

播种作业触土部件研究综述

齐江涛<sup>1,2</sup> 杨宇超<sup>1,3</sup> 丁文瑞<sup>1,3</sup> 赵宏波<sup>4</sup> 黄玉祥<sup>4</sup> 王宇灿<sup>1,3</sup> 郭 慧<sup>1,2</sup>

(1. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025; 2. 吉林省智慧农业装备与技术重点实验室, 长春 130025;  
3. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130025; 4. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 播种作业质量直接关乎精准农业与智慧农业落地成效,其实现主要依赖开沟、排/导种、覆土和镇压等部件的协同作用。开沟、覆土、镇压等触土部件的作业性能通过作用于播种各环节,影响最终播种质量。本文从播种作业触土部件类型与产品出发,系统梳理了现有典型产品和非典型产品的基本结构。聚焦低扰动、减粘脱附等影响播种作业质量的性能提升,以及触土部件与土壤互作机理、调节机构优化和升级、作业状态智能监控等关键技术,综述了国内外相关研究进展。在此基础上,指出现有播种作业触土部件存在结构形式单一、产业化转化不足、高速作业适应性弱、智能调控能力不足、材料与工艺水平滞后等问题。面向未来发展,总结五大技术方向:面向多农艺模式的触土部件模块化与可调节技术、高效低耗触土部件的仿生减阻与结构轻量化技术、适配高速作业场景的动力学匹配与速度自适应控制技术、主动作业与智能化联动的闭环调控与感知决策技术,以及先进耐磨材料制备与高精度成形工艺技术。

**关键词:** 播种; 开沟; 覆土; 镇压; 触土部件

中图分类号: S223      文献标识码: A      文章编号: 1000-1298(2026)11-0015-21      OSID: 

Review of Research on Soil-engaging Components in Seeding Operations

QI Jiangtao<sup>1,2</sup> YANG Yuchao<sup>1,3</sup> DING Wenrui<sup>1,3</sup> ZHAO Hongbo<sup>4</sup> HUANG Yuxiang<sup>4</sup>  
WANG Yucan<sup>1,3</sup> GUO Hui<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China  
2. Smart Agriculture Equipment and Technology Key Laboratory of Jilin Province, Changchun 130025, China  
3. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China  
4. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** High-quality seeding operation is a key link in the seeding process of precision agriculture and smart agriculture, which is mainly completed through the coordination of processes such as furrow opening, seed metering and guiding, soil covering and soil compacting. The working performance of soil-engaging components such as furrowing, soil-covering, and pressing affects the final seeding quality by acting on the various stages of the seeding process. Based on the structure and types of the soil-engaging components in seeding operations, the basic structures and forms of existing typical and a typical products were summarized. Focusing on the improvement of operational quality such as low disturbance, anti-adhesion and anti-sticking of soil-engaging components, the research on component-soil interaction mechanism, the adjustment mechanism, and the intelligent monitoring of operating status, the research status of relevant technologies in China and abroad were elaborated in detail. Based on the above research status, the main existing problems of soil-engaging components in seeding operations were identified as follows: a single structural form of components, insufficient industrialization transformation, weak adaptability to high-speed operations, inadequate intelligent regulation and control capabilities, and lagging material and process levels. Totally five development prospects were summarized: modularization and adjustable technology for soil-engaging components tailored to meet the needs of multiple agricultural modes, bionic drag reduction and lightweight structure technology for efficient and low-consumption soil-

收稿日期: 2026-03-01    修回日期: 2026-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(32271988)

作者简介: 齐江涛(1981—),男,教授,博士,主要从事精准农业与仿生智能农机装备研究, E-mail: qijiangtao@jlu.edu.cn

通信作者: 郭慧(1988—),女,高级工程师,博士,主要从事农机触土部件及智能农业机械研究, E-mail: guohuipp0322@163.com

engaging components, dynamic matching and speed adaptive control technology suitable for high-speed operation scenarios, closed-loop regulation and perception decision-making technology for active operation and intelligent linkage, and advanced wear-resistant material preparation and high-precision forming process technology.

**Key words:** seeding operation; furrow opening; soil covering; soil compacting; soil-engaging components

## 0 引言

农业技术进步推动精准农业、智慧农业发展,对现有播种技术提出更高要求。播种环节的精准、智慧作业作为一种高标准作业,需要以精密播种机为基础,并结合 GPS/GIS/RS(全球定位系统/地理信息系统/遥感)、无人驾驶、计算机控制、传感器等技术实现,已广泛应用于玉米、大豆等作物播种环节<sup>[1]</sup>。精准农业、智慧农业的发展离不开精密播种技术完善<sup>[2]</sup>。

精密播种是根据农艺要求将确定数量的种子按照固定行距、粒距和播种深度精准地播入土壤,为种子创造均匀一致的生长环境<sup>[3-5]</sup>,实现苗齐、苗全、苗壮的播种效果<sup>[6-7]</sup>,以及增产增收<sup>[8-9]</sup>的生产目标。精密播种机作为实现精密播种的必要机具,可经其上开沟器、排种器、覆土器和镇压轮依次完成开沟、排/导种、覆土和镇压作业,各环节分工不同又紧密联系,直接影响最终播种质量<sup>[10]</sup>。

开沟器、覆土和镇压部件作为播种作业过程中的典型触土部件,在作业过程中会对种沟及排种作业后的种床环境产生联动影响<sup>[11]</sup>。因此,开沟、覆土和镇压部件除了需满足作业前参数可调,作业中状态稳定,作业后种子覆盖严密<sup>[12]</sup>,开沟深度、覆土厚度和镇压强度均匀<sup>[13-15]</sup>外,还需保证作业时对种子扰动小,以较好地维持前序排/导种环节作业质量<sup>[16]</sup>。

随着现代农业机械专业化程度不断提升,播种环节触土部件在种类和作业性能方面均得到了广泛研究,但在实际作业中仍存在作业扰动和阻力大、土壤粘附、作业稳定性不佳等作业质量问题。本文从播种作业触土部件研究现状出发,阐述国内外开沟、覆土和镇压部件类型与产品,从其作业质量提升、与土壤互作机理研究、调节机构优化和升级、作业状态智能监控 4 方面概述国内外相关研究进展,并对现存问题加以分析,对未来发展加以展望,以期为我国差异化农艺适配、智能化升级方向的播种作业触土部件研发提供参考。

## 1 触土部件类型与产品

### 1.1 开沟部件传统类型与典型产品

传统开沟部件按结构形式可分为滑刀式、芯铧

式、锄铲式和圆盘式等<sup>[17]</sup>。滑刀式开沟器开沟底面平坦,但其入土能力较弱且容易壅土,多用于已耕地及土壤松碎的平作地块,适合玉米、大豆等作物的精密播种作业,典型产品如东方红 2BMF6/12、7/14 型免耕播种机<sup>[18]</sup>(图 1a)和 John Deere P660 型精密吸式条播机<sup>[19]</sup>(图 2a);芯铧式开沟器入土容易且开沟较窄,对土层扰动小,保墒性能好,多用于干旱地区的少免耕播种及深施肥作业<sup>[20]</sup>,如海农 2BYF-3 型玉米播种机<sup>[21]</sup>(图 1b);锄铲式开沟器依靠尖锐铲体强制入土,吃土能力强,适合在多石、多草及根茬较多的复杂地块进行条播或宽幅播种作业,且可通过配置不同宽度的铲尖满足不同播种要求<sup>[22]</sup>,如加拿大 Bourgault 的 3320 型免耕条播机<sup>[23]</sup>(图 2b)和鑫大华 2BYZF-4 型指夹式玉米精量播种机<sup>[24]</sup>(图 1c);圆盘式开沟器可分为单圆盘式和双圆盘式,均利用旋转的圆盘刃口切削土壤并切断地表根茬来实现开沟,不挂草不壅土,可满足秸秆覆盖条件下的免耕播种要求<sup>[25]</sup>。单圆盘开沟器破茬能力极强,但在沟槽成型上容易导致两侧不对称,典型产品如美国 John Deere 的 1590 型免耕谷物播种机<sup>[26]</sup>(图 2c);双圆盘开沟器由两个带倾角的圆盘组成,开沟呈标准的“V”形,回土覆盖效果好,作业阻力小且能适应较高速度播种作业,是目前应用较广泛的开沟部件<sup>[27]</sup>,典型产品如法国库恩 SITERA 330 型复合式条播机<sup>[28]</sup>(图 2d)和潍柴雷沃 2BGXF 系列复式精量条播机<sup>[29]</sup>(图 1d),广泛用于玉米、大豆等中耕作物免耕及常规精量播种作业。

### 1.2 覆土部件传统类型与典型产品

传统覆土部件按结构形式可分为链环式、弹齿式、板式、圆盘式和挤压式<sup>[30]</sup>,其中链环式和弹齿式覆土器覆土厚度较浅,多用于小麦等谷物条播作业,弹齿式覆土器如法国 KUHN 的 ESPRO 4000RC 系列播种机<sup>[31]</sup>和挪威 Kverneland 的 udrill plus 播种机<sup>[32]</sup>(图 2e),链环式覆土器如国内德邦大为的 2BD-11 型播种机<sup>[33]</sup>(图 1e);板式覆土器可通过调整刮板夹角及覆土器作业深度以适用不同垄型和覆土厚度要求<sup>[34]</sup>,如意大利 MASCHIO 的 SP SPRINT 精密播种机<sup>[35]</sup>(图 2f)、国内大华宝来的 5 行玉米精量播种机<sup>[36]</sup>(图 1f),均采用马蹄板式覆土器,并可通过配置不同类型的开沟器以用于未耕

地/平作及已耕地/垄作的大豆、玉米等中耕作物精量播种作业;圆盘式覆土器又可细分为单圆盘式和双圆盘式 2 种,均为利用覆土圆盘切削土壤实现覆土功能,并可通过调整圆盘张角、倾角、间距和入土深度满足不同垄型和覆土厚度要求。双圆盘式覆土器具有覆土量大、覆盖严密、作业阻力小的优点,性能优于单元盘覆土器,市面上更为常见,如美国 CASE IH-2000 型播种机<sup>[37]</sup>(图 2g)和国内海伦王 2BJG-3 型玉米播种机<sup>[38]</sup>(图 1g),可用于玉米、大豆等中耕作物播种作业;挤压式覆土镇压器兼具覆

土和镇压功能,作业时通过倾斜轮将种子周围土壤挤压覆盖于种子下方,这种方式下种子与土壤接触更为良好,更适合秸秆覆盖地作业,但覆土量较小<sup>[39]</sup>。通过调整两轮间距、两轮交错布置形式或选配宽型/窄型/橡胶/铸铁式覆土镇压轮,还可适应不同农艺需求,如美国 John Deere 的 1725C 型精密播种机<sup>[40]</sup>(图 2h)和国内德沃的 2BMQ 系列免耕精量播种机<sup>[41]</sup>(图 1h),主要用于玉米、大豆等常规或免耕精密播种作业,也可用于蔬菜等浅覆土作物的播种作业需求。



图 1 播种作业触土部件国内产品

Fig. 1 Chinese products of soil-contacting components for seeding operation



图 2 播种作业触土部件国外产品

Fig. 2 Foreign products of soil-contacting components for seeding operation

1.3 镇压部件传统类型与典型产品

传统镇压轮可分为圆柱型、圆锥复合型、凹凸面型、胶圈型和橡胶型<sup>[39]</sup>,其中圆柱型镇压轮与土壤接触面积大,镇压力均匀。凹面镇压轮作业后具有外实内松的作业效果,适用于棉花、豆类作物,凸面镇压轮对作物行中间镇压效果更加明显,适用于玉

米、大豆等作物。胶圈镇压轮可减少作业过程中对土壤表层扰动,同时通过胶圈的扭曲和恢复变形可达到减少土壤粘附的目的<sup>[42]</sup>。橡胶型镇压轮可分为宽型和窄型 2 种,宽型镇压轮与胶圈镇压轮类似,双盘窄型镇压轮与挤压式覆土器类似,作业时与地面接触面积较小,可以产生更大的镇压力。如美国

MONOSEM 的 MS 系列蔬菜播种机<sup>[43]</sup>, 可选配窄型凹面胶圈镇压轮(图 2i 左一)、圆柱型镇压轮(图 2i 左三)、宽型橡胶镇压轮(图 2i 右二)和凸面镇压轮(图 2i 右一)以适应不同农艺和作物的播种要求。意大利 MASCHIO 的大豆播种机采用凹面镇压轮(图 2f), 同时为减少作业时的滑移, 在轮面增设了防滑凸起条纹结构。

1.4 触土部件传统组合与典型产品

播种作业中, 种子定深着床主要依赖开沟器完成, 因此开沟器常作为固定部件。而覆土与镇压部件则通过传统类型基础上进行不同组合, 以适应多样化的农艺需求(表 1)。常见组合形式包括覆土器-镇压轮组合、覆土镇压一体结构、镇压轮-覆土器组合 3 种。在覆土器-镇压轮组合中, 无论是圆盘覆土器-镇压轮组合(图 1g、2g), 还是板式覆土器-镇压轮组合(图 1f、2f), 均为切削式覆土作业, 覆土量大, 作业过程中对土壤和种沟内种子扰动较大<sup>[44]</sup>, 因而不适用于秸秆还田作业地, 常用于传统作业模式; 覆土镇压一体结构常见形式为挤压式覆土镇压轮(图 1h、2h), 其作业方式为挤压式覆土镇压作业, 相较于覆土器-镇压轮组合形式, 对土壤扰动更小, 更适于秸秆还田地的免耕播种作业。也有采用链环式覆土器(图 1e)进行覆土作业, 并依靠覆土器自身重量同时实现镇压作业, 该种形式较适合浅播种小籽粒作物; 对于干旱或土壤墒情不足地区, 以及小麦等谷物、甜菜等小籽粒种子作物, 在播种作业中也可选用播种后先镇压后覆土形式, 即镇压轮-覆土器组合<sup>[45]</sup>, 常见有窄型镇压轮-弹齿式覆土器(图 2e)、窄型镇压轮-板式覆土器组合形式(图 2j), 这种作业方式可以确保种子与土壤紧密接触, 保墒的同时促进种子萌发<sup>[40]</sup>。

