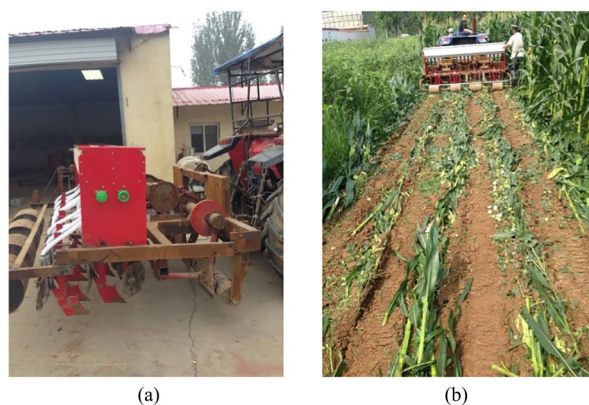


图 6 玉米秸秆顺行铺放小麦免耕播种联合作业机(a)及作业效果(b)

Fig.6 Corn straw laying and wheat no-tillage sowing combined operation machine(a) and operation effect diagram(b)

在作物播种前, 利用 Roller Crimper 对覆盖作物进行压碎处理, 可形成天然覆盖层, 是一种有效且可持续的杂草控制方式。例如, 在毛茛子(野豌豆

属)覆盖物中播种向日葵时, 通常需要辅以除草剂以控制杂草。Antichi 等^[50]比较了直接使用 Roller Crimper 碾压杂草与不同剂量除草剂处理的除草效

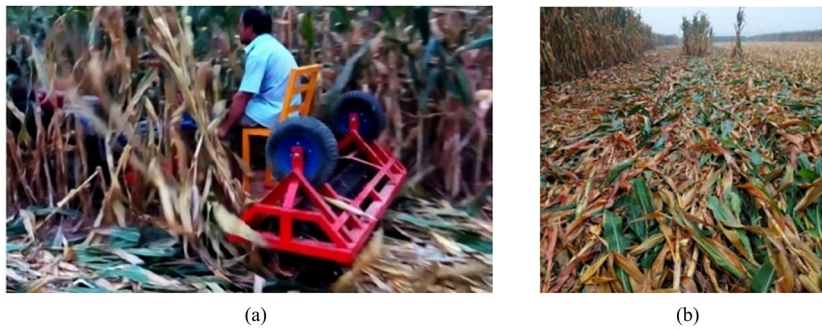


图7 小型滚压式秸秆压倒田间覆盖机(a)及滚压作业效果(b)

Fig.7 Small rolling straw mulching machine(a) and rolling operation effect diagram(b)

表3 国外部分田间覆盖机

Table 3 Some foreign Roller Crimpers

型号 Model	机具外型 Machine appearance	技术特点 Technical characteristics
美国 I&J公司生产的 Roller Crimpe Roller Crimpe produced by I&J, USA		该机刀片采用人字形布置方案,滚筒直径16英寸(406.4 mm),滚筒一周均布10个刀片,刀片高度4英寸(101.6 mm),刀片向后倾角为7°~10°,即刀片和其与滚筒接触点的切平面夹角为80°~83°,质量可在滚筒中通过注水来调节,作业宽度可从8英尺(2.44 m)到30英尺(9.14 m);与拖拉机挂接方式有悬挂式和牵引式,悬挂式又有前悬和后悬2种
美国 Rite Way公司生产的 Roller Crimper Roller Crimper produced by Rite Way, USA		该机滚筒直径为41英寸(1 041 mm),滚筒一周布置约22个角钢作为工作刀片,为减少振动,刀片采用短直刀错列式布置方案,刀片高度约为2英寸(65 mm),刀片间距为7英寸,工作宽度可从11英尺(3.35 m)可到52英尺(15.85 m)
Eco-Roll 1500 Roller Crimper ^[49]		能够在压碎植物茎干的同时并切断根系,有效降低杂草残留量。国外发表的有关秸秆压倒田间覆盖机的研究成果主要在北美和南美地区,机具主要适用于大地块、大动力机和覆盖作物作业

果。研究采用由农户自制的人字形罗代尔式 Roller Crimper(图8),安装于拖拉机前部,后方连接免耕播种机,实现毛茛子(品种:Haymaker Plus)的一次



图8 前置人字形罗代尔式碾压机

Fig.8 Front-mounted herringbone Rodale Roller Crimper

性压倒灭茬与向日葵(LG 55-57 HO 杂交品种)免耕播种作业。结果表明,在适宜时期进行碾压灭茬,其农艺效果和经济效益可与施用草甘膦除草剂相媲美。

2.1.3 秸秆高留茬及掩埋还田

当秸秆全部还田出现腐解困难或全部回收效果不佳时,高留茬还田作为兼顾土壤保护与资源利用的方式,在干旱风沙区与双季稻区均展现良好适应性与应用前景^[51]。合理控制留茬高度,不仅能减少风蚀水蚀、改善土壤水分状况,而且有助于提升

土壤有机质含量与微生物活性,增强土壤肥力。在装备方面,部分联合收割机优化切割系统后可精准控制留茬高度,并配套秸秆粉碎装置将秸秆上部均匀抛撒地表。如张姬等^[52]在 4YZQ-2B1 型穗茎兼收玉米收获机割台的下方加装锯盘式玉米秸秆粉碎装置,实现平均留茬高度 52.18 mm。高留茬还田中秸秆上半部分用作饲料回收过程中,成铎等^[53]将自走式捡拾与高留茬切割装置集成至稻麦联合收获打捆机,实现一体化作业。吴启斌^[54]提出在圆捆机捡拾器前加装切割器,解决站秆收获打捆难题。陈立才等^[55]改进设计的南方水田高留茬秸秆还田起浆机能一次性完成水田旋耕整地、秸秆翻埋还田和地表平整等多项作业工序,采用旋耕刀和起浆刀配合使用,优化后的刀具提升了高留茬秸秆的还田起浆效果。吴罗发等^[56]研发的“履带式拖拉机+普通旋耕机”,在作业深度、耕深稳定性、地面平整度、压茬深度、植被覆盖合格率等耕作性能均优于普通的“轮式拖拉机+普通旋耕机”。综上,优化联合收割机切割装置以精准控制留茬高度,以及高效秸秆粉碎、捡拾、打捆及还田起浆装备的研发,都显著提升了机具作业效率和秸秆利用率。

秸秆掩埋还田是利用铧式犁、旋耕机等将秸秆埋至表土 15 cm 以下,在东北东部耕层厚、不易春旱的平川地块及洪涝灾害地块,这种方式促使秸秆在土壤深处充分腐解转化为有机质,释放氮、磷、钾等养分^[57],为下茬作物提供长效营养,减少化肥使用,降低农业成本与环境污染^[58-60]。该技术常与旋耕、深松或翻耕作业配合,以确保秸秆均匀混入土壤,提高腐解效率。当前研究重点集中在复式作业机具上,致力于提升秸秆掩埋还田的作业效率、均匀性和稳定性。郑智旗等^[61]等研制的秸秆捡拾粉碎掩埋复式还田机,能实现秸秆掩埋还田比例调节和部分秸秆抛撒还田,能一次完成秸秆捡拾、粉碎、输送和开沟掩埋等作业;王瑞丽等^[62]设计的开沟灭茬机集开深沟、碎土、灭茬等多道工序为一体,开沟稳定性为 92.4%;田阳等^[20]研制的气力式 1JH-型秸秆深埋还田机一次完成破茬、秸秆捡拾粉碎、开沟碎土、行间深松、秸秆深埋、覆土镇压等功能,深埋率达 94%。张绪争等^[63]集成链式开沟装置、水平旋转搂草装置和螺旋绞龙覆土结构,研制的秸秆集中沟埋还田一体机实现入沟率 86.3%。

然而,无论是留茬覆盖还是掩埋还田方式,在

实际应用中仍面临挑战,如高留茬可能影响播种并诱发病虫害,掩埋还田若粉碎不充分或翻埋过浅,可能导致土壤通气性、秸秆腐解不良,甚至形成“海绵层”阻碍根系生长。秸秆腐解过程受粉碎程度、土壤湿度与温度、微生物活性等多因素影响,因地制宜调整作业参数有助于提升腐解速率与作物产量。为此,应从技术与装备两方面协同优化:技术上,根据区域土壤与作物特性精准控制留茬高度,强化病虫害防控,并在播种前适当施用土壤药剂或采用生物防治措施;装备上,应确保秸秆粉碎质量与翻埋深度符合要求,并及时镇压,促进秸秆与土壤紧密接触,为顺利腐解创造良好条件。