表 1 不同部件组合形式  
Tab.1 Different combinations of components

| 组合形式      | 常见类型       | 特点及适用条件                    |
|-----------|------------|----------------------------|
| 覆土器-镇压轮组合 | 双圆盘覆土器-镇压轮 | 覆土量大, 土壤扰动大,               |
|           | 单元盘覆土器-镇压轮 | 适用于小麦、玉米、大豆                |
|           | 板式覆土器-镇压轮  | 等垄作或平作常规播种<br>覆土量小, 土壤扰动小, |
| 覆土镇压一体结构  | 挤压式覆土镇压器   | 适用于玉米、大豆等常                 |
|           | 链环式覆土器     | 规或免耕播种, 水稻、小               |
|           |            | 麦、油菜等作物播种<br>可减小覆土镇压作业对    |
| 镇压轮-覆土器组合 | 镇压轮-弹齿式覆土器 | 种子扰动, 适用于干旱、               |
|           | 镇压轮-板式覆土器  | 墒情不足地区谷物、甜<br>菜等小籽粒种子作物    |

1.5 触土部件非典型产品

基于传统类型结构和功能特点, 通过对传统产

品变型设计以使其适用特殊作业环境或农艺模式需求, 并形成了系列非典型产品, 其推广范围及市场份额虽不如上述典型产品, 甚至部分产品仍处于科学验证阶段, 但却是适应市场需求的必然产物。如澳大利亚 RFM AG 公司的弹簧线圈式覆土镇压器(图 2k)<sup>[46]</sup>, 将传统挤压式覆土镇压轮改型为弹簧线圈结构, 其在干燥坚硬地表作业时可减少作业后的土壤开裂现象, 进而为种子提供更均匀镇压力, 减少土壤粘附; 美国 Schaffert 公司的 Y-Cam 系列覆土镇压组合由 Furrow V 覆土器和 CHICKEN TRACKER 镇压轮组成(图 2l)<sup>[47]</sup>, Furrow V 覆土器为单圆盘覆土结构, 作业时对 V 形种沟一侧进行挤压覆土作业, 可将种沟上层湿润的土壤覆盖在种子 上方, 利于种子发芽和出苗, CHICKEN TRACKER 镇压轮采用“Λ”型骨架结构, 在作业时镇压轮与土壤始终保持三点受力, 改善了传统镇压轮碾压式作业易产生土壤粘附的问题; 德国 AGRAVIS Technik 公司的精密播种机采用尖齿型双圆盘覆土器与凸筋型铸铁镇压轮(图 2m)<sup>[48]</sup>, 在作业过程中可将种沟侧壁被压实土壤打碎, 利于播种后作物根系生长, 并可将湿度较大土壤带入种沟, 具有镇压均匀、保水保温、减少粘土等功能; 国内农哈哈 2BYFT-4 型小麦播种机采用圆锥复合轮作为覆土器(图 1i), 通过作业过程锥形轮对种沟两侧土壤的挤压作业实现覆土功能, 同时还起到限深作用, 作业不拥堵秸秆, 配合后置镇压轮可实现覆土和镇压作业<sup>[49]</sup>; John Deere 1725C 型免耕播种机最新产品中可选配带有齿状凸起结构的挤压式覆土镇压轮(图 2n)<sup>[40]</sup>, 农哈哈垄上双行大豆播种机也配带有矩形凸起结构的挤压式覆土镇压轮(图 1j), 以适应松软地面作业<sup>[50]</sup>。

此外, 在开沟部件的非典型变型产品研究中, 为解决传统开沟器在保护性耕作或复杂地况下的局限性, 出现了一些创新变型, 如针对高速免耕播种时土壤扰动大、抛土严重的问题所研究的弯腿式开沟器<sup>[51]</sup>, 可通过偏置垂直刀柄与侧向翼板组合, 在维持种床疏松度的同时可减少表层土壤位移; 为在秸秆覆盖下实现种肥分施与保墒所研制的十字槽型开沟器<sup>[52]</sup>, 能够在切开土壤的同时向两侧延展形成微型水平腔室, 以保留秸秆覆盖并锁住土壤水分; 针对黏重土壤开沟阻力大、易壅土的问题所研究开发的曲面仿生开沟器<sup>[53]</sup>, 通过提取仿黄鳍金枪鱼下颚曲线优化开沟器触土曲面, 降低了作业时的切削阻力与牵引能耗。

市面现有触土部件产品, 是在长期农业实践中不断完善而形成的, 不同类型触土部件在不同作业场景可发挥其自身优势, 为农业生产提供多样化选

择,可满足大部分播种作业农艺的基础需求。在进行触土部件选型时,需要综合考虑作业地条件、农艺需求、能耗和作业效率等多方面因素。但对于大规模精准农业、智慧农业的发展趋势,以及差异化农艺需求,触土部件的作业性能尚有可提升空间。

## 2 国内外研究前沿技术

为适应农业发展精准化、智慧化趋势,以及不同农艺和作业条件下的差异化需求,国内外学者对播种作业触土部件展开了广泛的研究工作。学者在前期研究中已经得出,不同作业地条件下,开沟、覆土和镇压部件的结构和作业参数会影响播种作业质量,这种影响主要体现在种沟形态、土壤扰动量、覆土厚度、种子覆盖紧密度、播种粒距一致性、播种深度、土壤粘附部件、作业阻力等方面<sup>[54-57]</sup>,并会通过影响播种作业后种床温度和湿度、播种深度<sup>[58]</sup>、种子与土壤接触程度<sup>[59-60]</sup>、根系与土壤相互作用<sup>[61-63]</sup>等,影响作物出苗速度、出苗率<sup>[64-65]</sup>和产量<sup>[66-68]</sup>。为了实现高质量的开沟、覆土和镇压作业,并维持各环节作业质量,除了在开沟、覆土和镇压部件传统结构上进行结构创新和功能扩展研究,还需优化和升级部件调节机构以使其适用不同农艺要求。同时,传统被动式开沟、覆土和镇压技术已无法满足精准农业、智慧农业的发展需求,亟需通过播种深度和镇压强度监控技术的研究实现播种机主动开沟、覆土和镇压作业。国内外学者结合理论分析、试验优化设计、虚拟仿真、仿生设计、智能检控、新材料等技术方法和手段,在开沟、覆土和镇压部件作业质量提升、与土壤互作机理研究、调节机构优化和升级、智能检控等方面开展了广泛的研究工作,并取得了一定的研究成果。

### 2.1 作业质量提升

开沟、覆土和镇压部件作业质量常从开沟深度稳定性、覆土/镇压均匀性、土壤扰动、土壤粘附、滑移、作业阻力、对特殊农艺的适用性等方面评价,具体可通过播种深度/覆土厚度/镇压强度一致性、种子位移、土壤粘附率、滑移率、作业阻力等指标表征,与最终播种质量、机具能耗、部件寿命等密切相关。

#### 2.1.1 高作业均匀性

为提升触土部件的作业均匀性,现有研究多通过装置结构创新设计实现。如在开沟部件方面,通过滑刀开沟器分体式设计<sup>[69]</sup>(图 3a 左 1),依靠独立入土尖角与限深滑板,增强了开沟深度的稳定性与种沟底面的平整度,提升了排种着床的空间均匀性;通过偏置垂直刀柄与侧向翼板引导土壤流动设计的弯腿式低扰动开沟器<sup>[51]</sup>(图 3a 左 2),在减少

土壤侧抛的同时保持了种沟轮廓一致性。在覆土镇压部件方面,通过星齿球面盘式覆土装置设计<sup>[70]</sup>,依靠装置外缘的星齿结构破碎土壤,增强土壤流动性,以减少作业过程种子“架空”和“晾种”现象,提高覆土厚度一致性(图 3a 左 3);通过在镇压轮宽度方向设置 2 列周向弹性辐条设计的仿形弹性镇压轮<sup>[71]</sup>,可提高镇压轮横向仿形能力(图 3a 右 2);通过覆土镇压一体机构研究,设计的双腔结构弹性镇压轮<sup>[72]</sup>和锥形覆土镇压轮<sup>[73]</sup>,可改善传统覆土镇压部件分次作业导致的覆土和镇压均匀性欠佳问题;研制的自适应挤压式覆土镇压轮,可通过自适应弹簧实现两轮独立仿形,以适用不同坡度地表,提高镇压作业稳定性<sup>[74]</sup>(图 3a 右 1)。

#### 2.1.2 低扰动作业

为实现低扰动开沟、覆土和镇压作业,现有研究主要集中在两方面:①基于离散元仿真模拟对开沟、覆土和镇压过程种子或土壤扰动规律研究。如对不同类型(如弯腿式、圆盘式、仿生曲面式)和结构参数(如入土角、偏角、切削曲面形态)的开沟器在免耕条件下对土壤微观扰动范围、开沟阻力及种沟轮廓成型规律<sup>[51,53,75]</sup>,对双圆盘覆土器在不同工作参数(速度、入土深度)和结构参数(倾角、张角、曲率半径)下的覆土厚度和种子触土后土流运动规律研究<sup>[44,76]</sup>,不同类型(双圆盘式、八字形和挤压式)和结构参数(覆土器张角和倾角)的覆土器在不同作业速度下种子位移和覆土厚度变化规律<sup>[77]</sup>,镇压部件在不同作业参数(镇压力、土壤含水率)和结构参数(宽度、表面结构)下对土壤压实和种子位移影响规律<sup>[78-79]</sup>,不同作业速度下覆土和镇压部件作业后种子纵-横向位移变化规律<sup>[80-81]</sup>等展开了研究,实现了对微观土壤颗粒运移规律的解析,以从微观角度进一步解释部件与土壤互作机理,为结构改进提供理论支撑。②低扰动装置创新研究,也多利用仿真模拟进行结构参数优化,如在开沟部件方面,针对免耕播种地表秸秆易引发堵塞且种床破坏大的问题,设计的 T 型开沟器<sup>[82]</sup>(图 3b 左 1),通过建立土壤、根茬与柔性秸秆的 DEM 模型,解析了侧翼张角和作业速度等关键参数对种沟内秸秆位移及种沟形成的微观影响规律,优化可在切断秸秆同时保持地表原貌的低扰动结构组合。针对传统开沟器在黏重土壤中易造成种床翻转和过度扰动的问题,通过提取旗鱼头部曲线设计的低扰动开沟器<sup>[83]</sup>(图 3b 左 2),结合 EDEM 软件仿真不同切削曲面下土壤颗粒的速度与位移场,进行优化结构参数,实现低扰动开沟。

在覆土和镇压部件方面,通过前后分置圆盘式

覆土器设计<sup>[84]</sup> (图 3b 左 3), 依靠前置小圆盘实现少量潮湿土壤覆盖, 减小对种子冲击。再由后置大圆盘完成二次覆土, 以二次覆土代替传统一次覆土作业, 减少覆土过程对种子的扰动; 相似原理, 通过双层圆盘式覆土器<sup>[85]</sup> (图 3b 右 2) 和带有分流板的

双圆盘覆土器<sup>[86]</sup> (图 3b 右 1) 设计, 分别通过内外两层圆盘或在传统双圆盘覆土器前增设分流板, 采用二次覆土替代一次性覆土以减少对种子的扰动, 并辅助均匀设计方法或 EDEM 离散元仿真得到了装置的最优参数组合。

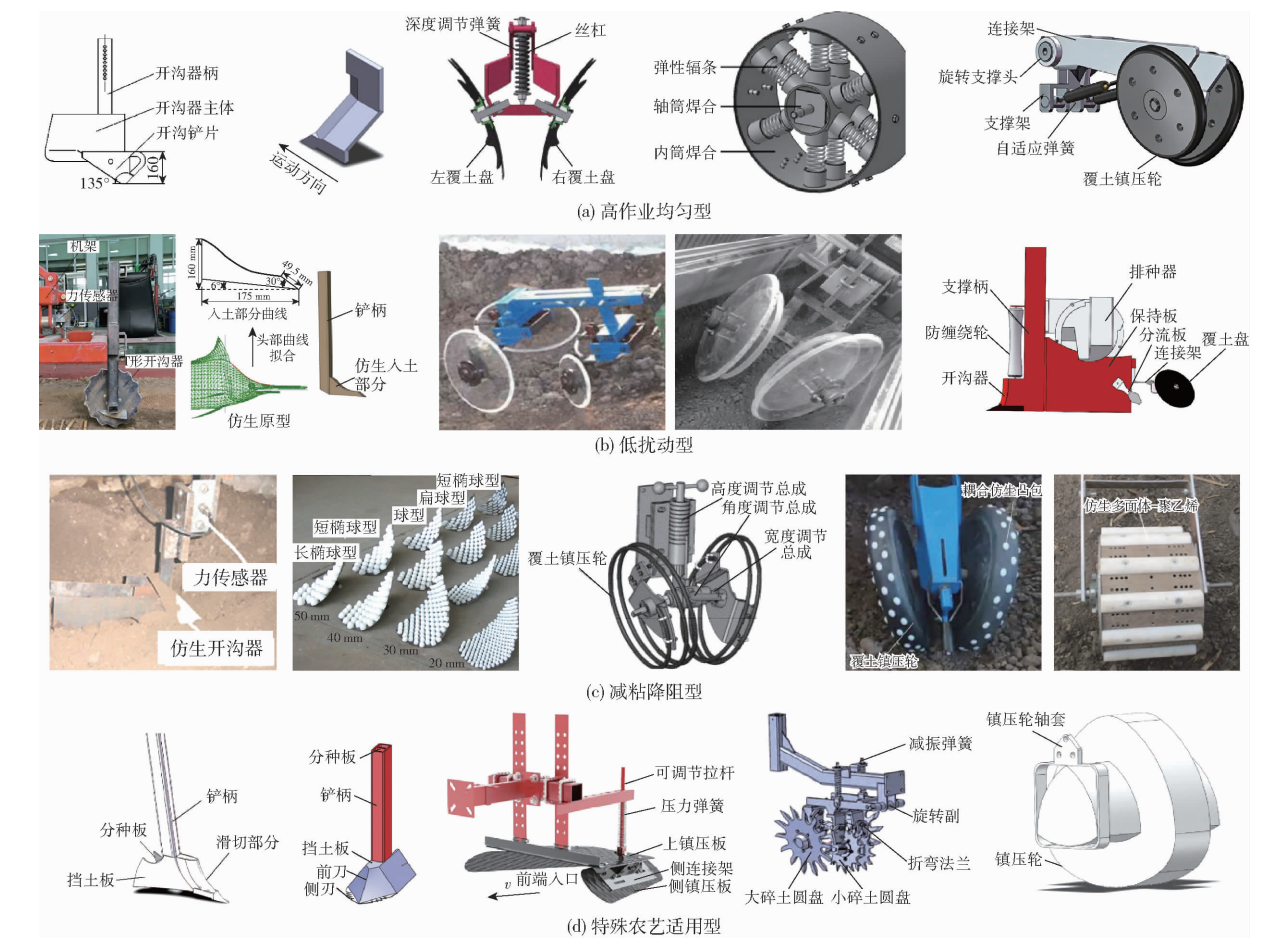


图 3 新型触土部件示例

Fig. 3 Research examples of new type soil-contacting components

2.1.3 减粘脱附作业

现有研究通过机械/振动、仿生设计、材料改性等方法可实现作业过程土壤粘附部件现象, 降低作业阻力。在机械/振动式减粘脱附研究方面, 如通过提取土壤动物体表非光滑几何特征设计仿生表面开沟器<sup>[87]</sup> (图 3c 左 1), 通过在触土曲面上构建凸包或波纹结构, 降低了湿黏土壤下的切削阻力与粘附现象。针对黏重土壤易发生壅土的问题, 也有通过在开沟器表面复合 UHMWPE 材料或聚四氟乙烯等低表面能材料<sup>[88]</sup> (图 3c 左 2), 利用材料本身的疏水性与自润滑性减小摩擦因数, 实现减粘脱附。通过在镇压部件上增设刮削板和弹簧结构, 实现刮削-振动结合的机械式减粘脱附镇压作业<sup>[89]</sup>, 也有通过弹性螺旋式覆土镇压器设计<sup>[90]</sup> (图 3c 左 3), 利用作业时部件与土壤接触面积的减少以降低作业时土壤粘附; 在仿生设计进行减粘脱附研究方面主要包