2.2 秸秆间接还田

作物收获后,部分秸秆在经过其他用途利用后,其残余物再返回田间的过程被称为间接还田。常见形式包括菌糠沼肥还田、秸秆堆沤还田、生物反应堆气炸液综合利用、草木灰还田等形式。表 4 展示了各类间接还田技术的优势与存在的不足,为在不同区域的适用性提供参考。

菌糠沼肥还田是指将秸秆用作食用菌栽培基质,收获菌菇后产生的菌糠中富含经微生物分解后的多种养分,粗蛋白、粗脂肪显著增加,纤维素等得到有效降解,还含有丰富的氨基酸和微量元素。菌糠进一步用于沼气生产,产生的沼渣与沼液作为优质有机肥还田,不仅能够提高土壤有机质含量,改善土壤理化性质,还可增强保水保肥能力,促进作物生长。该技术适用于食用菌种植与沼气生产较为集中,且具备菌糠与沼气处理基础设施的农业区域。

秸秆堆沤还田是将秸秆与腐熟剂、畜禽粪肥等物料混合堆积,微生物发酵使其充分腐熟。在堆沤过程中,秸秆中的复杂有机物逐步分解为可被作物吸收的小分子物质,形成腐殖质,可提升土壤肥力并调节土壤酸碱度。

秸秆生物反应堆气炸液综合利用技术是通过特定微生物菌群作用,使秸秆定向转化为二氧化碳、热量、抗病孢子、酶类以及多种有机与无机养分^[64],技术分为内置式反应堆与外置式反应堆两种结构形式:前者可直接部署于田间,便于分散管理;后者适合集中处理大规模秸秆。该技术不仅能够提升土壤肥力,还能显著增强病害防控能力,适用于病害频发区或高附加值作物区域^[65-66]。

表4 间接还田技术的优势和劣势

Table 4 Advantages and disadvantages of indirect soil return technology

间接还田技术 Indirect field return technology	优势 Advantage	劣势 Disadvantage
菌糠沼肥还田 Returning fungus residue and biogas fertilizer to fields	营养丰富,含大量有机质、氮磷钾等养分及微生物菌体蛋白,全面滋养作物;改善土壤理化性质,提升保水保肥能力;促进土壤微生物活动繁殖,增强土壤生物活性;实现农业废弃物资源化,减少污染	菌糠和沼肥的收集、运输成本较高,尤其是规模化应用时;发酵处理过程需一定技术与设备,若操作不当易产生异味或发酵不充分;还田量把控难度大,过量还田可能导致养分失衡
秸秆堆沤还田 Straw composting and returning to fields	堆沤过程能杀灭部分病虫害及杂草种子,减少田间危害;提升土壤有机质含量,优化土壤结构,利于根系生长;堆沤后的秸秆肥效缓慢释放,长效供给作物养分	堆沤耗时较长,需提前规划,影响还田及时性;堆沤场地要求高,需较大空间且要防雨淋、防渗漏;堆沤过程需人工翻动等管理,劳动强度大,且若管理不善易造成养分损失
秸秆生物反应堆气炸液 综合利用技术 Comprehensive utilization technology of straw bioreactor gas explosion liquid	提高地温,促进作物根系发育,增强作物抗寒、抗病能力;产生的二氧化碳可作为气肥,增强作物光合作用,提高产量与品质;改善土壤微生物环境,疏松土壤,提升土壤透气性	技术相对复杂,需专业人员操作与指导,农民掌握难度较大;初期建设成本高,需购置专用设备,如秸秆生物反应堆装置等;受地域、气候等条件限制,在寒冷或干旱地区推广应用有难度
草木灰还田 Returning wood ash to fields	富含钾、钙、磷等多种矿物质养分,能快速补充土壤营养,尤其对喜钾作物效果显著;呈碱性,可调节酸性土壤pH值,改善土壤酸碱度;具有一定杀菌消毒作用,可减少部分土传病害发生;来源广泛,成本低廉,制作简单	草木灰中养分含量不稳定,受原材料及燃烧程度影响大;过量使用可能导致土壤碱性过强,影响土壤微生物活性及部分作物生长;易被雨水冲刷流失,养分保存时间相对较短,需适时补充

草木灰还田是利用秸秆不完全燃烧后的灰烬直接施于土壤。草木灰富含钾、钙、镁等矿物质,尤其钾元素含量高,可有效补充土壤养分,增强作物抗倒伏、抗病虫能力。此外,其碱性特性有助于中和酸性土壤、改善土壤环境^[67-68],改善土壤环境。但在实际施用,应避免与铵态氮肥混用,以防造成氮素挥发损失。

相关配套装备,也不断推动机械化发展:如菌糠沼肥还田所配套的沼渣沼液施肥设备,可实现精准控制施肥量和深度;秸秆堆沤环节配备有秸秆粉碎设备和翻堆机械,前者可将秸秆破碎至适宜长度以促进发酵,后者有助于加快堆体腐熟与发热均匀性;外置式生物反应堆配有标准化的储气池、交换底座及循环装置,用于保障微生物反应环境的稳定运行;草木灰施用中常采用撒肥机等设备以实现田间的均匀撒布。

总体而言,间接还田拓展了秸秆资源的高效循环利用路径,不仅提升了土壤质量与有机肥供给能力,也为农业生态循环体系的构建提供了重要支撑。

2.3 秸秆腐解

为提高秸秆腐解效率、实现高效还田,国内常采用秸秆打包离田处理,将田间秸秆打包后转运至集中场地,添加腐熟剂、氮肥或畜禽粪便等辅料,以露天堆沤方式发酵制备有机肥料,最终再将腐熟后的有机肥撒施或深施还田。相较于直接还田,堆沤处理在温度、湿度等发酵参数方面更具可控性,显著提高腐解效率。然而,该方式需经历打包、运输、堆肥处理、有机肥回运及施肥等多个环节,过程操作繁琐、成本高、效率低,限制了其大规模推广。特别是在寒冷地区,堆放与运输过程中易诱发病害传播,影响作物后期生长。尽管堆肥是一种高效的秸秆资源化手段,但在实际应用中仍面临腐熟速度慢、氮素损失大等问题。因此,相较于直接还田配施腐熟剂方式,打包离田虽在腐解效率上占优,但在作业成本和经济性上存在明显劣势,亟待优化。

近年来,研究重心逐渐转向秸秆直接还田配施腐熟剂技术的生态与经济效益评估^[69-70]。相关研究表明,该技术不仅能提升土壤有机质含量,改善土壤结构,还可减少温室气体排放,降低农业投

入成本,在实现农业绿色发展方面展现出良好前景,并为其机械化推广应用奠定了基础。秸秆腐解剂的核心作用在于物理、化学及生物机制加速了秸秆的分解与腐殖化。随着农业废弃物资源化需求

的上升,腐解剂的研究与推广日益受到重视。根据所添加成分类型,腐解剂主要可分为三大类:无机腐解剂、有机腐解剂和微生物腐解剂^[71],具体分类及特点见表 5。

表 5 腐解剂分类及特点
Table 5 Classification and characteristics of decomposition agents

种类 Type	组成成分 Composition	作用特点 Characteristics of action
无机腐解剂 Inorganic decomposing agent	以金属氧化物(如 MnO ₂ 、Fe ₂ O ₃) ^[72-73] 和矿物材料(如沸石、石灰) ^[74] 等为主	金属氧化物在催化作用下加速秸秆中木质素和纤维素的分解,同时减少氮素损失并促进腐殖质的形成;而矿物材料可调节堆肥的 pH 和吸附能力,为微生物提供适宜的生存环境
有机腐解剂 Organic decomposing agent	包括生物炭和三羧酸循环调节剂等(如三磷酸腺苷 ATP、烟酰胺腺嘌呤二核苷酸 NADH)	生物炭具有优良的吸附能力,可调节堆肥环境中的水分、气体和养分平衡,而三羧酸 ^[75] 循环调节剂通过调节微生物代谢路径,提高了腐殖质的生成率,减少了二氧化碳排放 ^[76-77]
微生物腐解剂 Microbial decomposing agent	由特定菌种或混合菌种组成,如枯草芽孢杆菌和链霉菌等	微生物可通过分泌纤维素酶和木质素降解酶直接参与秸秆降解,或通过重构微生物群落间接促进腐解过程,提高堆肥成熟度和最终产品的养分质量 ^[78-79]