括仿生结构设计、仿生电渗减阻脱附、耦合仿生方法等。如通过仿蚯蚓体表柔性几何特征设计的橡胶凸起仿生弹性镇压轮<sup>[91-92]</sup> (图 3c 右 2)。仿灰巴蜗牛壳体、粪金龟头部<sup>[93]</sup>、甲虫背部<sup>[94]</sup>设计的仿生凸包结构镇压轮<sup>[95]</sup>, 以上属于单一仿生原型进行的仿生结构设计, 依靠仿生原型特殊结构的自清洁作用实现作业过程的减粘脱附。也有依靠仿生电渗效应实现减粘脱附的研究, 如仿生蚯蚓、日本犀牛甲幼虫<sup>[96-97]</sup>和土壤掘进动物<sup>[98]</sup>等在土壤中移动时的电渗透效应以减少农机具的土壤粘附, 该技术依靠外加场改变界面水分迁移和粘结状态<sup>[99]</sup>, 在触土部件的研究中拥有一定应用前景; 在单一仿生结构设计基础上, 也有采用多仿生原型结构或仿生结构-材料的耦合仿生方法进行的减粘脱附研究, 如基于蜗牛外凸曲面和扇贝凸包<sup>[100-101]</sup>、基于绿步甲虫背部结构和克氏原螯虾背部曲线进行的结构耦合仿

生<sup>[102]</sup>, 基于防粘材料超高分子量聚乙烯和仿生凸包结构<sup>[103]</sup>、基于臭蜚螂腹侧面仿生多面体和超高分子量聚乙烯/搪瓷涂层材料<sup>[104-106]</sup>进行的结构-材料耦合仿生(图 3c 右 1), 所设计的耦合仿生镇压轮, 也均表现出较好的减粘脱附和防滑特性; 还有利用气流辅助<sup>[107-108]</sup>、外加热场<sup>[109]</sup>等方式进行减粘脱附的研究, 但目前此类技术主要应用在深松作业场景, 且外加热场方式更适合土壤湿度较大的黏土场景, 以上对播种作业触土部件研究具有一定参考价值。

#### 2.1.4 特殊农艺适应性

为适应特殊农艺需求, 在开沟部件研究方面, 针对燕麦、小麦等作物“宽苗带”播种, 设计了带有内部导流结构的铲式宽苗带开沟器<sup>[110]</sup>(图 3d 左 1), 通过内置分流锥面改变种子下落轨迹, 使种子在宽幅种沟内横向均匀分散。针对东北黑土区大豆垄上双行免耕种植模式, 开发了锯齿波浪形开沟器<sup>[111]</sup>(图 3d 左 2), 依靠仿生波浪前缘实现了对垄上坚硬根茬的高效滑切与低阻破土, 可达到起垄地块高密度免耕播种的开沟要求。同样的种植模式需求下, 针对传统镇压装置对垄侧无法镇压、顺坡垄作土壤冲蚀严重的问题, 研究的滑动式振动镇压装置<sup>[112-113]</sup>(图 3d 左 3) 和轻质高强度全方位镇压装置<sup>[114]</sup>, 可通过其上镇压板与侧镇压板分别实现对垄上和垄侧土壤的全方位镇压, 前者采用振动电机提供激振力, 后者采用碳纤维复合材料, 分别基于作业过程和原材料控制实现对垄侧的镇压需求。通过仿东方蜈蚣刺状挖掘足的趾爪, 设计的破碎式仿生覆土圆盘<sup>[115]</sup>可兼具覆土和碎土功能(图 3d 右 2)。设计的勒洛三角形刚性镇压轮<sup>[116]</sup>, 作业时可依靠小勒洛三角形轴体与勒洛三角形镇压轮体配合, 适用于地表有残茬时播种后镇压作业, 作业后地表平整度和牵引阻力均得到改善(图 3d 右 1)。

现有研究表明, 采用机械结构创新设计、仿生设计、材料改性等方法, 可在播种作业开沟、覆土和镇压环节提升作业均匀性、降低作业过程对土壤扰动、减少土壤粘附、降低作业阻力、满足特殊农艺需求等, 对提高播种作业触土部件作业质量, 以及辅助实现高质量播种作业意义重大。但不同方法特点及其适用范围不同, 部分方法融合使用效果更佳。总的来说, 机械式结构创新设计在成本及加工难度上具有一定优势, 更易推广, 而仿生设计和材料改性方法, 在减粘脱附等方面效果显著, 但需综合考虑成本及加工难度, 可优先应用于黏重土壤作业环境。

#### 2.2 触土部件与土壤互作机理

触土部件的结构设计、优化与改进是实现部件

作业性能提升的主要手段, 现有研究已由依靠实践经验的传统粗放型研究方法转变为从部件与土壤互作机理出发的精准分析方法, 通过对部件与土壤作业过程及其互作机理研究, 可进一步明确部件作业性能的主要影响因素以及开沟深度、覆土厚度和镇压强度响应规律, 以理论分析为基础, 结合仿真分析, 进行装置结构设计和优化, 提高部件研究时效。

由开沟、覆土和镇压部件典型结构与土壤互作机理的相关研究(表 2)可以看出, 不同结构类型的开沟、覆土和镇压部件在实现功能时的力学作用本质是相同的, 即开沟部件作业时能产生克服土壤阻力切入并排开土壤形成种沟的切削挤压力, 覆土部件作业时能产生使接触区土壤流向种沟的覆土力, 镇压部件作业时能产生沿地表垂直向下的镇压力。部件的结构参数和作业参数会通过影响接触面积、接触力等形式影响实际开沟与覆土镇压作业效果。为实现最佳作业效果, 需要调控部件结构和工作参数, 使其满足对应作业条件要求。

在触土部件典型结构与土壤互作机理研究的基础上, 通过对开沟、覆土和镇压部件结构的创新研究, 使其在与土壤作用过程中, 从单一功能, 向复合功能、压力场可调、高场景适应性的结构发展。如在开沟部件方面, 针对单一开沟器在高速作业时土壤扰动剧烈、种沟坍塌的问题, 设计的开沟加挡土的播种开沟器<sup>[122]</sup>, 通过将前置切削滑刀和侧向导流挡土板结合, 将“被动破土”调整为“定深切削-防抛挡土-侧壁整形”的复合功能, 提升了部件对不同土壤墒情及高速作业环境的场景适应性; 在覆土镇压部件方面, 基于东方蜈蚣趾爪对覆土圆盘齿形进行的仿生设计, 在覆土圆盘实现覆土功能的同时, 楔形仿生齿切入土壤并随机具前进滚动过程中, 产生的剪切力和反转推力会使土发生崩裂失效, 产生破碎土壤效果<sup>[115]</sup>。通过对锥形覆土镇压轮镇压强度力学模型研究, 得出在不考虑作业速度和土壤物理特性前提下, 已知锥形轮外径和宽度, 其镇压性能主要与左右锥形轮倾角、间距和载荷相关<sup>[123]</sup>。通过对双向仿形镇压轮运动模型构建, 得出在忽略播种机低频振动、将土壤视为粘弹性体、忽略前进方向自由度的前提下, 其仿形性能与土壤参数、装置结构尺寸和弹簧刚度有关<sup>[124]</sup>。通过对覆土前压种轮作业过程受力分析和仿真模拟, 得出在高速作业条件下, 种子在种沟内弹跳影响较小的压种轮与导种管输出端间距、压种轮接触角、压种轮直径的参数组合<sup>[119]</sup>。

从现有对开沟、覆土、镇压部件与土壤互作机理研究可以得出, 虽然理论分析多以简化受力环境为前提进行, 但部件结构参数、作业参数和作业地环境

表 2 触土部件典型结构与土壤互作机理  
Tab.2 Working principle of a typical structure

| 功能       | 结构类型                    | 工作原理                                                                   | 主要影响参数                     | 作业质量关联影响                                                                                           |
|----------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 开沟       | 单圆盘式 <sup>[25]</sup>    | 利用带有偏角和倾角的单一旋转圆盘刃口切断切削土壤,将土壤挤压推向一侧形成种沟                                 | 圆盘直径、偏角、倾角、入土深度            | 偏角和倾角影响破茬能力、土壤侧向抛掷量及种沟轮廓。破茬切土能力强,但种沟易呈不对称形态,入土需较大法向压力                                              |
|          | 双圆盘式 <sup>[27]</sup>    | 两倾斜圆盘相对滚动切入土壤,依靠圆盘外侧挤压土壤向两侧运动,形成 V 形种沟                                 | 圆盘直径、张角、倾角、交错量、入土深度        | 张角和倾角影响开沟宽度和土壤侧向扰动量,交错量增加可提升切断秸秆和破茬入土能力。不易壅土挂草,适合免耕地或高茬地,种沟轮廓清晰稳定                                  |
|          | 滑刀式 <sup>[17]</sup>     | 依靠前部尖角或锐边强制楔入并推开土壤,利用侧板对土壤的法向挤压作用维持沟壁稳定,形成底面平坦的种沟                      | 入土角、侧板张角、侧板长度与高度、入土深度      | 刃角大小影响入土阻力和穿透力,侧板参数影响开沟宽度及土壤回流速度。作业阻力大,易发生壅土,适合已耕松散土壤,种床底面平整利于种子均匀着床                               |
|          | 锄铲式 <sup>[22]</sup>     | 依靠尖锐刚性铲体克服土壤阻力强制入土,被切削土壤沿铲面及导流结构向上并向两侧滑移抛掷,实现切土成沟                      | 入土角、铲面曲率、铲体宽度、入土深度         | 入土角和铲面曲率影响切削阻力与土壤侧向扰动量,铲体宽度决定种沟宽度。入土与吃土能力强,适合复杂坚硬地块                                                |
|          | 芯铧式 <sup>[20]</sup>     | 依靠尖锐铧尖和楔形体切削入土,将土壤向两侧推挤压实,形成较窄且底面呈 V 形或 U 形的种沟                         | 入土角、铧尖宽度、楔角、入土深度           | 入土角和宽度直接影响入土阻力与沟槽宽度。入土能力强,开沟窄,对表层土壤扰动小,保墒性能好。适合干旱地区及少免耕播种作业,但易挂草壅堵                                 |
| 覆土       | 双圆盘 <sup>[117]</sup>    | 对称布置双圆盘切入土壤后滚动前进,圆盘与土壤接触区形成向种沟挤压土壤的侧向力                                 | 张角和倾角、直径和入土深度、圆盘形状         | 张角和倾角过小增加作业阻力,过大覆土不严。直径和入土深度影响入土稳定性。圆盘形状影响入土方式,进而影响作业阻力。适合覆土量大、宽行距作业                               |
|          | 刮板式 <sup>[30]</sup>     | 利用板状覆土器向前运动时刮板内侧对土壤的法向压力持续向种沟挤压土壤                                      | 覆土板张角和倾角、两板间距、作业高度         | 覆土板张角和倾角、作业高度影响覆土量和工作阻力。两板间距调节可适用不同种沟形状。适合覆土量大、宽行距作业                                               |
|          | 链环式 <sup>[118]</sup>    | 土壤进入覆土环,内环面对土壤的作用合力沿指向种沟侧产生的分力使土壤回流                                    | 链环外径、链环厚度、链环宽度             | 外径增加,覆土量增加。厚度增加,有效作用力增加,覆土厚度增加。宽度减小,覆土量增加。整体覆土量小,适合全幅覆盖、窄行距作业                                      |
|          | 弹齿式 <sup>[45]</sup>     | 覆土弹齿接触地表,随机具前进推挤土壤至种沟,多配合前置种沟镇压装置使用                                    | 作业高度、形状、工作压力               | 调节弹齿弯曲方向和工作压力以适应不同作业条件并防止堵塞,通过作业高度调剂实现覆土量调节。适合全幅覆盖、窄行距作业                                           |
| 覆土<br>镇压 | 挤压式 <sup>[93,119]</sup> | 呈对称 V 形布置两窄轮,作业时利用轮缘与土壤接触面将种沟两侧土壤挤压至种沟内,形成中间松、两侧实的土壤压实性状               | 载荷、作业宽度(含轮间距)、安装角度、轮体直径    | 轮体直径小,易滑移且压实不足。轮体宽度过宽,压实不足,过窄局部压实强度高。安装角度大,轮体与土壤接触面积小,压实力增加。作业宽度应与前序环节作业后种沟形状匹配。载荷大,镇压强度大,土壤挤压变形明显 |
| 镇压       | 圆柱形 <sup>[120]</sup>    | 镇压轮垂直载荷对作业接触区产生压强                                                      | 直径、载荷、宽度                   | 接触区内压力分布均匀,直径越大、宽度越大,接触面积越大,接触区压强越小。载荷越大,接触区压强越大                                                   |
|          | 凸凹面 <sup>[121]</sup>    | 凹面镇压轮对种子上层土壤压实弱于两侧,凸面镇压轮对种子上层土壤镇压强于两侧                                  | 直径、载荷、宽度、轮缘形状              | 接触区内压力分布不同,压强随轮体直径、宽度、接触面积增加而减小,随载荷增加而增加,轮缘形状影响接触区不同位置压力分布大小                                       |
|          | 圆锥复合 <sup>[73]</sup>    | 左右对称布置的锥形轮组合,作业时接触区呈 V 形或 A 形,利用轮缘倾斜面将种沟两侧土壤进行镇压,可分别形成外松内实或外实内松的土壤压实性状 | 载荷、直径、作业宽度参数(含轮间距)、锥形倾斜面角度 | 接触区内压力分布不同,载荷越大,倾斜面角度越小,镇压强度越大。直径越大、宽度越大,接触区面积越大,镇压强度越小                                            |

条件是影响其作业性能的主要因素已得到多方研究验证。以理论研究为基础,通过对部件结构的合理设计、结构和作业参数的优化配置,对实现特定农艺要

求及作业地条件下的高效、高质量播种作业意义重大。

2.3 调节机构优化和升级

开沟、覆土和镇压部件除了要保证作业稳定性

外,在实际作业前还需要对部件作业参数进行调节,以使其可根据不同作物、不同垄宽等农艺需求实现不同种沟形状、开沟深度、覆土厚度和镇压强度调节。如开沟器需满足入土深度、作业角度等可调,覆土部件需满足覆土盘/板入土深度、张角、倾角和间距可调,镇压部件需满足镇压载荷、镇压轮配置形式等可调。

市面常见的调节机构种类比较固定,对于双圆盘开沟器常在其侧或后方配置限深轮,通过改变限深轮相对开沟器的竖直位置来控制开沟器入土深度,对于开沟圆盘夹角,多以固定夹角形式出厂,也有通过更换或调整安装组件实现夹角调节。对于双圆盘覆土器可通过螺栓与覆土圆盘轴上连接的异形板弧形卡孔、机架横板上定位孔的位置配置实现间距和张角调节<sup>[125]</sup>。对于传统镇压轮的镇压力调节和覆土器的入土深度调节,均可通过机械式深度调节结构(如 T 型调节手柄)完成,现有技术也可以通过液压或气动控制实现<sup>[40]</sup>。对于挤压式覆土镇压器,两轮间距可通过轮轴螺栓与连接板配合不同高度的套筒调节,两轮交错位置可通过调节连接板绕机架连接螺栓旋转角度调节<sup>[40]</sup>。

除了上述常见调节机构外,为了提高调节精度、简化操作,学者对触土部件调节机构也展开了广泛的研究。在开沟器调节机构研究方面,如通过多组机械式滑槽设计,结合电动推杆和伺服电机应用,可实现开沟器开沟深度调节,及两组开沟器工作状态切换<sup>[126]</sup>(图 4a 左)。通过在开沟器两侧增设可滑动的侧部副铲结构,利用手轮转动带动螺杆转动,进而使得侧部副铲在铲板内部伸出或缩回,实现开沟宽度的调整<sup>[127]</sup>(图 4a 中)。通过在开沟圆盘轴承上设置异形螺纹轴,并将该异形螺纹轴固定在聚点位置调节板上,利用异形螺纹轴之间的螺栓实现圆盘夹角调节,利用聚点位置调节板和开沟器固定柄之间的螺栓实现聚点位置调节<sup>[128]</sup>(图 4a 右)。以上关于开沟器作业前调节机构的相关研究多停留于实验室研究阶段,其实际作业效果尚需进一步确认。

在覆土部件调节机构研究方面,现有研究多通过机械结构创新设计实现,如联动-差动可调式覆土器<sup>[129]</sup>(图 4b 左),可通过调整双向螺旋杆的连接杆带动摇臂实现覆土盘张角调整,通过旋转摆臂带动连杆同步旋转实现覆土盘张角的差动调整,以使其适用于坡地的均匀覆土作业;也可通过两个轴的独立旋转实现双圆盘覆土器张角和倾角的调整,如分别通过锁定螺母和锁紧螺母的松紧操作,对垂直角度调整轴和圆盘轴进行旋转,实现倾角和张角的调整<sup>[130]</sup>(图 4b 中)。相似原理,还有具有牙嵌结构的

可调式双圆盘覆土器<sup>[131]</sup>和圆盘外连接可调式覆土器<sup>[132]</sup>,该种调整机构操作简单,但调节精度高度依赖旋转轴的旋转角度精度;双圆盘覆土器张角和倾角定量调整机构<sup>[133-134]</sup>(图 4b 右),可通过调整螺栓使调整轴在“∞”字形调整孔位置发生变化,实现张角和倾角的定量调整,该方法调节精度高、操作简便,但调整范围仅限于既定的两组张角和倾角组合,且加工精度要求高,使用受限。

镇压部件调整机构的研究多集中在载荷调节方面,如设计的可变压力苗带镇压器<sup>[135]</sup>(图 4c 左),可通过压力传感器和数字显示器检测作业过程的镇压力,并通过液压系统对镇压力进行调整;通过在镇压轮与支架间设置 2 组平衡弹簧,通过调整支架与前梁间弹簧的伸缩量,以实现镇压强度调节<sup>[136]</sup>(图 4c 中);通过调整镇压部件的调节手柄控制丝杠,带动调节螺母使拉力弹簧拉伸量发生改变,以实现镇压力的调整(图 4c 右),相较于市面上的 T 型手柄式镇压力调节机构,调节精度更高<sup>[137]</sup>。

可以看出,当前在开沟器、覆土和镇压部件调节机构的研究上呈现多维创新趋势,主要围绕单个参数的独立调控、操作便捷性和调节精度展开。从机械式被动调控向机电一体化主动式调控仍是该领域发展趋势,在多参数协同调节、加工精度与成本平衡等关键问题仍需解决。

## 2.4 作业状态智能监控技术

触土部件作业稳定性是衡量其作业质量的关键指标,但实际作业过程中,受土壤环境和地形变化等影响,其作业效果往往是动态变化的<sup>[138-139]</sup>。为提高触土部件作业稳定性,对其作业质量的实时监测和控制是该领域研究另一热点。

### 2.4.1 作业状态实时监测

目前对开沟部件的监测主要在开沟深度与作业阻力两方面。深度监测多通过限深轮摆臂角度传感器解算入土深度<sup>[140]</sup>(图 5 左),或采用多传感器(激光、超声波、角度)数据融合技术以克服地形起伏带来的检测误差<sup>[141]</sup>(图 5 中)。阻力监测则多利用集成在铲尖或刀柄处的应变式传感器获取切削力,其受力状况不仅能反映机具负荷,还可作为反馈信号用于调节开沟深度,最终实现闭环控制<sup>[142]</sup>(图 5 右)。

镇压部件作为播种作业最后环节,现有研究常通过监控镇压环节作业质量实现对覆土和镇压作业质量或播种深度的监测。土壤紧实度和镇压力作为相对容易测量的参数<sup>[143]</sup>,常用于直接或间接评价镇压作业质量,具体分为贯入式监测和地表接触式监测 2 种形式。

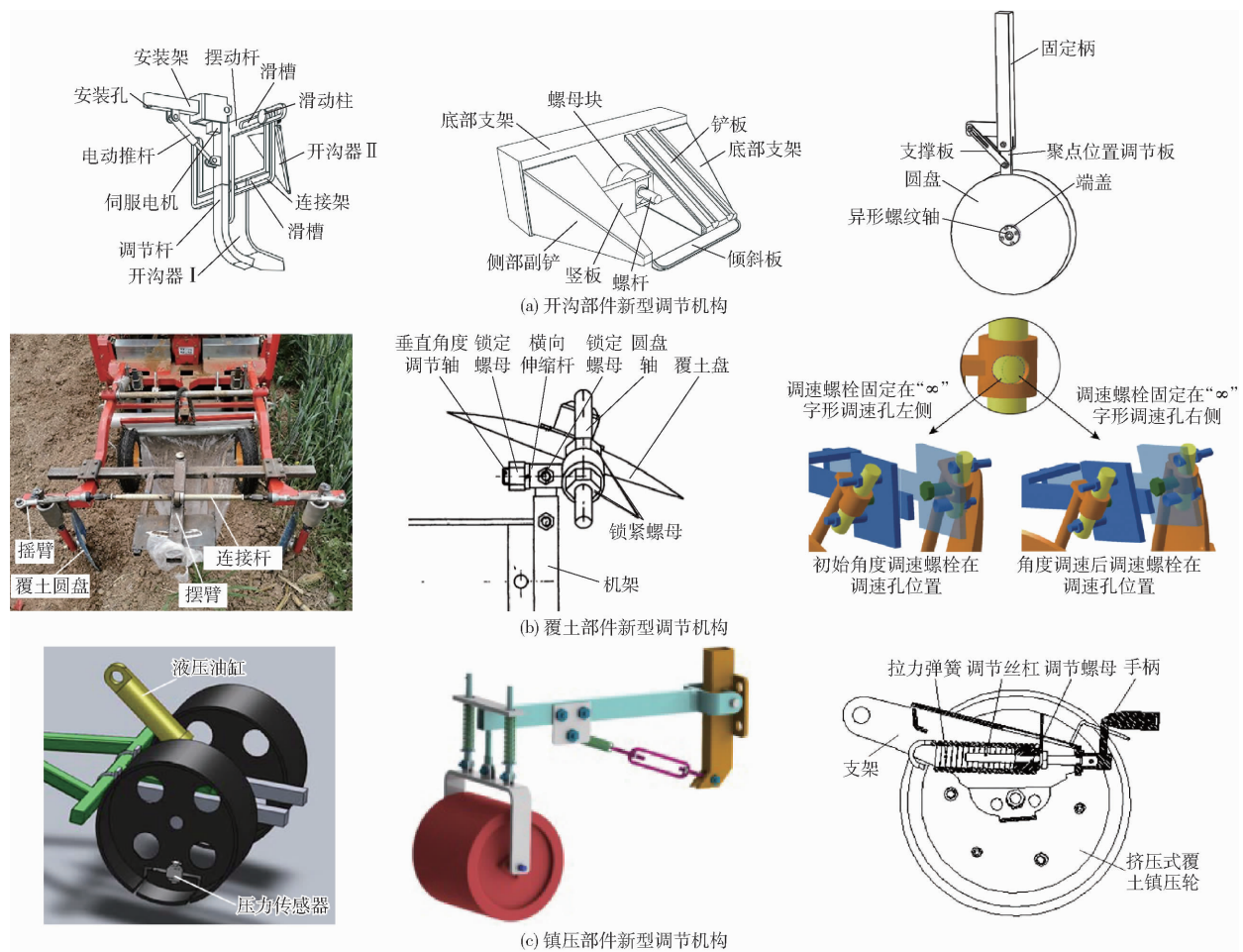


图 4 调节机构研究示例

Fig. 4 Examples of adjusting mechanism

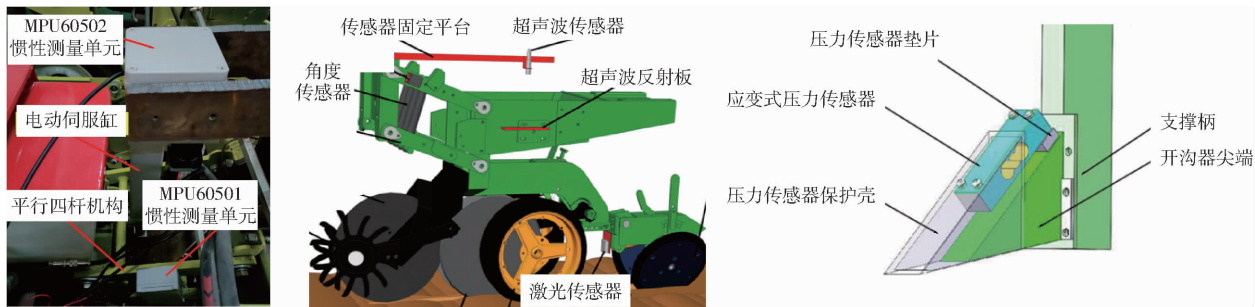


图 5 开沟质量监测研究示例

Fig. 5 Examples on furrow quality monitoring

贯入式监测方面,为实现镇压力监测,有研究通过液压实现探针恒速压入土壤,设计了多探针微贯入的土壤镇压力测量系统(图 6a 左)<sup>[144]</sup>,也有通过嵌入式压力传感器测量土壤阻力,实现田间车载行进式土壤镇压力测量<sup>[145]</sup>。此外,有学者对土壤含水率和镇压力对探针贯入阻力的关系展开研究,为通过探针贯入阻力和土壤含水率测量实现土壤镇压力测量提供了可能<sup>[146]</sup>;土壤紧实度、容重监测方面,多结合多传感器融合构建预测模型实现,如通过将称重传感器、介电传感器和声波传感器集成在不锈钢锥形探头上设计的多传感器探头,可通过融合

传感器测量的数据实现土壤紧实度的预测(图 6a 中)<sup>[147]</sup>。也有通过将单探头水平贯入仪、介电型土壤含水率传感器和  $\gamma$  射线传感器相结合,利用三融合传感器测量贯入阻力、含水率和黏土含量以实现土壤容重预测<sup>[148]</sup>。通过步进电机将探针以恒定速度垂直压入土壤以减少手动操作误差及液压冲击影响,通过压力传感器获取实时贯入力,实现播种行土壤紧实度测量<sup>[149]</sup>(图 6a 右)。也有通过应变计测量入土部件的弹性变形量以反映土壤压实程度<sup>[150-151]</sup>。

在地表接触式监测方面,如通过建立镇压轮轮

辐伸缩量与土壤紧实度之间的数学模型,利用直线位移传感器测量镇压轮轮辐伸缩量,实现播种行表层土壤紧实度的实时测量<sup>[152]</sup>(图 6b 左);通过构建