在秸秆腐熟剂的成分优化与高效配方研发方面,20 世纪初日本岛本觉也率先研发出可用于秸秆堆沤腐熟的岛本酵素菌^[80],并实现多国应用,奠定了微生物腐熟剂研究基础。近年来,随着对微生物群落结构及代谢机制的深入研究,腐熟剂的研发逐渐向精准调控微生物种类与比例方向发展。例如,美国俄亥俄州农业试验站进行了为期 8 年的秸秆还田田间试验,虽然研究重点为还田对作物产量的影响,但也为不同处理条件下腐熟效果的比较提供了关键数据,支撑了腐熟剂配方优化。

腐熟剂的大量推广应用,在解决传统秸秆还田中腐解缓慢、氮素损失严重等问题的同时,也在提升土壤有机质、改善理化性质和减少温室气体排放等方面展现出积极效益。然而,腐熟剂在应用过程中仍面临推广成本高、区域适应性差等限制。因此,未来研究亟需聚焦高效、低成本、环境友好型腐熟剂的开发,并加强对腐熟过程微生物机制的解析。为提升腐熟效率并实现机械化作业,目前已研制出多种具备腐熟剂同步喷施功能的秸秆还田装备。如:戴飞等^[81]设计的快速腐熟秸秆还田机,将秸秆粉碎与腐熟剂同步喷施结合,在 7 个月内腐解率较单独粉碎处理提升了 17.1%;葛宜元等^[82]研发

的水稻高秆翻埋快腐还田机,在翻埋+腐熟剂协同作用加快腐解,同时改善土壤肥力;方志超等^[83-84]设计的稻麦联合收获多功能机集成开沟、埋草、喷菌等功能,实现秸秆翻埋与腐熟同步,显著提升作业效率与机械化水平;杨雪岷^[85]研制的玉米秸秆聚垄腐熟还田机实现了秸秆聚垄、撒施腐熟剂、镇压覆土一体化操作;向禹舜^[86]设计的水稻秸秆集条沟埋腐熟还田机可一次完成开沟、集条、喷施、覆土全流程,特别适用于东北寒冷地区;高阳等^[87]针对香蕉秸秆特点研发的还田机,由 4 个扇形喷头实现同步腐熟处理,有效应对缠绕问题并加快腐解进程。这些装备的应用,不仅推动秸秆腐熟技术向高效机械化发展,也为农业绿色转型提供有力支撑。

在腐熟剂喷施技术方面,国外多基于农业药剂喷雾系统展开研究,相关成果为腐熟剂施用技术提供了重要借鉴。如在葡萄、柑橘、香蕉等作物上的农药喷施实验^[88-91]中,采用地面喷雾器、航空喷雾器械以及无人机等多种设备^[92-93],结合 2D 激光雷达对作物冠层孔隙率进行建模分析^[94],从而提升穿透效率和剂量精准控制。这些喷施技术若应用于腐熟剂领域,可显著提升喷洒均匀性与环境友好性,推动秸秆腐熟管理的智能化与精准化。

2.4 秸秆覆盖率及覆盖量检测

为提升秸秆还田效果,精准掌握秸秆覆盖情况至关重要。秸秆覆盖率和覆盖量的多少不仅直接影响播种深度控制、苗齐苗壮及作物生长环境,也是衡量还田质量与效果的重要指标。播种前开展覆盖监测有助于合理调整作业参数,播后则可用于评估秸秆还田对土壤保墒性、养分保持和土壤环境改善的实际作用。随着农业机械智能化水平不断提升,秸秆覆盖率与覆盖量检测技术逐步成熟,不仅为研究还田措施对地表侵蚀、土壤结构及水肥保持的影响提供关键数据支撑,也为优化作业模式和提升秸秆资源利用效率提供科学依据。

2.4.1 秸秆覆盖率检测技术

传统的取样法、估算法或目测法等虽然操作简单,但易受到人为误差影响,检测效率低,难以满足大面积快速检测的需求。近年来,图像分割技术在秸秆覆盖率检测中取得显著进展。分析秸秆与土壤在纹理^[95]、亮度^[96]或颜色^[97]等特征上的差异后,利用阈值分割技术优化两者的区分精度从而达到识别秸秆的目的。如刘媛媛等^[98]提出的差分灰狼优化(DE-GWO)算法可实现图像的快速多阈值分割;杨光等^[99]结合畸变校正与Otsu算法,将检测误差降至5%以内。深度学习技术的引入进一步提升了检测效率和精度,李洪文等^[100]构建的人工神经网络模型将检测效率提升80倍;李佳等^[101]结合傅里叶变换和SVM算法实现4.55%的识别误差,展现出较高精度。

在国际研究方面,欧美国家自20世纪80年代便开始探索电子图像分析在秸秆检测中的应用^[102]。90年代起,基于颜色特征的分割方法逐步成熟^[103]。近年来,遥感技术与机器学习融合发展,显著提高了复杂田间环境下的目标识别能力。Hemming等^[104]提出基于光照控制与模糊逻辑的图像分类方法,增强了土壤与作物残茬的分割效果;Owen等^[105]等采用决策树算法成功分离裸土与植被。短波红外(Shortwave infrared, SWIR)波段因具备较强的秸秆与土壤识别能力,被广泛用于覆盖率模型构建,如Daughtry等^[106]基于SWIR反射特性构建的模型在中高覆盖率条件下精度较高。卫星遥感影像因其覆盖范围广、获取成本低,也被用于大范围覆盖监测。Memon等^[107]结合Landsat数据评估了稻麦轮作体系的秸秆覆盖率,并分析了与小麦产量的

关系。然而,田间图像与卫星影像的分析结果受限于数据质量和预处理效果。如田间图像与卫星影像的检测精度受限于图像分辨率、光照条件与噪声干扰;多数算法适用范围局限于特定作物或区域,通用性不足;此外,大多方法关注静态图像分析,未能充分考虑秸秆覆盖的动态变化,如作物生长阶段或机械扰动带来的影响。因此,后续研究亟需在提升算法适应性、动态监测能力及多源数据融合等方面深入推进,以构建更加智能、稳定、可扩展的秸秆覆盖率检测体系。

2.4.2 秸秆覆盖量检测技术

秸秆覆盖量对土壤性质和作物生长具有显著影响。在秸秆还田过程中,适量覆盖有助于改善土壤养分与水分状况,提升免耕播种效率,促进作物光合作用并提高产量。秸秆还田能增加土壤有机质、改善结构,地表覆盖还能减少水分蒸发,为作物提供更优良的生长环境^[108-115]。然而,覆盖量过多或过少均可能对作物生长及生态环境产生不利影响。因此,构建高效、精准的秸秆覆盖量检测技术体系,可为作业参数调节与作业质量评估提供依据,从而提高秸秆还田作业的整体效果。

20世纪90年代,Morrison等^[116]为探究残茬覆盖度与土壤侵蚀关系,总结并提出了多种作物残茬量测定方法,包括田间目测法、直立残茬圆圈法、照像技术、录像图像分析、残茬量测定仪和残茬测轮等,为覆盖量测定提供了初步技术路径。然而,这些方法大多依赖人工操作,效率低且受主观因素影响较大。目前,GB/T 20865—2017《免(少)耕施肥播种机》^[117]中规定的残茬覆盖量测定方法仍采用人工采样和称重的方法,在测试地块中使用对角线法随机选取5个1 m×1 m的测试点,采用测试框取样并称重计算平均值。尽管方法简便,但存在效率低、劳动强度大、数据精度有限等问题,难以适应现代农业对高效、精准管理的需求。近年来,随着感知与智能分析技术的发展,基于图像处理的秸秆覆盖量检测技术逐渐兴起。如利用RGB-D传感器采集彩色与深度图像^[118],结合图像处理算法分析秸秆分布与厚度信息。此外,部分研究基于气力输送原理开发了机械化检测方法,例如利用负压气流吸取秸秆并精准称重,有效去除杂质,提升检测精度^[119]。这些新兴技术显著提高了秸秆覆盖量测定的效率与精度,为自动化、智能化检测提供了可行路径。