镇压轮偏心量与镇压力之间的数学模型,利用微型自复位电子尺采集镇压轮的垂直偏心量,实现镇压轮镇压力的实时测量<sup>[153]</sup>(图 6b 右)。

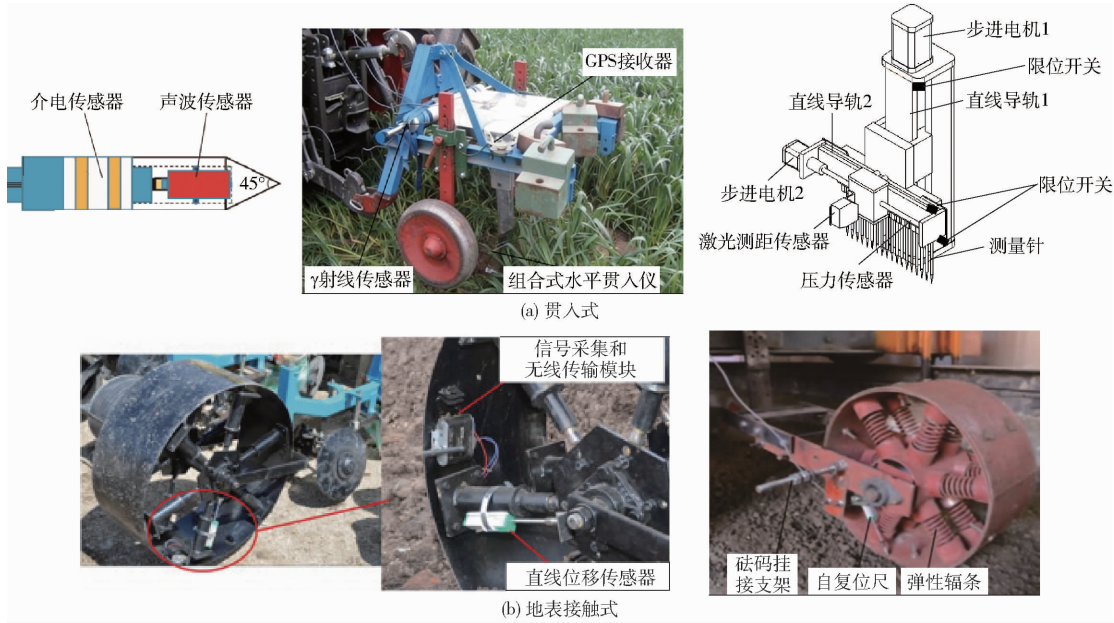


图 6 镇压质量监测研究示例  
Fig. 6 Examples of soil-compacting quality monitoring research

综上,开沟深度与作业阻力,以及镇压环节镇压力等的地表接触式监测,多依赖机具自身机械结构(如限深摆臂角度、刀柄应变、轮辐变形等)进行间接测量,不破坏已播种床结构,适合播种机田间实时动态监测。镇压环节的贯入式监测通过直接测量镇压力、贯入力或间接测量土壤容重指标实现,存在对苗带土壤的破坏,不适宜播种机跟随作业。面对复杂多变的田间地形与土壤环境,单一传感器的监测精度易受限,随着多传感器融合技术和智能控制技术的不断发展,与作业状态主动控制技术的关联研究对实现主动镇压作业具有重要作用。

2.4.2 作业状态主动控制

触土部件作业稳定性及不同作业条件适应性的提高,离不开作业状态控制系统的研究。传统机械仿形机构的被动式作业状态控制技术正逐渐被高时效、高精度的主动控制技术所取代。现有研究多集中在对开沟和镇压部件作业过程控制,具体可分为开环控制和闭环控制两方面。

在开沟器作业过程开环控制研究方面,如通过建立土壤容重、含水率与开沟器最佳入土下压力间的数学关系模型,利用车载终端预先计算维持目标开沟深度所需的力,并驱动执行机构进行前馈补偿开环调节开沟器入土深度<sup>[154]</sup>(图 7b 左);镇压部件方面,如通过调控 MR 阻尼器的激励电流,以使安装在免耕播种单体轮柄处的应变仪所测镇压力满足目标值<sup>[155]</sup>(图 7a 左);将气动压力控制装置应用于免

耕播种机镇压轮上,通过空气弹簧的充放气实现镇压力在起伏地表的稳定控制<sup>[156]</sup>(图 7a 中);采用结构光立体摄像头对播种机开沟深度实时检测,当检测到开沟深度变化时,通过 CAN 信号将调整信息传输至挤压式覆土镇压器的两个电机,通过控制两个电机分别实现覆土量和镇压力调节<sup>[157]</sup>(图 7a 右)。

在开沟作业闭环控制研究方面,如将应变式压力传感器集成在开沟器铲尖,实时检测土壤切削阻力,结合步进电机及齿轮齿条机构,实现播深闭环调控<sup>[142]</sup>。通过激光测距传感器和阵列式 LiDAR 相结合,实时获取地形轮廓与实际开沟深度的偏差,通过 PID 控制器在线整定参数,驱动限深轮高度调节机构,实现复杂地形下开沟深度的闭环自动控制<sup>[158]</sup>;镇压部件方面,如通过拉力传感器和角度传感器检测镇压力,结合 PID 控制算法调节液压缸伸缩实现镇压力调控(图 7b 左)<sup>[159]</sup>。相似原理,也有通过调节电液控制系统<sup>[160]</sup>、电动推杆伸缩量<sup>[161]</sup>、四连杆仿形机构上的液压力<sup>[162]</sup>等实现镇压力调控;将传统镇压轮与播种单体连接方式设计为橡胶扭簧式,并建立橡胶扭簧扭矩与镇压力关系方程,通过姿态传感器监测扭簧旋转角度,Arduino 控制器控制电动推杆直至橡胶扭簧扭转角度满足镇压力目标值<sup>[163]</sup>(图 7b 中);将传统镇压装置的压缩弹簧更换为直线电机,通过 PID 算法和 STM32 单片机主动控制直线电机实现镇压轮下压力实时调控<sup>[164]</sup>(图 7b 右);通过播深检测模块获取实时播深并作为反馈输

人,根据专家模糊规则和 Mamdani 推理法对 PID 参数进行在线整定,控制驱动器调整播前镇压轮

位置,实现对播深实时及间接镇压强度闭环控制<sup>[165]</sup>。



图 7 作业状态主动控制研究示例

Fig. 7 Examples on active control of operating state

在触土部件作业状态主动控制技术研究方面,无论是开环控制还是闭环控制,其控制系统均由感知层、控制层和执行层组成(图 8),系统通过感知层利用传感器实现作业状态的实时监测,经由控制层利用控制算法实现测量值与目标值对比,并生成控

制指令,控制指令经由通讯总线传输至执行层指定控制器,并驱动执行机构实现作业状态调节。开环控制与闭环控制的差别在于,前者控制指令是基于预设程序或前馈模型产生的,后者控制指令在与目标值进行比较后会进行持续纠偏。

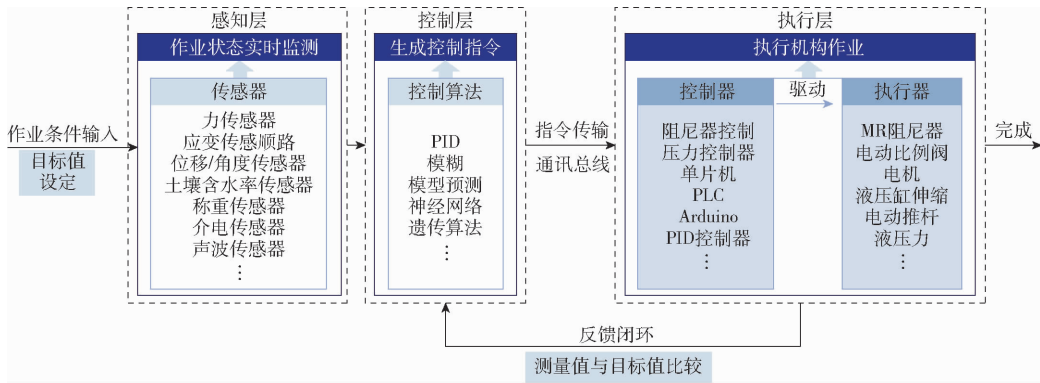


图 8 典型控制系统架构图

Fig. 8 Typical control system architecture diagram

从现有触土部件作业状态主动控制技术研究的相关研究可以看出,研究主要聚焦在动态作业环境下的覆土镇压及播种深度稳定性提升,并以非破坏性检测手段、多学科技术融合方法为为主。开环控制相较于闭环控制在结构和响应速度上具有一定优势,但存在抗干扰能力及控制精度方面的问题,闭环控制系统研究仍为目前主流趋势。

综上所述,国内外对播种作业触土部件的研究

主要包括 4 方面:①基于作业质量提升的部件结构研究,通过融合机械结构设计、仿生设计、材料改性等方法,以实现提升作业均匀性、降低土壤扰动、减少土壤粘附、改善部件滑移、减小作业阻力以及增加部件对特殊农艺适用性等。②触土部件作业机理研究,通过对作业过程土壤受力、土壤运移规律、理论模型等研究,明确影响部件作业性能的主要因素,以及开沟深度、覆土厚度和镇压强度响应规律,为提高

部件结构和作业参数优化配置研究提供理论基础。

③调节机构研究,通过机械式被动调控或机电一体化主动式调控机构研究,作业前可依据不同垄宽、种沟形状与深度、覆土厚度和镇压强度农艺需求进行调节,以提高开沟、覆土和镇压部件作业适用范围。

④作业状态主动控制技术研究,通过开沟深度、播种深度和镇压力或镇压强度实时检测,结合主动控制系统研究,以提高部件在复杂环境条件下的作业稳定性。上述研究内容所涉及的研究方法(表 3)多

元,主要包括理论分析指导结构设计、仿生方法、仿真模拟、材料改性和主动控制技术融合,由不同方法特征可以看出,理论分析与仿真模拟在时效性和成本控制方面具有显著优势,仿生方法和材料改性技术主要聚焦在部件性能突破,通过融合主动控制技术,可使部件作业性能进一步改善。整体而言,不同方法的选择,需要权衡利弊,多方法融合应用以打破单一方法局限,仍是未来研究重要着力点。

表 3 主要研究方法

Tab.3 Main research methods

| 方法             | 技术原理                                  | 优势                     | 局限                 |
|----------------|---------------------------------------|------------------------|--------------------|
| 理论分析指导<br>结构设计 | 土壤力学、运动学与动力学                          | 可从本质出发解决问题,提高部件研究时效    | 难度高、需简化工况后进行,可行性受限 |
| 仿生方法           | 形态仿生、功能仿生、运动仿生、界面仿生、信息仿生等             | 减粘降阻效果显著、使用寿命提升、环境适用性强 | 设计复杂、制造难度高、成本高     |
| 仿真模拟           | 有限元法(FEM)、离散元法(DEM)或计算流体动力学(CFD)等数值计算 | 成本低,时效高                | 不同工况模拟精度差异大        |
| 材料改性           | 表面工程(如涂层、热处理、激光熔覆)或复合材料实现改变物理化学性质     | 轻质环保、工艺兼容性强、适用性广       | 成本高、加工限制           |
| 主动控制技术<br>融合   | 基于实时反馈数据,通过控制算法(如PID、模糊控制)实现主动控制      | 作业质量提升效果显著             | 系统复杂、成本高           |

3 现存问题分析与展望

3.1 播种作业开沟、覆土和镇压技术现存问题

在播种作业中,开沟、覆土和镇压部件作业效果直接影响播种作业后种子分布均匀性,对播种深度影响尤为显著<sup>[166-167]</sup>。由于作业环境复杂多变,且农艺要求多样,仅依靠传统开沟、覆土和镇压部件结构形式已无法满足实际播种作业需求。鉴于播种机作业后播种深度受开沟、覆土和镇压作业的联动影响,开沟部件具备作业深度调节、覆土部件具备有效的覆土量调节以及镇压部件具备有效的镇压力调节功能已成为现有播种机对其基本要求<sup>[168-169]</sup>。根据目前研究现状,现存问题主要集中在以下方面:

(1)产业化产品结构形式单一,不同环境适应能力有限。市面上现有开沟、覆土镇压部件,多为一种类型产品应用于多种作业场景,部件对不同作业环境下的交互操作性不强,缺乏模块化设计与可调节结构支撑。

(2)研究成果多样,后续产业化跟进不足。现有研究多为针对某一特定农艺模式开展,对不同作业环境的适应性不足,装置研究多停留在研究层面,导致后续深入研究、数据积累和产业化应用受限。

(3)高速作业适用性有待提高。随着高速精密播种技术的进一步推进,开沟、覆土和镇压部件能否

满足高速作业工况下的性能需求,直接关系到播种机的高速作业质量,触土部件在高速作业下的动力学稳定性、仿形响应速度与作业环境的适应性仍待解决。

(4)智能调控环节薄弱。开沟、覆土和镇压部件作业性能智能调控是提高播种作业质量的有效途径,现有相关研究以开环控制相对成熟,高效精准的闭环控制,尤其在目标参数非破坏性原位感知方法、算法精度与实时性、执行机构响应速度与精度、作业效果反馈时效等与闭环控制质量密切相关的研究内容,仍需进一步攻关。

(5)材料性能和加工工艺有待提升。国内企业对开沟、覆土和镇压部件的加工,从材料和工艺上多仿照进口产品,缺乏核心技术竞争力。此外,部件在实际作业过程中常存在寿命短、强度不足和自重过大等问题,难以适应复杂土壤工况下的长期负荷作业。

3.2 播种作业开沟、覆土和镇压技术未来发展展望

针对上述问题,为满足精准农业和智慧农业发展需求,开沟、覆土和镇压部件也正向整体化、精密化、智能化方向发展。为了使开沟、覆土和镇压部件能有效可靠地服务于排种/肥等前序作业环节,针对触土部件的研究不断深入,且随着部件与土壤作业机理分析、结构优化设计、新型功能性材料选择、智

能控制等研究的开展,为多功能、高效、低成本的开沟、覆土和镇压技术的实现提供了有效的解决方案。鉴于我国不同地区、不同作物、不同农艺等条件下对触土部件的多样化需求,使得部件从研发到推广难上加难。为适应我国机械化播种作业的发展需求,对我国开沟、覆土和镇压技术提出以下发展方向:

(1)面向多农艺模式的触土部件模块化与可调节技术攻关。针对我国作物播种作业中种植农艺存在的区域化差异,深入解析不同农艺模式下触土部件与土壤、作物交互作用机理,开展触土部件模块化设计、作业参数可调节机构、快速换型结构等研究,实现一种部件可适用于多种农艺模式,增强产品迭代创新驱动动力。

(2)高效低耗触土部件的仿生减阻与结构轻量化技术研发与产品落地。充分利用机械结构创新设计、新材料、仿生学、信息技术、3D 打印技术等手段,开展多学科交叉研究,聚焦触土部件作业过程低土壤扰动、减粘脱附、土块破碎、少滑移、多农艺适用性等技术攻关,加强产学研深度合作机制,通过中试基地建设,加强实现应用过程数据积累,增强成果转化、推广和示范能力。

(3)适配高速作业场景的动力学匹配与速度自适应控制技术探索。对部件与播种单体关键部件(排种器、限深机构、仿形机构)的运动学和动力学

展开研究,重点突破高速工况下触土部件与土壤动态互作机理、触土部件结构-作业速度匹配关系、速度自适应调控策略与故障监测预警等技术,提高部件高速作业稳定性,及其在播种单体上的适应性。

(4)主动开沟、覆土和镇压智能化联动的闭环调控与感知决策技术攻克。在现有开沟、覆土和镇压部件结构研究的基础上,充分融合电气控制、计算机及传感器等技术,开展对开沟、覆土和镇压环节智能调控方法及系统研究,重点突破非破坏性原位感知方法、多参数融合决策算法、电液/电动执行机构精准响应、作业效果实时反馈与闭环控制等技术,并充分考虑开沟、覆土和镇压环节对播种深度和土壤压实强度的联动影响,以适应高速机械化播种作业的发展需求,推动农业机械化播种装备的智能化、智慧化进程。

(5)先进耐磨材料制备与高精度成形工艺技术提升。通过对开沟、覆土和镇压部件高性能、轻量化材料研究,重点开展耐磨合金、梯度复合材料、表面强化涂层等先进材料制备技术,以及精密铸造、粉末冶金、热成型等高精度成形工艺研究,提升部件的材料强度与使用寿命,降低生产成本,在确保作业质量的前提下,提高其在复杂作业环境的适应性,促进产品的产业化推广。

参 考 文 献

[1] 廖宜涛,谭钰,廖庆喜,等. 主要粮油作物精量播种技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报,2025,56(9):1-19.  
LIAO Yitao, TAN Yu, LIAO Qingxi, et al. Research progress and development trends in precision seeding technologies for major grain and oil crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 1-19. (in Chinese)

[2] 汪昕,张凯良,张东兴,等. 主要粮油作物无人化精密播种技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报,2025,56(9):20-41.  
WANG Xin, ZHANG Kailiang, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on unmanned precision seeding technology and equipment for major grain and oil crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 20-41. (in Chinese)

[3] ZHAN Z, YAOMING L, CHEN J, et al. Numerical analysis and laboratory testing of seed spacing uniformity performance for vacuum-cylinder precision seeder[J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(4): 344-351.

[4] NIELSEN S K, MUNKHOLM L J, LAMANDÉ M, et al. Seed drill depth control system for precision seeding[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 144: 174-180.

[5] BRUNE P F, RYAN B J, TECHNOW F, et al. Relating planter downforce and soil strength[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 184: 243-252.

[6] GAN Y, STOBBE E H, MOES J. Relative date of wheat seedling emergence and its impact on grain yield[J]. Crop Science, 1992, 32(5): 1275-1281.

[7] 李玉环,孟鹏祥,耿端阳,等. 玉米播种深度智能调控系统研究[J]. 农业机械学报,2016,47(增刊1):62-68, 42.  
LI Yuhuan, MENG Pengxiang, GENG Duanyang, et al. Intelligent system for adjusting and controlling corn seeding depth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp. 1): 62-68, 42. (in Chinese)

[8] 于希臣,孙占祥,郑家明,等. 不同镇压方式对玉米生长发育及产量的影响[J]. 杂粮作物,2002,22(5):271-273.  
YU Xichen, SUN Zhanxiang, ZHEN Jiaming, et al. Effects of different methods of compaction on corn's growth and production [J]. Rain Fed Crops, 2002, 22(5): 271-273. (in Chinese)

[9] 张鹏飞,李景宇,张思豪,等. 精密播种机种子运动调控方法研究进展[J]. 中国农机化学报,2023,44(4):122-127, 144.  
ZHANG Pengfei, LI Jingyu, ZHANG Sihao, et al. Research progress on seed motion control method of precision planter[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(4): 122-127, 144. (in Chinese)

- [10] 王庆杰,曹鑫鹏,王超,等.东北黑土地玉米免少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 Qingjie, CAO Xinpeng, WANG Chao, et al. 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)
- [11] PANNING J W, KOCHER M F, SMITH J A, et al. Laboratory and field testing of seed spacing uniformity for sugarbeet planters[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2000, 16(1): 7-13.
- [12] ALTİKAT S, CELİK A. The effects of tillage and intra-row compaction on seedbed properties and red lentil emergence under dry land conditions[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 114(1): 1-8.
- [13] 李宝筏.农业机械学[M].北京:中国农业出版社,2003.
- [14] 贾洪雷,陈忠亮,马成林,等.北方旱作农业区耕作体系关键技术[J].农业机械学报,2008,39(11):59-63.  
JIA Honglei, CHEN Zhongliang, MA Chenglin, et al. Key technologies for the tillage system in area of dry farming of northern China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(11): 59-63. (in Chinese)
- [15] 王福兰.行间播种机多功能行走轮设计与试验[D].长春:吉林大学,2012.  
WANG Fulan. Design and experiment of multi-functional walking wheel for inter-row seeding-machine[D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [16] TASER O, KARA O. Silage maize (*Zea mays* L.) seedlings emergence as influenced by soil compaction treatments and contact pressures[J]. Plant Soil and Environment, 2005, 51(7): 289.
- [17] 顾耀权,贾洪雷,郭慧,等.滑刀式开沟器设计与试验[J].农业机械学报,2013,44(2):38-42.  
GU Yaoquan, JIA Honglei, GUO Hui, et al. Design and experiment of sliding knife furrow opener[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 38-42. (in Chinese)
- [18] 东方红 2BMF6/12、7/14 [EB/OL]. [2026-03-01]. [http://www.yituo.com.cn/cpzx/jjcp/bzj/201611/t20161129\\_114902.html](http://www.yituo.com.cn/cpzx/jjcp/bzj/201611/t20161129_114902.html).
- [19] John Deere P660 precision air hoe drill [EB/OL]. [2026-03-01]. <https://agandturf.unitedequip.com/new-equipment/farmers/seeding/p660-precision-air-hoe-drill/>.
- [20] 郝建军,屈鹏程,刘天龙,等.黏重土壤芯铧式播种开沟器优化设计与试验[J].农业机械学报,2026,57(1):180-190, 226.  
HAO Jianjun, QU Pengcheng, LIU Tianlong, et al. Optimized design and testing of core-share seed drill furrow opener suitable for heavy clay[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(1): 180-190, 226. (in Chinese)
- [21] 海农 2BYF-3 玉米播种机 [EB/OL]. [2026-03-01]. <https://www.nongjige.com/showinfo-248-2522-0.html>.
- [22] 张长青.播种机开沟器的类型与技术特点分析[J].当代农机,2014(4):65-66.
- [23] Bourgault 3320 型免耕条播机 [EB/OL]. [2026-03-01]. <https://www.bourgault.com/en-us/products/past-performers/seed-drills/3320-phd>.
- [24] 鑫大华 2BYZF-4 指夹式玉米精量播种机 [EB/OL]. [2026-03-01]. [https://www.nongjitong.com/product/xindahua\\_2byzf-4\\_seeder.html](https://www.nongjitong.com/product/xindahua_2byzf-4_seeder.html).
- [25] 臧英,罗锋,黄子顺,等.组合式稻麦兼用播种开沟器设计与试验[J].农业工程学报,2025,41(19):42-53.  
ZANG Ying, LUO Feng, HUANG Zishun, et al. Design and experiment of combined rice-wheat dual-purpose sowing furrowopener[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(19): 42-53. (in Chinese)
- [26] John Deere 1590 型免耕谷物播种机 [EB/OL]. [2026-03-01]. <https://www.deere.com/en/seeding-equipment/1590-no-till-drill/>.
- [27] 李德言.播种机双圆盘开沟器加工工艺优化[J].农业工程,2021,11(4):25-28.  
LI Deyan. Processing technology optimization of double discfurrower for seeder[J]. Agricultural Engineering, 2021, 11(4): 25-28. (in Chinese)
- [28] 库恩 SITERA 330 复合式条播机 [EB/OL]. [2026-03-01]. <https://www.nongjitong.com/company/kuhn/13373681.html>.
- [29] 潍柴雷沃 2BGXF 系列复式精量条播机 [EB/OL]. [2026-03-01]. <https://www.lovol.com/agricultural/pro-detail-160.htm>.
- [30] 李丽艳,王景立.精密播种机覆土器研究现状分析[J].农业与技术,2016,36(13):42-44, 83.
- [31] 少耕/免耕联合征地播种机 ESPRO [EB/OL]. [2026-03-01]. [https://www.nongjitong.com/product/mucan\\_espro\\_seeder.html](https://www.nongjitong.com/product/mucan_espro_seeder.html).
- [32] Kverneland. u-drill plus 大型组合式条播机 [EB/OL]. [2026-03-01]. [https://www.kverneland.cn/node\\_81064/node\\_225381/u-drill-plus](https://www.kverneland.cn/node_81064/node_225381/u-drill-plus).
- [33] 德邦大为 (DEBONT) 2BD-11 多功能覆土直播机[J].农机市场,2013(11):61.
- [34] 程生军,刘欣,王彦刚,等.玉米机械化播种技术及机具研究[J].农业科技与装备,2015(4):63-64.  
CHENG Shengjun, LIU Xin, WANG Yangang, et al. Research on the technique and machinery of maize mechanization sowing [J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2015(4): 63-64. (in Chinese)
- [35] MASCHIO. Precision planters - SP [EB/OL]. [2026-03-01]. <https://www.maschiogaspardo.com/en/web/international/>

spl.

- [36] 大华宝来. 5 行玉米精量播种机[EB/OL]. [2026-03-01]. [https://www.dhbl.net/product\\_details/90.html](https://www.dhbl.net/product_details/90.html).
- [37] CASE IH. 2000 series early riser planters[EB/OL]. [2026-03-01]. <https://caseih.cc.cnh.com/emea/en-africa/products/planting-and-seeding/2000-series-early-riser%C2%AE-planters>.
- [38] 农机通. 海伦王 2BJG-3 玉米播种机[EB/OL]. [2026-03-01]. <https://www.nongjitong.com/product/4433.html>.
- [39] 郭慧. 玉米播种质量评价与覆土镇压装置研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.  
GUO Hui. Study on maize sowing quality evaluation and soil covering-compacting device[D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)
- [40] John Deere. 1725C Planter[EB/OL]. [2026-03-01]. <https://www.deere.com/en/planting-equipment/1725c-planter/>.
- [41] 德沃科技. 2BMQ 系列 4 行牵引式高性能免耕精量播种机(2BMQ 系列)[EB/OL]. [2026-03-01]. [http://1330984.sinofarm.net/product\\_detail\\_493252.html](http://1330984.sinofarm.net/product_detail_493252.html).
- [42] 毛鹏军. 耕播机械有问必答[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 109.
- [43] 臭小农机. MONOSEM 满胜蔬菜播种机[EB/OL]. [2026-03-01]. [https://mp.weixin.qq.com/s?src=11&timestamp=1749805473&ver=6049&signature=qcOebFBv\\*HE4iePSuXOLGw40zPIHVFDt6svngzhV4cQfKi6PM\\*XPJFDKfVtX5Asml80sKouAuUbJwGHkAYHGjN-SkkYBNakfZ45mEA7s6YSTgec3vMnTKdh-tU9H-ku&new=1](https://mp.weixin.qq.com/s?src=11&timestamp=1749805473&ver=6049&signature=qcOebFBv*HE4iePSuXOLGw40zPIHVFDt6svngzhV4cQfKi6PM*XPJFDKfVtX5Asml80sKouAuUbJwGHkAYHGjN-SkkYBNakfZ45mEA7s6YSTgec3vMnTKdh-tU9H-ku&new=1).
- [44] 宋鲁鹏, 杨先海, 李倩. 基于 SPH 无网格法的精密播种圆盘覆土器仿真研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(2): 29-32, 42.  
SONG Lupeng, YANG Xianhai, LI Qian. Simulation study on precision seeding disc covering device based on SPH's mesh less method[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(2): 29-32, 42. (in Chinese)
- [45] 何勋, 张景风, 张润, 等. 小麦宽苗带种沟镇压播种装置研制[J]. 农业工程学报, 2023, 39(18): 18-29.  
HE Xun, ZHANG Jingfeng, ZHANG Run, et al. Development of the seed-ditch compaction device for wide-boundary sowing wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(18): 18-29. (in Chinese)
- [46] RFM A G. Spring coil press wheel[EB/OL]. [2026-03-01]. <https://www.farm-equipment.com/articles/13941-rfm-and-poly-tech-unveil-the-new-spring-coil-press-wheel>.
- [47] Schaffert. Furrow V closer and chicken tracker[EB/OL]. [2026-03-01]. <https://www.schaffert.com/products/furrow-v-closer/furrow-v-closer.html>.
- [48] AGRAVIS Technik. Precision Planting[EB/OL]. [2026-03-01]. <https://www.agravis-robotik.de/precision-planting/>.
- [49] 农哈哈 2BYFT-4 玉米免(少)耕施肥播种机[EB/OL]. [2026-03-01]. <https://www.nonghaha.com/productinfo/1912741.html>.
- [50] 垄上双行大豆播种机[EB/OL]. [2026-03-01]. <https://www.nonghaha.com/productinfo/1912746.html>.
- [51] BARR J, DESBIOLLES J, UCGUL M, et al. Bentleg furrow opener performance analysis using the discrete element method[J]. Biosystems Engineering, 2020, 189: 99-115.
- [52] GUO C, LI G, ZHANG J, et al. Influence of the sweep angle of the cross knife opener on soil disturbance[J]. INMATEH-Agricultural Engineering, 2020, 62(3): 325-334.
- [53] 赵淑红, 顾志远, 袁溢文, 等. 马铃薯曲面式播种开沟器仿生设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 32-42, 64.  
ZHAO Shuhong, GU Zhiyuan, YUAN Yiwen, et al. Bionic design and experiment of potato curved surface sowing furrow opener[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 32-42, 64. (in Chinese)
- [54] LI Y, BINGXIN Y, YIMING Y, et al. Global overview of research progress and development of precision maize planters[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(1): 9-26.
- [55] ÖZMERZİ A, KARAYEL D, TOPAKCI M. PM—power machinery: effect of sowing depth on precision seeder uniformity[J]. Biosystems Engineering, 2002, 82(2): 227-230.
- [56] JING H, ZHANG D, WANG Y, et al. Development and performance evaluation of an electro-hydraulic downforce control system for planter row unit[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 172: 105073.
- [57] CHU Qingxin, WANG Yifan, YUAN Shuai, et al. Effects of different compaction intensities on soil microstructure of the plow layer[J]. Journal of the ASABE, 2025, 68(6): 975-968.
- [58] PONCET A M, FULTON J P, MCDONALD T P, et al. Effect of heterogeneous field conditions on corn seeding depth accuracy and uniformity[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2018, 34(5): 819-830.
- [59] VIRK S S, FULTON J P, PORTER W M, et al. Row-crop planter performance to support variable-rate seeding of maize[J]. Precision Agriculture, 2020, 21: 603-619.
- [60] 王景立. 精密播种机覆土与镇压过程对种子触土后位置控制的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.  
WANG Jingli. The research of position control after seed contacting soil in the process of soil covering and rolling with precision seeder[D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [61] BENGOUGH A G, BRANSBY M F, HANS J, et al. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell[J]. Journal of Experimental Botany, 2006, 57(2): 437-447.
- [62] BERRY P M, STERLING M, SPINK J H, et al. Understanding and reducing lodging in cereals[J]. Advances in Agronomy, 2004, 84(4): 215-269.
- [63] GARDINER B, BERRY P, MOULIA B. Wind impacts on plant growth, mechanics and damage[J]. Plant Science, 2016,