随着人工智能、传感器技术与机械控制系统的融合发展,覆盖量检测有望进一步向实时、高通量、多维度方向演进,为精准农业管理和土壤生态保护提供坚实技术支撑。

3 展 望

秸秆还田技术与装备的发展将朝着智能化、高效化和多功能一体化的方向迈进。自动驾驶、精准作业控制系统与智能感知技术将在秸秆处理装备中得到广泛应用,以提升作业精度和作业均匀性。高效、复式的多功能装备将更好适应不同作物秸秆的处理需求,减少作业环节,提高作业效率。秸秆还田技术将在增强养分循环和改善土壤结构方面发挥更大作用,借助生物降解剂加快秸秆腐熟进程,提升土壤有机质含量,降低对化肥的依赖。同时,装备的区域化适配能力将不断增强,以适应各类土壤条件与气候环境,扩大其适用范围。此外,大数据和物联网技术将助力实现精准化的农田秸秆产量管理,支持实时监测与智能调控,最大限度提高资源利用效率,推动农业向可持续方向发展。随着相关技术不断突破,秸秆还田装备将更趋智能与高效,助力农业生产管理水平迈上新台阶。

参考文献 References

- [1] 宗锦耀. 中国保护性耕作[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 1-7
Zong J Y. *Conservation Tillage in China*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008: 1-7 (in Chinese)
- [2] Yang F K, He B L, Zhang L G, Zhang G P, Gao Y P. An approach to improve soil quality: a case study of straw incorporation with a decomposer under full film-mulched ridge-furrow tillage on the semiarid loess plateau, China[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, 20(1): 125-138
- [3] Huang T T, Yang N, Lu C, Qin X L, Siddique K H M. Soil organic carbon, total nitrogen, available nutrients, and yield under different straw returning methods[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 214: 105171
- [4] Akhtar K, Wang W Y, Ren G X, Khan A, Feng Y Z, Yang G H, Wang H Y. Integrated use of straw mulch with nitrogen fertilizer improves soil functionality and soybean production[J]. *Environment International*, 2019, 132: 105092
- [5] Su Y, Yu M, Xi H, Lv J L, Ma Z H, Kou C L, Shen A L. Soil microbial community shifts with long-term of different straw return in wheat-corn rotation system[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 6360
- [6] Thakur S S, Chandel R, Narang M K. Studies on straw management techniques using paddy-straw chopper cum spreader along with various tillage practices and subsequent effect of various sowing techniques on wheat yield and economics[J]. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*, 2018, 49(2): 52-67
- [7] 王庆杰, 曹鑫鹏, 王超, 李洪文, 何进, 卢彩云. 东北黑土地玉米免耕播种技术与机具研究进展[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 1-15

Wang Q J, Cao X P, Wang C, Li H W, He J, Lu C Y. Research progress of No/minimum tillage corn seeding technology and machine in northeast black land of China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(10): 1-15 (in Chinese)

- [8] 孟海兵, 许飞鸣. 秸秆还田及综合利用技术[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008: 1-8
Meng H B, Xu F M. *Straw Returning and Comprehensive Utilization Technology*[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2008: 1-8 (in Chinese)
- [9] Zhou D Y, Li M, Li Y, Qi J T, Liu K, Cong X, Tian X L. Detection of ground straw coverage under conservation tillage based on deep learning[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 172: 105369
- [10] Yang H S, Meng Y, Feng J X, Li Y F, Zhai S L, Liu J. Direct and indirect effects of long-term ditch-buried straw return on soil bacterial community in a rice - wheat rotation system[J]. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(7): 851-867
- [11] 国家统计局. 中国统计年鉴2020[EB/OL]. [2025-03-02]. <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2020/indexch.htm>.
National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook 2020 [EB/OL]. (2025-05-02). <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2020/indexch.htm> (in Chinese)
- [12] 国家统计局. 中国统计年鉴2021[EB/OL]. [2025-03-02]. <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2021/indexch.htm>
National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook 2021 [EB/OL]. (2025-05-02). <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2021/indexch.htm> (in Chinese)
- [13] 国家统计局. 中国统计年鉴2022[EB/OL]. [2025-03-02]. <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2022/indexch.htm>
National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook 2022 [EB/OL]. (2025-05-02). <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2022/indexch.htm> (in Chinese)
- [14] 农业农村部办公厅. 农业农村部办公厅关于做好农作物秸秆资源台账建设工作的通知[EB/OL]. [2025-03-02]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019-10/28/content_5445951.htm General Office of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs. General Office of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs on doing a good job in the construction of crop straw straw resource accounts notice [EB/OL]. [2025-03-02]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019-10/28/content_5445951.htm (in Chinese)
- [15] 农业农村部办公厅, 国家发展改革委办公厅. 农业农村部办公厅 国家发展改革委办公厅关于印发《秸秆综合利用技术目录(2021)》的通知[EB/OL]. [2025-03-02]. https://www.moa.gov.cn/nybg/2021/202111/202112/t20211221_6385225.htm
General Office of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, General Office of the National Development and Reform Commission. Notice of the General Office of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs and the General Office of the National Development and Reform Commission on Issuing the Catalogue of Straw Comprehensive Utilization Technologies (2021) [EB/OL]. [2025-03-02]. https://www.moa.gov.cn/nybg/2021/202111/202112/t20211221_6385225.htm (in Chinese)
- [16] 农业农村部. 《全国农作物秸秆综合利用情况报告》发布2021年我国农作物秸秆综合利用率达88.1% [EB/OL]. [2025-03-02]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-10/10/content_5717116.htm
Ministry of Agriculture and Rural Affairs. National Report on Comprehensive Utilization of Crop Straw released China's comprehensive utilization rate of crop straw to reach 88.1% by 2021 [EB/OL]. [2025-03-02]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-10/10/content_5717116.htm (in Chinese)
- [17] 何进, 李洪文, 陈海涛, 卢彩云, 王庆杰. 保护性耕作技术与机具研究进展

- [J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 1-19
- He J, Li H W, Chen H T, Lu C Y, Wang Q J. Research progress of conservation tillage technology and machine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(4): 1-19 (in Chinese)
- [18] Liu H, Jiang G M, Zhuang H Y, Wang K J. Distribution, utilization structure and potential of biomass resources in rural China: With special references of crop residues[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12(5): 1402-1418
- [19] 孙宏宇, 董玉平, 吴云玉, 盖超, 王维振, 冯盟. 基于COSMOSWorks的还田机直刀有限元分析[J]. 农机化研究, 2011, 33(1): 69-71, 75
- Sun H Y, Dong Y P, Wu Y Y, Gai C, Wang W Z, Feng M. Finite element analysis of straw machine straight knife based on COSMOSWorks[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2011, 33(1): 69-71, 75 (in Chinese)
- [20] 田阳, 林静, 李宝筏, 张桐嘉, 齐林, 王佳琦. 气力式1JH-2型秸秆深埋还田机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 10-18
- Tian Y, Lin J, Li B F, Zhang T J, Qi L, Wang J Q. Design and test of pneumatic 1JH-2 style straw deep burying and returning machine[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(14): 10-18 (in Chinese)
- [21] 贺宁波, 李粤, 郭超凡, 张喜瑞, 梁栋. 香蕉秸秆粉碎还田机刀片优化设计与试验[J]. 农机化研究, 2021, 43(12): 85-91
- He N B, Li Y, Guo C F, Zhang X R, Liang D. Optimization design and test of blade of banana straw returning machine[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2021, 43(12): 85-91 (in Chinese)
- [22] 贾洪雷, 姜鑫铭, 郭明卓, 刘晓亮, 王立春. V-L型秸秆粉碎还田刀片设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 28-33
- Jia H L, Jiang X M, Guo M Z, Liu X L, Wang L C. Design and experiment of V-L shaped smashed straw blade[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(1): 28-33 (in Chinese)
- [23] 邱新伟, 王俊发, 李亚芹, 陈思羽, 庄腾飞. Y-直型锯齿型秸秆粉碎还田装置的设计[J]. 现代化农业, 2015(6): 53-55
- Qiu X W, Wang J F, Li Y Q, Chen S Y, Zhuang T F. Design of Y- straight sawtooth straw crushing and returning device[J]. *Modernizing Agriculture*, 2015(6): 53-55 (in Chinese)
- [24] 刘伟光, 杨楠, 李卓. 秸秆精细粉碎双排定刀还田机设计[J]. 农业工程, 2023, 13(5): 109-113
- Liu W G, Yang N, Li Z. Design on double row fixed blade returning machine for fine straw crushing[J]. *Agricultural Engineering*, 2023, 13(5): 109-113 (in Chinese)
- [25] 杜凯. 立轴锯片式棉秆还田机关键部件设计与台架试验[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2024
- Du K. Design and bench test of key components of vertical shaft saw blade cotton stalk returning machine[D]. Ala'er: Tarim University, 2024 (in Chinese)
- [26] 刘鹏, 何进, 姜尚易, 王英博, 张振国, 林涵. 异速圆盘动态支撑式玉米秸秆粉碎装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 41-50
- Liu P, He J, Lou S Y, Wang Y B, Zhang Z G, Lin H. Design and experiment for dynamic supporting type maize straw chopping retention device with different rotation speeds of disc blade[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(10): 41-50 (in Chinese)
- [27] 陈黎卿, 梁修天, 曹成茂. 基于多体动力学的秸秆还田机虚拟仿真与功耗测试[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 106-111
- Chen L Q, Liang X T, Cao C M. Virtual simulation and power test of straw counters-field based on multi-body dynamics[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(3): 106-111 (in Chinese)
- [28] Aygün İ, Cakir E. Development and determination of the field performance of stalk choppers equipped with different blade configurations[J]. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2014, 20(5): 1268-1271
- [29] 林涵, 何进, 李慧, 王超, 李航, 谭露. 基于PLC控制的等径凸轮传动自动变速秸秆粉碎还田装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 96-110
- Lin H, He J, Li H, Wang C, Li H, Tan L. Design and experiment of variable-speed straw chopping machine based on PLC control with equal diameter cam transmission[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(7): 96-110 (in Chinese)
- [30] 孙妮娜, 王晓燕, 李洪文, 何进, 王庆杰, 王将, 刘正道, 王英博. 差速锯切式水稻秸秆粉碎还田机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 267-276
- Sun N N, Wang X Y, Li H W, He J, Wang Q J, Wang J, Liu Z D, Wang Y B. Design and experiment of differential sawing rice straw chopper for turning to field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(22): 267-276 (in Chinese)
- [31] 郭俊, 张庆怡, Muhammad Sohail Memon, 姬长英, 赵正. 仿鼯鼠趾排列的旋耕-秸秆粉碎锯齿刀片设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 43-50
- Guo J, Zhang Q Y, Memon M, Ji C Y, Zhao Z. Design and experiment of bionic mole's toe arrangement serrated blade for soil-rototilling and straw-shattering[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(6): 43-50 (in Chinese)
- [32] 张春岭, 夏俊芳, 张居敏, 周华, 祝英豪, 王金武. 六头螺旋秸秆还田耕整机刀辊设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 25-34
- Zhang C L, Xia J F, Zhang J M, Zhou H, Zhu Y H, Wang J W. Design and experiment of knife roller for six-head spiral straw returning cultivator[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(3): 25-34 (in Chinese)
- [33] 张喜瑞, 杨勋铭, 刘宏新, 刘俊孝, 张志富, 曹硕. 双定刀滑切防缠式香蕉秸秆粉碎还田机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 36-49
- Zhang X R, Yang Y M, Liu H X, Liu J X, Zhang Z F, Cao S. Optimal design and experiment of double fixed knife slip-cutting and anti-tangle banana straw crushing and returning machine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(2): 36-49 (in Chinese)
- [34] 李粤, 郭超凡, 姚德宇, 贺宁波, 张喜瑞, 吴紫晗, 李媛. 定甩刀防缠式香蕉秸秆粉碎还田机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(18): 11-19
- Li Y, Guo C F, Yao D Y, He N B, Zhang X R, Wu Z H, Li Y. Design and experiment of banana straw crushing and returning machine with anti-wrapping device supported by flailing blade[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(18): 11-19 (in Chinese)
- [35] 欧忠庆, 张园, 刘智强, 邓怡国, 王业勤, 韦丽娇, 陈沛民, 燕波. 正反转倒U型甩刀香蕉茎秆粉碎还田机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2020, 42(12): 80-84
- Ou Z Q, Zhang Y, Liu Z Q, Deng Y G, Wang Y Q, Wei L J, Chen P M, Yan B. Design and experiment on banana stalks disintegrator with positive and negative U-shaped flail knife[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2020, 42(12): 80-84 (in Chinese)
- [36] 高玉兰. 基于离散元法的反旋秸秆还田机仿真优化及试验研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019
- Gao Y L. Simulation optimization and experimental study of counter-rotating straw returning machine based on discrete element method[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019 (in Chinese)
- [37] 杜凯, 马少辉. 秸秆粉碎还田机的发展现状与问题研究[J]. 数字农业与智能农机, 2023(11): 22-24, 57
- Du K, Ma S H. Research on development status and problems of straw crushing and returning machine[J]. *Digital Agriculture and Intelligent Agricultural Machinery*, 2023(11): 22-24, 57 (in Chinese)
- [38] 徐春华, 介战. T型板刀式秸秆还田机刀辊设计[J]. 拖拉机与农用运输车, 2014, 41(5): 50-51, 54