- 245: 94 – 118.
- [64] NETO P H W, LOPES A R C. Emergence of corn according to the sowing depth of the seed and loads on press wheels[J]. *Engenharia Agrícola*, 2012, 32: 326 – 332.
- [65] DUGATO D, PALMA M A Z. Pressure and angle of the seed-fertilizer drill press wheel on corn emergence[J]. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2018, 22(10): 726 – 731.
- [66] 赵晓霞. 土壤镇压简述[J]. *农业工程*, 2013, 3(1): 21 – 22.
- [67] WILKES L H, HOBGOOD P. A new approach to field crop production[J]. *Transactions of the ASAE*, 1969, 12(4): 529 – 532.
- [68] 李笃仁, 高绪科, 汪德水. 压实对土壤物理性质及作物出苗影响的研究[J]. *土壤肥料*, 1981(5): 5 – 7.
- [69] 吕金庆, 衣淑娟, 陶桂香, 等. 马铃薯播种机分体式滑刀开沟器参数优化与试验[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(4): 44 – 54.
- LÜ Jinqing, YI Shujuan, TAO Guixiang, et al. Parameter optimization and experiment of splitter sliding-knife opener for potatoplant[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(4): 44 – 54. (in Chinese)
- [70] 卢琦, 刘立晶, 刘忠军, 等. 播种机星齿球面盘式覆土装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(4): 23 – 31, 73.
- LU Qi, LIU Lijing, LIU Zhongjun, et al. Design and experiment of star-tooth spherical disc soil-covering device for planter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(4): 23 – 31, 73. (in Chinese)
- [71] 贾洪雷, 王文君, 庄健, 等. 仿形弹性镇压辊设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(6): 28 – 34, 83.
- JIA Honglei, WANG Wenjun, ZHUANG Jian, et al. Design and experiment of profiling elastic press roller[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(6): 28 – 34, 83. (in Chinese)
- [72] 贾洪雷, 郭慧, 郭明卓, 等. 行间耕播机弹性可覆土镇压轮性能有限元仿真分析及试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(21): 9 – 16, 315.
- JIA Honglei, GUO Hui, GUO Mingzhuo, et al. Finite element analysis of performance on elastic press wheel of row sowing plow machine for covering with soil and its experiment[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(21): 9 – 16, 315. (in Chinese)
- [73] 郭慧, 陈志, 贾洪雷, 等. 锥形轮体结构的覆土镇压器设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(12): 56 – 65.
- GUO Hui, CHEN Zhi, JIA Honglei, et al. Design and experiment of soil-covering and soil-compacting device with cone-shaped structure of wheel[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(12): 56 – 65. (in Chinese)
- [74] LI H, HE J, WANG Q, et al. Analysis of slope-adaptive in covering-compacting device for no-till sowing based on DEM – MBD[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2025, 233: 110175.
- [75] MURRAY S E, CHEN Y. Soil bin tests and discrete element modeling of a disc opener[J]. *Canadian Biosystem Engineering Journal*, 2018, 60: 2.1 – 2.10.
- [76] 田东洋, 刘姣娣, 焦灏博. 基于离散元法的覆土圆盘工作参数优选与分析[J]. *农机化研究*, 2018, 40(9): 16 – 22, 59.
- TIAN Dongyang, LIU Jiaodi, JIAO Haobo. Parameters optimization and analysis for covering disc based on discrete element modeling[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2018, 40(9): 16 – 22, 59. (in Chinese)
- [77] 王景立, 刘选伟, 韩明月, 等. 双圆盘式覆土器的优化设计[J]. *中国农机化学报*, 2016, 37(1): 37 – 39.
- WANG Jingli, LIU Xuanwei, HAN Mingyue, et al. Optimization design of double-disc coverer[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2016, 37(1): 37 – 39. (in Chinese)
- [78] ACQUAH K, CHEN Y. Discrete element modelling of soil compaction of a press-wheel[J]. *AgriEngineering*, 2021, 3(2): 278 – 293.
- [79] WANG F L, JIA H L, LIU D D. Simulation of pressing effect of press wheel with different rims by discrete element method[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 101: 551 – 555.
- [80] 闫东旭. 大豆种子颗粒建模及投种、覆土镇压过程的仿真分析与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- YAN Dongxu. Particle modelling of soybean seeds and the simulation analysis and experimental study of the seed-throwing and pressing[D]. Changchun: Jilin University, 2022. (in Chinese)
- [81] 周龙. 基于离散元法的玉米种子建模及播种过程的仿真分析与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- ZHOU Long. DEM-based modelling of maize seeds and the simulation analysis and experimental study of the seed-sowing[D]. Changchun: Jilin University, 2022. (in Chinese)
- [82] LIU L, WANG X, ZHANG X, et al. The impact of ‘T’-shaped furrow opener of no-tillage seeder on straw and soil based on discrete element method[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 213: 108278.
- [83] 赵淑红, 刘宏俊, 谭贺文, 等. 仿旗鱼头部曲线型开沟器设计与性能试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(5): 32 – 39.
- ZHAO Shuhong, LIU Hongjun, TAN Hewen, et al. Design and performance experiment of opener based on bionic sailfish headcurve[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(5): 32 – 39. (in Chinese)
- [84] 李丽艳. 前后分置圆盘式覆土器的试验研究与仿真分析[D]. 长春: 吉林农业大学, 2018.
- LI Liyan. Experimental study and simulation analysis on front and back splitting disk soil coverer[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [85] 刘选伟, 金亮, 赵亚祥, 等. 基于均匀设计的双层圆盘式覆土器的试验研究[J]. *中国农机化学报*, 2016, 37(2): 26 – 28.

- LIU Xuanwei, JIN Liang, ZHAO Yaxiang, et al. Experimental research of double-deck disk coverer based on uniform design[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(2): 26–28. (in Chinese)
- [86] GENG Y, WANG X, ZHONG X, et al. Design and optimization of a soil-covering device for a corn no-till planter[J]. Agriculture, 2022, 12(8): 1218.
- [87] TONG J, MOAYAD B Z, MA Y, et al. Effects of biomimetic surface designs on furrow opener performance[J]. Journal of Bionic Engineering, 2009, 6(3): 280–289.
- [88] SONI P, SALOKHE V M, NAKASHIMA H. Modification of a mouldboard plough surface using arrays of polyethylene protuberances[J]. Journal of Terramechanics, 2007, 44(6): 411–422.
- [89] 刘宏俊, 赵淑红, 谭贺文, 等. 基于刮削与振动原理的减粘降阻镇压装置研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 86–92.
- LIU Hongjun, ZHAO Shuhong, TAN Hewen, et al. Investigation on press device in reducing adhesion and resistance based on scrape and vibration principle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 86–92. (in Chinese)
- [90] 侯守印, 魏志鹏, 史乃煜, 等. 弹性螺旋式覆土镇压器的设计与参数优化试验[J]. 农机化研究, 2021, 43(3): 42–51.
- HOU Shouyin, WEI Zhipeng, SHI Naiyu, et al. Design and parameter optimizing test of elastic spiral soil covering roller[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(3): 42–51. (in Chinese)
- [91] 贾洪雷, 王文君, 庄健, 等. 仿形弹性镇压辊减粘防滑结构设计 with 试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 20–27.
- JIA Honglei, WANG Wenjun, ZHUANG Jian, et al. Design and experiment on reducing soil adhesion and anti-slip structure of profiling elastic press roller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 20–27. (in Chinese)
- [92] JIA H, WANG W, LUO X, et al. Effects of profiling elastic press roller on seedbed properties and soybean emergence under double row ridge cultivation[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 162: 34–40.
- [93] LU Q, ZHAO J, LIU L, et al. Design and experiment of a soil-covering and-pressing device for planters[J]. Agriculture, 2024, 14(7): 1040.
- [94] LIU H, YAN W, JI Y, et al. Working performance of the low-adhesion and anti-slip bionic press roller in the rice-wheat rotation area[J]. Agriculture, 2022, 12(6): 750.
- [95] 陈佳奇. 仿生凸包结构镇压轮的设计与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
- CHEN Jiaqi. Design and experiment of press roller with bionic convex structure[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [96] YANG L, ZHANG Z, YAN B, et al. Design and evaluation of bio-inspired electro-osmosis system for reducing soil adhesion on agricultural equipment[J]. Soil and Tillage Research, 2025, 251: 106521.
- [97] DAI Q, QIU S, HUANG W, et al. Non-sticky and free-forward performances of grubs against soil[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2020, 191: 111006.
- [98] MASSAH J, FARD M R, AGHEL H. An optimized bionic electro-osmotic soil-engaging implement for soil adhesion reduction[J]. Journal of Terramechanics, 2021, 95: 1–6.
- [99] 肖宇豪, 刘成, 黄琳, 等. 电渗法降低黏性土黏附力室内试验[J]. 林业工程学报, 2020, 5(4): 168–173.
- XIAO Yuhao, LIU Cheng, HUANG Lin, et al. Laboratory tests on adhesion reduction of clay soil by electro-osmosis method[J]. China Forestry Science and Technology, 2020, 5(4): 168–173. (in Chinese)
- [100] 毕世英, 刘伟达, 郭丽君. 大豆垄上耦合仿生镇压轮动力学分析与参数优化[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(9): 25–32.
- BI Shiyong, LIU Weida, GUO Lijun. Dynamic analysis and parameter optimization of coupled bionic press roller on soybean ridge[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(9): 25–32. (in Chinese)
- [101] 毕世英, 刘伟达, 郭丽君. 东北垄作区耦合仿生镇压轮设计与试验[J]. 农机化研究, 2021, 43(4): 134–140.
- BI Shiyong, LIU Weida, GUO Lijun. Design and experiment of coupled bionic press wheel in ridge cultivation area in northeast China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(4): 134–140. (in Chinese)
- [102] 肖涵. 免耕播种机仿生镇压轮优化设计与试验研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2023.
- XIAO Han. Optimal design and experimental research on bionic repression wheel of no-till planter[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [103] 陈海涛, 徐源, 史乃煜. 三向可调式 V 型覆土镇压器设计与试验[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(11): 65–73.
- CHEN Haitao, XU Yuan, SHI Naiyu. Design and experiment on three-way adjustable V-type soil-covering and soil-compacting device[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(11): 65–73. (in Chinese)
- [104] 佟金, 张清珠, 常原, 等. 肋条型仿生镇压辊减粘降阻试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 135–140.
- TONG Jin, ZHANG Qingzhu, CHANG Yuan, et al. Reduction of soil adhesion and traction resistance of ridged bionic press rollers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 135–140. (in Chinese)
- [105] 佟金, 张清珠, 常原, 等. 仿生镇压辊减粘降阻的有限元分析与试验验证[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 85–92.
- TONG Jin, ZHANG Qingzhu, CHANG Yuan, et al. Finite element analysis and experimental verification of bionic press roller in reducing adhesion and resistance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 85–92. (in Chinese)