- Xu C H, Jie Z. Design of T-type plate knife roller of straw returning machine [J]. *Tractor & Farm Transporter*, 2014, 41(5): 50-51, 54 (in Chinese)
- [39] 张世芳, 赵树朋, 马跃进, 李久熙, 李纪刚, 张秀花. 秸秆还田机鞭式刀具的研究[J]. 农业机械学报, 2004, 35(2): 59-61
- Zhang S F, Zhao S P, Ma Y J, Li J X, Li J G, Zhang X H. Research of scourge-type reamer used for straw returning machine[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2004, 35(2): 59-61 (in Chinese)
- [40] 黄椿, 李粤, 位士全, 高阳, 吴紫晗, 黄麒麟, 魏晨辉. 异向双轴香蕉秸秆粉碎还田机设计与试验[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(11): 97-106
- Huang C, Li Y, Wei S Q, Gao Y, Wu Z H, Huang Q R, Wei C H. Design and experiment of double shafts banana straw crushing and returning machine with different rotational directions[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2024, 26(11): 97-106 (in Chinese)
- [41] 王华, 赵树智, 刘松芹. 4FJY-2型玉米整秆半覆盖机[J]. 山西农机, 1996(3): 32
- Wang H, Zhao S Z, Liu S Q. 4FJY-2 corn whole stalk semi-mulching machine[J]. *Contemporary Farm Machinery*, 1996(3): 32 (in Chinese)
- [42] 胡春胜, 陈素英, 张西群, 赵四申, 王绍仁. 玉米整秸覆盖小麦全免耕播种方法及设备. 中国, CN200310109679. X [P]. 2007-02-14
- Hu C S, Chen S Y, Zhang X Q, Zhao S S. Fully no-tillage wheat seeding method and equipment under full corn stalk coverage. China, CN200310109679. X [P]. 2007-02-14 (in Chinese)
- [43] 何建怀. 玉米秸秆顺行铺放机研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016
- He J H. Research on corn straw aligned laying machine[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016 (in Chinese)
- [44] 李建群. 玉米秸秆顺行铺放小麦免耕播种联合作业机研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- Li J Q. Research on combined operation machine for no-tillage wheat sowing under aligned corn straw coverage [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017 (in Chinese)
- [45] 梁泉强. 小型滚压式秸秆压侧机田间覆盖机的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015
- Liang X Q. Research on a small roller-type straw flattening and covering machine[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015 (in Chinese)
- [46] 高焕文, 王智才. 保护性耕作与可持续农业[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社. 2004: 5-15
- Wang Z C, Gao H W. *Conservation Tillage and Sustainable Agriculture* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2004: 5-15 (in Chinese)
- [47] Curran W, Ryan M. Cover Crop Rollers for Northeastern Grain Production [EB/OL]. <http://sustainable-farming.rutgers.edu/wp-content/uploads/2014/02/Roller-Cover-Crops-NE-Grain-Production-Curran-PennState-2010.pdf>
- [48] U. S. department of agriculture. The knife roller (Crimper): An alternative kill method for cover crops [EB/OL]. [2025-03-03]. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_053284.pdf
- [49] Wang H X, Lu Y, Xu J L, Liu X J, Sheng L X. Effects of additives on nitrogen transformation and greenhouse gases emission of co-composting for Deer manure and corn straw [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28(10): 13000-13020
- [50] Antichi D, Carlesi S, Mazzoncini M, Barberi P. Targeted timing of hairy vetch cover crop termination with roller crimper can eliminate glyphosate requirements in no-till sunflower [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2022, 42(5): 87
- [51] 于琳浩, 耿爱军, 王明廷, 杨建宁, 杨启勇. 玉米秸秆还田现状与对策探析[J]. 农业装备与车辆工程, 2015, 53(11): 4-6
- Yu L H, Geng A J, Wang M T, Yang J N, Yang Q Y. Study on present situation of maize straws returning and countermeasure[J]. *Agricultural Equipment & Vehicle Engineering*, 2015, 53(11): 4-6 (in Chinese)
- [52] 张姬, 于泳涛, 杨启勇, 张吉旺, 张智龙, 耿爱军. 高留茬玉米秸秆复式割台粉碎还田装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(S1): 42-49
- Zhang J, Yu Y T, Yang Q Y, Zhang J W, Zhang Z L, Geng A J. Design and experiment of smashed straw unit for high stubble maize double header[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(S1): 42-49 (in Chinese)
- [53] 成铖, 李耀明, 徐立章, 胡必友, 王满先. 自走式拾高留茬切割装置设计与试验. 农机化研究, 2017. 39(6): 150-153
- Cheng C, Li Y M, Xu L Z, Hu B Y, Wang M X. Design and experiment of self-propelled pickup high stubble cutting device[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2017, 39(6): 150-153 (in Chinese)
- [54] 吴启斌. 收获高留茬稻麦站秆的圆捆机切割装置设计与试验[D]. 镇江: 江苏大学, 2017
- Wu Q B. Design and experiment of cutting device of round baler for harvesting high stubble rice and wheat stalks [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017 (in Chinese)
- [55] 陈立才, 王康军, 吴罗发, 杨伟光, 欧阳淑珍, 潘松. 南方水田高留茬秸秆还田起浆机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(5): 179-185
- Chen L C, Wang K J, Wu L F, Yang W G, Ouyang S Z, Pan S. Design and experiment of cultivator for high stubble straw returning pulping in southern paddy field [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2022, 43(5): 179-185 (in Chinese)
- [56] 吴罗发, 王康军, 陈立才, 董献华, 赖宏斐. 南方双季稻区保护性耕作装备的田间试验与效果[J]. 江西农业学报, 2022, 34(3): 196-201
- Wu L F, Wang K J, Chen L C, Dong X H, Lai H F. Field test and effect of protective tillage equipment in southern double-cropping rice areas[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2022, 34(3): 196-201 (in Chinese)
- [57] 杨书云, 蔡金文, 李受鹏, 韩彦, 金鑫, 侯广庆, 邵徐杰, 程文肖, 李长江. 不同沟埋还田模式下菠萝秸秆腐解特征研究[J]. 热带生物学报, 2024, 15(2): 133-140
- Yang S Y, Cai J W, Li S P, Han Y, Jin X, Hou G Q, Shao X J, Cheng W X, Li C J. Decomposition characteristics of pineapple plant residues returned to the soil in different ditches[J]. *Journal of Tropical Biology*, 2024, 15(2): 133-140 (in Chinese)
- [58] Yang H S, Feng J X, Zhai S L, Dai Y J, Xu M M, Wu J S, Shen M X, Bian X M, Koide R T, Liu J. Long-term ditch-buried straw return alters soil water potential, temperature, and microbial communities in a rice-wheat rotation system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 163: 21-31
- [59] Wang X H, Yang H S, Liu J, Wu J S, Chen W P, Wu J, Zhu L Q, Bian X M. Effects of ditch-buried straw return on soil organic carbon and rice yields in a rice - wheat rotation system[J]. *CATENA*, 2015, 127: 56-63
- [60] 郑智旗, 何进, 张祥彩, 郑侃. 秸秆沟埋还田技术的研究现状与展望[J]. 农机化研究, 2016, 38(9): 10-16
- Zheng Z Q, He J, Zhang X C, Zheng K. A review on technique for straw ditch-buried returning field [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2016, 38(9): 10-16 (in Chinese)
- [61] 郑智旗, 何进, 王庆杰, 李洪文, 李问盈, 陈婉芝. 秸秆拾拾粉碎掩埋复式还田机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 87-96
- Zheng Z Q, He J, Wang Q J, Li H W, Li W Y, Chen W Z. Design and experiment on straw pickup-chopping and ditch-burying integrated machine [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(7): 87-96 (in Chinese)
- [62] 王瑞丽, 杨鹏, Rabiul Falah Jahun, 赛森. 秸秆深埋还田开沟灭茬机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 40-47
- Wang R L, Yang P, Jahun R, Dou S. Design and experiment of combine