- [106] ZHANG Q, LI B, XU Y, et al. Effects of biomimetic press roller type, material, velocity, and packing force on soil compaction characteristics[J]. Transactions of the ASABE, 2021, 64(6): 1929–1941.
- [107] 李金光. 去真空式脱附减阻耦合仿生深松铲设计与研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024.  
LI Jinguang. Design and research of de-vacuum desorption drag reduction coupling bionic subsoiler[D]. Changchun: Jilin University, 2024. (in Chinese)
- [108] LI X, WANG S, JAING Z, et al. Study on soil cracks in pneumatic subsoiling based on LSTM[J]. Soil Use and Management, 2023, 39(1): 298–315.
- [109] 张敬宇. 升温对土—金属界面间黏附特性影响试验研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2022.  
ZHANG Jingyu. Experimental study on the effect of temperature rise on the adhesion between soil and metal interface[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2022. (in Chinese)
- [110] 刘瑞, 李衍军, 刘春晓, 等. 铲式宽苗带燕麦播种开沟器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 89–96.  
LIU Rui, LI Yanjun, LIU Chunxiao, et al. Design and experiment of shovel type wide seedling belt oat seeding furrow opener[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 89–96. (in Chinese)
- [111] 赵淑红, 杨罗罗, 张鑫, 等. 大豆垄上双行免耕播种机锯齿式开沟器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 74–84.  
ZHAO Shuhong, YANG Luoluo, ZHANG Xin, et al. Design and experiment of zigzag opener for double-row no-tillage seeding on soybean ridge[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 74–84. (in Chinese)
- [112] 王万鹏. 面向大豆垄作种植的滑动式振动镇压装置设计与研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.  
WANG Wanpeng. Design and research of sliding vibration press device for soybean ridge tillage[D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)
- [113] LANG Chunling, QIAN Haifeng, ZHU Zirui, et al. Design and testing of slide vibrational compaction device[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2025, 18(3): 105–115.
- [114] 魏延鹏. 轻质高强全方位镇压装置设计与试验研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2023.  
WEI Yanpeng. Design and experimental study of lightweight high strength omnidirectional pressing device[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [115] 张志君, 孙旭伟, 金柱男, 等. 大豆播种机破碎式仿生覆土装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 34–40, 73.  
ZHANG Zhijun, SUN Xuwei, JIN Zhu'nan, et al. Design and test of crushing bionic soil covering device of soybean seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 34–40, 73. (in Chinese)
- [116] 赵淑红, 田哲名, 刘佳明, 等. 免耕播种机勒洛三角形镇压轮设计与试验[J]. 农机化研究, 2025, 47(3): 130–137.  
ZHAO Shuhong, TIAN Zheming, LIU Jiaming, et al. Design and experiment of reuleaux triangle press wheel for no tillage seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(3): 130–137. (in Chinese)
- [117] 刘芳, 高筱钧, 贾宪, 等. 高速精量播种机阿基米德螺旋线型弧面双齿盘覆土装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(6): 91–100, 120.  
LIU Fang, GAO Xiaojun, JIA Xian, et al. Design and experiment of archimedean spiral-type arc double-toothed disc soil-covering device for high-speed precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 91–100, 120. (in Chinese)
- [118] 苟文, 马荣朝, 樊高琼, 等. 套作模式下链环式覆土器的参数优化[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 33–37.  
GOU Wen, MA Rongchao, FAN Gaoqiong, et al. Parameter optimization of interlink covering device in relay-cropping system[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 33–37. (in Chinese)
- [119] GUO Peng, SHANG Shuqi, ZHENG Xiaoshuai, et al. Design of a seed-pressing mechanism for precision peanut planters and verification of optimal operating parameters under high-speed seeding conditions[J]. Agriculture, 2025, 15(21): 2246.
- [120] 刘宏俊, 韩济远, 陈佳奇, 等. 丘陵地区刚性镇压轮性能仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 114–122.  
LIU Hongjun, HAN Jiyuan, CHEN Jiaqi, et al. Performance simulation and experiment on rigid press wheel for hilly area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 114–122. (in Chinese)
- [121] 贾铭钰. 免耕播种机镇压装置的试验研究及计算机辅助设计[D]. 北京: 中国农业大学, 2000.  
JIA Mingyu. Study on press-device of no-tillage seeder and CAD[D]. Beijing: China Agricultural University, 2000. (in Chinese)
- [122] 赵淑红, 谭贺文, 王加一, 等. 多功能集成式播种开沟器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 58–67.  
ZHAO Shuhong, TAN Hewen, WANG Jiayi, et al. Design and experiment of multifunctional integrated seeding opener[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11): 58–67. (in Chinese)
- [123] 郭慧, 王刚, 赵佳乐, 等. 锥形覆土镇压轮镇压强度力学模型[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(12): 107–111, 127.  
GUO Hui, WANG Gang, ZHAO Jiale, et al. Soil pressure mechanical model of conical soil covering-compacting wheels[J]. Experimental Technology and Management, 2021, 38(12): 107–111, 127. (in Chinese)
- [124] LIU Hongjun, ZHANG Wenyi. Working performance of bidirectional profiling press device in hilly areas of northeast China[J]. Agriculture, 2022, 12(9): 1365.
- [125] 贾洪雷, 郑健, 赵佳乐, 等. 2BDB-6(110)型大豆仿生智能耕播机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 93–

107.

JIA Honglei, ZHENG Jian, ZHAO Jiale, et al. Design and experiment of 2BDB-6(110) soybean bionic intelligent till-sowing machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(5):93-107. (in Chinese)

[126] 内蒙古天洲农业科技有限公司. 一种深浅可调式施肥开沟器: 202522443768.2[P]. 2025-12-19.

[127] 白菊. 可调节宽度的农用开沟器: 202520444555.9[P]. 2026-01-30.

[128] 中国农业大学. 夹角及聚点位置可调的双圆盘开沟器: 201310741562.7[P]. 2015-11-18.

[129] ZHENG Z, FU Z, WANG C, et al. Design and experimental research on soil covering device with linkage and differential adjustment of potato planter[J]. Agriculture, 2021, 11(7): 665.

[130] 田士军. 可调圆盘覆土器: 200920100735.6[P]. 2010-09-22.

[131] 霍立东, 郭秀杰. 可调式双圆盘覆土器: 200720116262.X[P]. 2008-07-23.

[132] 黑龙江省农业机械工程科学研究院. 圆盘外接可调式覆土器: 201120346992.5[P]. 2012-05-23.

[133] 郭慧, 齐江涛, 刘慧力, 等. 基于坐标变换的双角度定量调整机构建模方法[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(6): 107-111.

GUO Hui, QI Jiangtao, LIU Huili, et al. Modeling method of dual-angle quantitative adjustment mechanism based on coordinate transformation[J]. Experimental Technology and Management, 2021, 38(6): 107-111. (in Chinese)

[134] 吉林大学. 一种双圆盘覆土器张角和倾角定量可调机构及设计方法: 201811235934.8[P]. 2019-02-26.

[135] 王景立, 马旭, 卢波, 等. 精密播种机可变量苗带镇压器的试验研究[J]. 吉林农业大学学报, 2009, 31(4): 472-475.

WANG Jingli, MA Xu, LU Bo, et al. Experimental study on seeding strip press roller with variable pressure of precision planter[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2009, 31(4): 472-475. (in Chinese)

[136] 赵淑红, 刘宏俊, 谭贺文, 等. 丘陵地区双向仿形镇压装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 82-89.

ZHAO Shuhong, LIU Hongjun, TAN Hewen, et al. Design and experiment of bidirectional profiling press device for hilly area [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 82-89. (in Chinese)

[137] 李军宇. 大豆玉米带状复合种植播种机镇压压力可调镇压装置设计[J]. 农业工程, 2025, 15(4): 95-99.

LI Junyu. Design on adjustable force pressing device of planter for strip intercropping operation of soybean and corn [J]. Agricultural Engineering, 2025, 15(4): 95-99. (in Chinese)

[138] KIANI S, KAMGAR S, RAOUFAT M. Automatic on-line depth control of seeding units using a non-contacting ultrasonic sensor[J]. International Journal of Natural and Engineering Sciences, 2010, 6(2): 39-42.

[139] FULTON J, PONCET A, MCDONALD T, et al. Considerations for site-specific implementation of active downforce and seeding depth technologies on row-crop planters[C]//73rd Conference LAND, TECHNIK-AgEng, 2015: 6-7.

[140] ZHAO Naichen, ZHAO Bin, YI Shujuan, et al. Research on a sowing depth detection system based on an improved adaptive kalman filtering method[J]. Electronics, 2022, 11(22): 3802.

[141] WANG Song, YI Shujuan, ZHAO Bin, et al. Sowing depth monitoring system for high-speed precision planters based on multi-sensor data fusion[J]. Sensors, 2024, 24(19): 6331.

[142] LIANG Xianmin, ZHANG Xiangcai, AN Xingcheng, et al. Research on the seeding depth adjustment device based on the tip of furrow opener force measurement[J]. INMATEH-Agricultural Engineering, 2023, 70(2): 557-569.

[143] OSUNBITAN J A, OYEDELE D J, ADEKALU K O. Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamy sand soil in southwestern Nigeria[J]. Soil and Tillage Research, 2005, 82(1): 57-64.

[144] CHI L, TESSIER S. A portable micro-penetrometer for measuring seed row compaction[J]. Soil and Tillage Research, 1995, 34(1): 27-39.

[145] 刘吉, 马道坤, 曾庆猛, 等. 车载行进式农田土壤压实度实时测量系统[J]. 中国农业大学学报, 2007, 12(6): 71-74, 92.

LIU Ji, MA Daokun, ZENG Qingmeng, et al. A real-time measuring system of soil compaction [J]. Journal of China Agricultural University, 2007, 12(6): 71-74, 92. (in Chinese)

[146] 王志楠, 卢彩云, 何进, 等. 土壤表层含水率与镇压力作用下探针贯入阻力变化规律[J]. 农业机械学报, 2025, 56(6): 167-176, 204.

WANG Zhinan, LU Caiyun, HE Jin, et al. Variation of probe penetration resistance under soil surface moisture content and compaction pressure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(6): 167-176, 204. (in Chinese)

[147] MOJTABA N B, MEHARI Z T, RICHARD A N, et al. A mechanical-dielectric-high frequency acoustic sensor fusion for soil physical characterization[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 156: 10-23.

[148] NADERI-BOLDAJI M, SHARIFI A, ALIMARDANI R, et al. Use of a triple-sensor fusion system for on-the-go measurement of soil compaction[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 128: 44-53.

[149] 马纪琴. 播种行土壤实度测量系统的开发[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.

MA Jiqin. Development of system for measuring seed row compaction [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015. (in Chinese)

[150] ASPARUH I A, ATANAS Z A. Soil density measurement during cultivation through analysis of the elastic deformation of a cultivator shank[J]. Eng, 2025, 6(11): 310.

[151] ZHANG Haojie, ZHANG Wenyi, QI Bing, et al. Research on a soil mechanical resistance detection device based on flexible

- thin-film pressure sensors[J]. *Agronomy*, 2025, 15(9): 2041.
- [152] 贾洪雷,李杨,齐江涛,等. 基于 ZigBee 的播种行表层土壤坚实度采集系统[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(12): 39–46, 61.  
JIA Honglei, LI Yang, QI Jiangtao, et al. Design and test of soil compaction acquisition system for sowing line surface based on ZigBee[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(12): 39–46, 61. (in Chinese)
- [153] 贾洪雷,王万鹏,陈志,等. 基于土壤坚实度的仿形弹性镇压辊镇压力实时测量方法[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2018, 48(4): 1169–1175.  
JIA Honglei, WANG Wanpeng, CHEN Zhi, et al. Real-time pressure measurement of profiling elastic press roller based on soil cone index[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2018, 48(4): 1169–1175. (in Chinese)
- [154] LIU L, WANG X, ZHANG X, et al. Sowing depth control strategy based on the downforce measurement and control system of ‘T’-shaped furrow opener[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, 247: 97–108.
- [155] SHARIPOV G M, PARAFOROS D S, GRIEPENTROG H W. Implementation of a magnetorheological damper on a no-till seeding assembly for optimising seeding depth[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 150: 465–475.
- [156] CAO X, WANG Q, LI H, et al. Design and experiment of pneumatic pressure control device for no-till planter[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2023, 16(3): 37–46.
- [157] SANG X, ZHANG K, YANG L, et al. Design and experiment of a stereoscopic vision-based system for seeding depth consistency adjustment[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, 225: 109345.
- [158] LI Yueyue, QI Bing, BAO Encai, et al. Design and analysis of a sowing depth detection and control device for a wheat row planter based on fuzzy PID and multi-sensor fusion[J]. *Agronomy*, 2025, 15(6): 1490.
- [159] 安晓飞,周雨来,李立伟,等. 玉米免耕播种机镇压力精准调控系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2025, 56(4): 72–80.  
AN Xiaofei, ZHOU Yulai, LI Liwei, et al. Design and experiment of precision control system for compaction pressure force of corn no-tillage planter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025, 56(4): 72–80. (in Chinese)
- [160] 付作立,宫志超,褚青昕,等. 高速免耕玉米播种单体镇压力主动调控系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(11): 273–284.  
FU Zuoli, GONG Zhichao, CHU Qingxin, et al. Design and test of active control system for soil compaction of high speed no-tillage maize planter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(11): 273–284. (in Chinese)
- [161] 刘金凯. 精整地机设计与镇压力反馈控制技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.  
LIU Jinkai. Research on the design of soil preparation machine and feedback control technology of compacting force on roller [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019. (in Chinese)
- [162] 白慧娟,方宪法,王德成,等. 玉米播种机播深和压实度综合控制系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(9): 61–72.  
BAI Huijuan, FANG Xianfa, WANG Decheng, et al. Design and test of control system for seeding depth and compaction of corn precision planter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(9): 61–72. (in Chinese)
- [163] LI B, TAN Y, CHEN J, et al. Precise active seeding downforce control system based on fuzzy PID[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020(1): 5123830.
- [164] 耿元乐. 中小型玉米免耕播种机镇压部件设计与镇压力控制研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2023.  
GENG Yuanle. Research on the design of press devices and control of compaction pressure for small and medium-sized corn no-till planter[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [165] 薛冰,周利明,牛康,等. 基于自适应模糊 PID 的小麦播深控制系统研究[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(增刊 1): 93–102.  
XUE Bing, ZHOU Liming, NIU Kang, et al. Sowing depth control system of wheat planter based on adaptive fuzzy PID[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(Supp. 1): 93–102. (in Chinese)
- [166] BERTI M T, JOHNSON B L, HENSON R A. Seeding depth and soil packing affect pure live seed emergence of cuphea[J]. *Industrial Crops and Products*, 2008, 27(3): 272–278.
- [167] 徐天月. 精密播种单体及其关键部件工作过程的试验研究与仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2019.  
XU Tianyue. Experimental study and simulation analysis of the working process of the precision seeding unit and its key parts [D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)
- [168] YANG W, HE J, LU C, et al. Current situation and future development direction of soil covering and sompacting technology under precision seeding conditions in China[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(11): 6586.
- [169] LIU W, ZHOU J H, ZHANG T F, et al. Key Technologies in intelligent seeding machinery for cereals: recent advances and future perspectives[J]. *Agriculture*, 2025, 15(1): 8.