- machine for deep furrowing, stubble chopping, returning and burying of chopped straw [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(5): 40-47 (in Chinese)
- [63] 张绪争, 魏清, 何瑞银. 秸秆集中沟埋还田一体机的设计与试验[J]. 江苏农机化, 2020(6): 4-9
- Zhang X Z, Wei Q, He R Y. Design and experiment of integrated machine for burying straw in concentrated ditch and returning it to field [J]. *Jiangsu Agricultural Mechanization*, 2020(6): 4-9 (in Chinese)
- [64] 李军见. 秸秆生物反应堆技术在西安地区的应用效果及应用方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010
- Li J J. Study on the application effect and method of straw bioreactor technology in Xi'an area [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010 (in Chinese)
- [65] 农新. 秸秆生物反应堆技术提高农业绿色生产水平[J]. 农村新技术, 2023(4): 4-7
- Nong X. Straw bioreactor technology to improve the level of agricultural green production [J]. *Rural New Technologies*, 2023(4): 4-7 (in Chinese)
- [66] 袁贞贞, 廖允成, 王阳峰, 杨薇, 杨林, 乔宏喜, 李洁. 不同秸秆生物反应堆对日光温室黄瓜生长环境及产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(10): 186-192, 198
- Yuan D Z, Liao Y C, Wang Y F, Yang W, Yang L, Qiao H X, Li J. Effects of straw bioreactor on growth environment and yield of cucumber in greenhouse [J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2014, 42(10): 186-192, 198 (in Chinese)
- [67] 范拴喜, 崔佳茜, 李丹, 付林涛, 赫晓云, 闻杰. 不同改良措施对设施蔬菜土壤肥力和番茄品质的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(16): 58-64
- Fan S X, Cui J Q /X, Li D, Fu L T, He X Y, Wen J. Effects of different improvement measures on soil fertility and the tomato quality of facilities vegetables [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(16): 58-64 (in Chinese)
- [68] 范庆锋, 盛诗涵, 杨春璐, 陈重, 安晶, 邹洪涛. 玉米秸秆还田形式对辽东低山丘陵区旱田土壤酸化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(12): 2984-2990
- Fan Q F, Sheng S H, Yang C L, Chen Z, An J, Zou H T. Effects of different straw returning methods on the soil acidification of dryland in low mountain and hilly areas of Liaodong [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(12): 2984-2990 (in Chinese)
- [69] Wang X G, Wang Q S, Zhang Y C, Zhang J H, Xia S B, Qin H D, Feng C H, Bie S. Influence of decomposition agent application and schedule in wheat straw return practice on soil quality and crop yield [J]. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2023, 10(1): 8
- [70] 胡诚, 陈云峰, 乔艳, 刘东海, 张顺陶, 李双来. 秸秆还田配施腐熟剂对低产黄泥田的改良作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 59-66
- Hu C, Chen Y F, Qiao Y, Liu D H, Zhang S T, Li S L. Effect of returning straw added with straw-decomposing inoculants on soil melioration in low-yielding yellow clayey soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(1): 59-66 (in Chinese)
- [71] Piao M Y, Li A, Du H S, Sun Y W, Du H X, Teng H H. A review of additives use in straw composting [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2023, 30(20): 57253-57270
- [72] Zhang L H, Dong H R, Zhang J C, Chen Y N, Zeng G M, Yuan Y J, Cao W C, Fang W, Hou K J, Wang B, Li L. Influence of FeONPs amendment on nitrogen conservation and microbial community succession during composting of agricultural waste: Relative contributions of ammonia-oxidizing bacteria and Archaea to nitrogen conservation [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 287: 121463
- [73] Zhang S, Wei Z M, Zhao M Y, Chen X M, Wu J Q, Kang K J, Wu Y Y. Influence of malonic acid and manganese dioxide on humic substance formation and inhibition of CO₂ release during composting [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 318: 124075
- [74] Xu C, Wong V N L, Tuovinen A, Simojoki A. Effects of liming on oxic and anoxic N₂O and CO₂ production in different horizons of boreal acid sulfate soil and non-acid soil under controlled conditions [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 857: 159505
- [75] Lin X, Wang N Y, Li F H, Yan B H, Pan J T, Jiang S L, Peng H, Chen A W, Wu G Y, Zhang J C, Zhang L H, Huang H L, Luo L. Evaluation of the synergistic effects of biochar and biogas residue on CO₂ and CH₄ emission, functional genes, and enzyme activity during straw composting [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 360: 127608
- [76] Yu C J, Lu Q, Fu C, Jiang Z W, Huang J Y, Jiang F Z, Wei Z M. Exploring the internal driving mechanism underlying bacterial community-induced organic component conversion and humus formation during rice straw composting with tricarboxylic acid cycle regulator addition [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 365: 128149
- [77] Wang L Q, Wang X, Song Y Y, Sun L H, Chen X M, Wu J Q, Song C H, Zhao Y. Slowed down nitrogen mineralization under bacterial community-driven conditions by adding inhibitors during rice straw composting [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 362: 127778
- [78] Dash P K, Padhy S R, Bhattacharyya P, Pattanayak A, Routray S, Panneerselvam P, Nayak A K, Pathak H. Efficient lignin decomposing microbial consortium to hasten rice-straw composting with moderate GHGs fluxes [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2022, 13(1): 481-496
- [79] Sarma S, Patel N, Patel A, Desai C, Sharma S, Dedania S, Rudakiya D M, Vishwakarma A S, Vahora S, Narra M. Rapid decomposition of rice straw by application of a novel microbial consortium and study its microbial community dynamics [J]. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 2022, 38(11): 212
- [80] 宋斌, 李钟宁. 黄河生态枯萎与凋落物回收再利用研究与探讨 [C]//2023(第十一届)中国水生态大会论文集. 广州: 河海大学, 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 中国疏浚协会, 广东省水利水电科学研究院, 广东省水利学会, 2023: 388-396
- Song B, Li Z N. Study on ecological wilt and litter recovery and reuse of the Yellow River [C]. In: Proceedings of the 2023 (11th) China Water Ecology Conference. Guangzhou: Hohai University, Pearl River Water Resources Research Institute of the Pearl River Water Resources Commission, China Dredging Association, Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangdong Water Resources Society, 2023: 388 - 396 (in Chinese)
- [81] 戴飞, 张锋伟, 赵春花, 胡靖明, 韩正晨, 冯永忠. 快速腐熟秸秆还田机设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 47-51
- Dai F, Zhang F W, Zhao C H, Hu J M, Han Z S, Feng Y Z. Design and experiment on straw returning machine with fast decomposing inoculant spray equipment [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(4): 47-51 (in Chinese)
- [82] 葛宜元, 王金武, 李亚芹, 魏天路. 水稻高秆翻埋快腐还田机研究 [J]. 中国农业科技导报, 2014, 16(6): 81-88
- Ge Y Y, Wang J W, Li Y Q, Wei T L. Study on returning machine of rice high straw for quickly rotted [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2014, 16(6): 81-88 (in Chinese)
- [83] 方志超, 陈玉仑, 丁为民, 刘玉涛, 秦宽, 李雪. 稻麦联合收获开沟埋草多功能一体机喷菌装置的设计及试验 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 32-38
- Fang Z C, Chen Y L, Ding W M, Liu Y T, Qin K, Li X. Design and test of bacteria spraying device for harvest ditch and stalk-disposing machine [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31

- (14): 32-38 (in Chinese)
- [84] 陈玉仑, 丁为民, 汪小岳, 杨宏图. 稻麦联合收获开沟埋草多功能一体机设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 62-66
- Chen Y L, Ding W M, Wang X C, Yang H T. Design of harvest ditch and stalk-disposing machine [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(8): 62-66 (in Chinese)
- [85] 杨雪娟. 玉米秸秆聚垄腐熟还田机的设计[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018
- Yang X D. Design of corn stalk returning machine for ridging and decomposing[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018 (in Chinese)
- [86] 向禹舜. 水稻秸秆集条沟埋腐熟还田机设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023
- Xiang Y S. Design and experimental study on the machine for returning rice straw to the field after burying it in the ditch [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023 (in Chinese)
- [87] 高阳, 李粤, 位士全, 黄椿, 吴紫晗, 魏晨辉, 黄麒麟. 具有腐熟剂喷施装置的香蕉秸秆粉碎还田机的设计与试验[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(9): 93-104
- Gao Y, Li Y, Wei S Q, Huang C, Wu Z H, Wei C H, Huang Q R. Design and experiment of a banana straw crushing and returning machine with rotting agent spraying device [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2024, 26(9): 93-104 (in Chinese)
- [88] Hafeez A, Husain M A, Singh S P, Chauhan A, Khan M T, Kumar N, Chauhan A, Soni S K. Implementation of drone technology for farm monitoring & pesticide spraying: A review[J]. *Information Processing in Agriculture*, 2023, 10(2): 192-203
- [89] Jensen P K, Olesen M H. Spray mass balance in pesticide application: A review[J]. *Crop Protection*, 2014, 61: 23-31
- [90] Zanin A R A, Neves D C, Teodoro L P R, da Silva Júnior C A, da Silva S P, Teodoro P E, Baio F H R. Reduction of pesticide application *via* real-time precision spraying[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 5638
- [91] Gil Y, Sinfert C. Emission of pesticides to the air during sprayer application: A bibliographic review[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(28): 5183-5193
- [92] Sammons P J, Furukawa T, Bulgin A. Bulgin. Autonomous pesticide spraying robot for use in a greenhouse[R]. in Australian Conference on Robotics and Automation. Australia: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation Canberra, 2005
- [93] Façal B S, Freitas H, Gomes P H, Mano L Y, Pessin G, de Carvalho A C P L F, Krishnamachari B, Ueyama J. An adaptive approach for UAV-based pesticide spraying in dynamic environments[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 138: 210-223
- [94] Rahman S, Robertson D A, Govoni M A. Radar signatures of drones equipped with liquid spray payloads[C]. In: 2020 IEEE Radar Conference (RadarConf20). September 21-25, 2020. Florence, Italy. IEEE, 2020.
- [95] 李世卫, 李洪文. 基于计算机视觉的田间秸秆覆盖率计算[J]. 农机化研究, 2009, 31(1): 20-22, 25
- Li S W, Li H W. A counting method for residue cover rate in field based on computer vision[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2009, 31(1): 20-22, 25 (in Chinese)
- [96] 苏艳波, 张东远, 李洪文, 何进, 王庆杰, 李慧. 基于自动取阈分割算法的秸秆覆盖率检测系统[J]. 农机化研究, 2012, 34(8): 138-142
- Su Y B, Zhang D Y, Li H W, He J, Wang Q J, Li H. Measuring system for residue cover rate based on automation threshold[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2012, 34(8): 138-142 (in Chinese)
- [97] 王丽丽, 徐岚俊, 魏舒, 韦崇峰, 赵博, 苑严伟, 范晋伟. 基于Sauvola与Otsu算法的秸秆覆盖率图像检测方法[J]. 农业工程, 2017, 7(4): 29-35
- Wang L L, Xu L J, Wei S, Wei C F, Zhao B, Yuan Y W, Fan J W. Straw coverage detection method based on sauvola and otsu segmentation algorithm [J]. *Agricultural Engineering*, 2017, 7(4): 29-35 (in Chinese)
- [98] 刘媛媛, 孙嘉慧, 张书杰, 于海业, 王跃勇. 用多阈值多目标无人图像分割优化算法检测秸秆覆盖率[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 134-143
- Liu Y Y, Sun J H, Zhang S J, Yu H Y, Wang Y Y. Detection of straw coverage based on multi-threshold and multi-target UAV image segmentation optimization algorithm [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(20): 134-143 (in Chinese)
- [99] 杨光, 张洪熙, 方涛, 张彩丽. 基于改进AdaBoost算法的秸秆识别与覆盖率检测技术[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 177-183
- Yang G, Zhang H X, Fang T, Zhang C L. Straw recognition and coverage rate detection technology based on improved AdaBoost algorithm [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(7): 177-183 (in Chinese)
- [100] 李洪文, 李慧, 何进, 李世卫. 基于人工神经网络的田间秸秆覆盖率检测系统[J]. 农业机械学报, 2009, 40(6): 58-62
- Li H W, Li H, He J, Li S W. Measuring system for residue cover rate in field based on BP neural network[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(6): 58-62 (in Chinese)
- [101] 李佳, 吕程序, 苑严伟, 李亚硕, 伟利国, 秦秋生. 快速傅里叶变换结合SVM算法识别地表玉米秸秆覆盖率[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 194-201
- Li J, Lü C X, Yuan Y W, Li Y S, Wei L G, Qin Q S. Automatic recognition of corn straw coverage based on fast Fourier transform and SVM [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(20): 194-201 (in Chinese)
- [102] Dickey E C, Shelton D P, Meyer G E, Fairbanks K T. Determining crop residue cover with electronic image analysis[C]. In: Proceedings Of The Eleventh International Congress On Agricultural Engineering, Rotterdam: A. A. Balkema Publishers, 1989: 3056-3064
- [103] Chapron M, Requena-Esteso M, Boissard P, Assemat L. A method for recognizing vegetal species from multispectral images[C]. In: In J. V. Stafford (Ed.) Precision agriculture '99, Part 1 and Part 2: Papers presented at the 2nd European Conference on Precision Agriculture. Sheffield: Sheffield Academic Press, 1999: 239-247
- [104] Hemming J, Rath T. PA: Precision agriculture computer-vision-based weed identification under field conditions using controlled lighting[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2001, 78(3): 233-243
- [105] Owen D C, Bensli M T, Davis A P, Aydiş A H. Measuring soil coverage using image feature descriptors and the decision tree learning algorithm[J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 196: 112-126
- [106] Daughtry C S T, Hunt E R, McMurtrey J E. Assessing crop residue cover using shortwave infrared reflectance[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(1): 126-134
- [107] Memon M S, Jun Z, Sun C L, Jiang C X, Xu W Y, Hu Q, Yang H X, Ji C Y. Assessment of wheat straw cover and yield performance in a rice-wheat cropping system by using landsat satellite data[J]. *Sustainability*, 2019, 11(19): 5369
- [108] Stagnari F, Galieni A, Specia S, Cafiero G, Pisante M. Effects of straw mulch on growth and yield of durum wheat during transition to Conservation Agriculture in Mediterranean environment[J]. *Field Crops Research*, 2014, 167: 51-63
- [109] Qin T Y, Wang L, Zhao J S, Zhou G F, Li C H, Guo L Y, Jiang G M. Effects of straw mulching thickness on the soil health in a temperate organic vineyard[J]. *Agriculture*, 2022, 12(11): 1751
- [110] 于洋, 张常仁, 杨雅丽, 徐欣, 吕付泽, 郑甜甜, 解宏图, 鲍雪莲. 长期免耕

- 和秸秆覆盖量对黑土碳氮含量及碳氮循环相关酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2024, 35(3): 695-704
- Yu Y, Zhang C R, Yang Y L, Xu X, Lyu F Z, Zheng T T, Xie H T, Bao X L. Effects of long-term no-tillage and different stover mulching amounts on soil carbon and nitrogen contents and enzyme activities of carbon and nitrogen cycle in Mollisols[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(3): 695-704 (in Chinese)
- [111] 吕付泽, 杨雅丽, 鲍雪莲, 张常仁, 郑甜甜, 何红波, 张旭东, 解宏图. 免耕不同秸秆覆盖量对黑土微生物群落及其残留物的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34(4): 903-912
- Lu F Z, Yang Y L, Bao X L, Zhang C R, Zheng T T, He H B, Zhang X D, Xie H T. Effects of no-tillage and different stover mulching amounts on soil microbial community and microbial residue in the Mollisols of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(4): 903-912 (in Chinese)
- [112] 马菊花, 黄彩霞, 李亚珍, 杨永, 陈志杰, 李虹彩, 李拥军, 胡亮亮, 王龙龙, 张乾. 秸秆覆盖量与覆盖方式对马铃薯耗水特性及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(3): 57-64, 96
- Ma J H, Huang C X, Li Y Z, Yang Y, Chen Z P, Li H C, Li Y J, Hu L L, Wang L L, Zhang Q. The way and amount of straw mulching impact water consumption and yield of potato[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2023, 42(3): 57-64, 96 (in Chinese)
- [113] 李桂, 曹文华, 马建业, 马波, 王阳修, 王秋月. 小麦秸秆覆盖量对坡面流水动力学特性影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(1): 108-116
- Li G, Cao W H, Ma J Y, Ma B, Wang Y X, Wang Q Y. Effect of wheat straw mulch on slope hydrodynamic characteristics[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(1): 108-116 (in Chinese)
- [114] 王庆杰, 王宪良, 李洪文, 何进, 张翼夫, 黄幸媛. 华北一年两熟区玉米秸秆覆盖对冬小麦生长的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 192-198
- Wang Q J, Wang X L, Li H W, He J, Zhang Y F, Huang X Y. Effect of maize straw mulching on winter wheat growth in double cropping area of northern China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(8): 192-198 (in Chinese)
- [115] 蒲锦琳, 王俊, 王科锋, 白红英, 杨彩迪, 冯江茹, 赵洁, 陈金法. 基于APSIM模型的降水和温度变化对秸秆覆盖冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(21): 101-109
- Pu J L, Wang J, Wang K F, Bai H Y, Yang C D, Feng J R, Zhao J, Chen J F. Effects of precipitation and temperature changes on winter wheat yield under straw mulching based on the APSIM model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(21): 101-109 (in Chinese)
- [116] Morrison JE Jr, 刘增文. 作物残茬量的测定技术[J]. 水土保持科技情报, 1995(3): 35-37
- Morrison JE Jr, Liu Z W. Determination technology of crop stubble quantity [J]. *Scientific and Technical Information of Soil and Water Conservation*, 1995(3): 35-37 (in Chinese)
- [117] GB/T 20865—2017 免少耕施肥播种机[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017
- GB/T 20865—2017 No or little-tillage fertilizes-seeder [S]. Beijing: China Standard Press, 2005 (in Chinese)
- [118] Shao Y Y, Guan X L, Xuan G T, Li X T, Gu F W, Ma J T, Wu F, Hu Z C. Detection method of straw mulching unevenness with RGB-D sensors[J]. *AgriEngineering*, 2023, 5(1): 12-19
- [119] Li R R, Li H W, Lu C Y, Wang C, Wu Z Y, Tong Z W, Liu D, Jiang S. Design and experimental analysis of straw suction unit on straw cover weight detection machine[J]. *Agriculture*, 2023, 13(11): 2075

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 李蓉蓉, 中国农业大学工学院博士研究生在读。主要研究方向为保护性耕作秸秆处理技术与装备。



通讯作者简介: 王超, 博士, 副教授, 中国农业工程学会农业机械化与装备专业委员会副秘书长。主要研究方向为保护性耕作技术与智能装备, 主持国家自然科学基金、农业农村部保护性耕作中期评估等项目, 参与国家“十四五”重点研发等国家/省部级项目8项, 发表学术论文10余篇, 授权国家专利14项。