doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.18.017

# 我国水旱轮作区耕整地技术与装备研究现状与发展趋势

张青松[1,2]　李若石[1]　燕　桓[1]　廖宜涛[1,2]　王林松[3]　梁　方[1,2]　王嘉豪[1]　廖庆喜[1,2]

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070;
3. 湖北省农业农村厅农机化管理处, 武汉 430064)

**摘要**: 水旱轮作是保障粮油供给与提升复种指数的重要耕作方式,而耕整地作业面临由“干湿交替”环境引发的土壤板结粘重、地表高湿秸秆留存及茬口紧、农时紧迫等多重约束,对耕整地装备适应性与可靠性提出更高要求。本文在阐述水旱轮作区区域分布、轮作类型的基础上,围绕秸秆处理、土壤细碎、开沟作畦、种床厢面整形及多功能联合作业等关键技术,系统综述了相关技术与装备研究进展。研究结果表明,现有技术与装备在应对干湿交替的复杂轮作工况时仍面临诸多挑战:多相耦合机理不明与装备适应性不足、秸秆处理与种床协同构建困难、作业环境智能感知缺失与参数自适应调控能力薄弱、触土部件损伤机制认知不足与装备作业可靠性偏低等。未来研究重点将向多场耦合仿真与数字孪生、结构拓扑优化与仿生设计、智能感知与精准调控技术、材料表面工程与部件可靠性提升等方向深入发展,为构建高效、低耗、智能化的水旱轮作耕整地装备体系提供理论参考与技术支撑。

**关键词**: 水旱轮作; 耕整地技术; 触土部件; 研究进展; 发展趋势

**中图分类号**: S222　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)18-0186-19　　**OSID**:

# Research and Development Trends of Tillage and Land Preparation Technology and Equipment in Paddy – Upland Rotation Areas of China

Zhang Qingsong[1,2]　Li Ruoshi[1]　Yan Huan[1]　Liao Yitao[1,2]　Wang Linsong[3]　Liang Fang[1,2]
Wang Jiahao[1]　Liao Qingxi[1,2]

(1. *College of Engineering*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Wuhan* 430070, *China*
3. *Agricultural Mechanization Management Division*, *Hubei Provincial Department of Agriculture and Rural Affairs*, *Wuhan* 430064, *China*)

**Abstract**: Paddy – upland rotation is a crucial farming system for ensuring grain and oil supply and increasing the multiple cropping index. However, tillage and land preparation operations in these areas are constrained by dry-wet alternation, soil compaction and heavy clay, retained high-moisture straw, narrow turnaround windows, and pressing seasonal schedules, all of which place higher demands on equipment adaptability and reliability. To systematically review the application status of tillage and land preparation technologies and equipment in paddy – upland rotation areas and clarify future research priorities, the regional distribution and cropping patterns of paddy – upland rotation in China were firstly summarized, and then the key technologies and representative equipment for straw management, soil fragmentation, furrow opening and bed-forming, seedbed shaping, and multi-functional combined operations were reviewed. Existing technologies still faced several bottlenecks under dry-wet alternating field conditions, including unclear multiphase coupling mechanisms and limited equipment adaptability, difficulty in coordinating straw management with high-quality seedbed construction, insufficient intelligent perception of the operating environment and weak adaptive parameter regulation, and inadequate understanding of the damage mechanisms of soil-engaging components, which led to low operational reliability. Future research should focus on multi-field coupling simulation and digital twins, structural topology optimization and bionic design, intelligent sensing and precision control, and surface engineering

收稿日期: 2026-03-16　修回日期: 2026-04-22

**基金项目**: 国家自然科学基金项目(32572225)、国家重点研发计划项目(2021YFD2000401)、湖北省自然科学基金项目(2025AFB596)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-12)

**作者简介**: 张青松(1987—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: qszhang@mail.hzau.edu.cn

**通信作者**: 廖庆喜(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究,E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

and reliability enhancement of key components. These efforts were expected to provide theoretical support and technical references for developing efficient, low-energy, and intelligent tillage and land preparation systems for paddy – upland rotation areas.

**Key words**: paddy – upland rotation; tillage and land preparation technology; soil-engaging components; research progress; development trends

## 0　引言

水旱轮作是指在同一田块上依据季节性气候资源,周期性交替进行淹水水稻栽培与旱地作物(如小麦、油菜等)种植集约化农业生产模式[1-2]。作为保障粮油供给与提升土地复种指数的重要耕作方式,该耕作方式通过“干湿交替”的生境转换,不仅能有效阻断连作障碍、改良土壤理化性状,还能显著抑制病虫草害,对维持农业生态系统的可持续性具有重要价值[3-4]。然而,这种独特的干湿交替环境,给机械化耕整地作业带来了严峻挑战。前茬水稻季搅浆沉实导致旱季土壤板结严重、容重增高;同时,高留茬、高湿度、高韧性的秸秆大量滞留田间,形成了复杂的“土壤–秸秆–机具”互作体系[5-6]。由单一旱地或水田标准设计的传统耕整地机具,在此类复合工况下往往表现出适应性差、作业功耗高、部件磨损剧烈及土壤–秸秆混合物堵塞等问题[7-8]。特别是在秋季“抢收抢种”极短农时窗口期,机具极易发生缠草拥堵,难以一次性构建出平整度与碎土率兼优的高质量种床,严重制约了下茬旱作物出苗质量与产量潜力。

当前,针对秸秆处理、土壤细碎及开沟作畦等单一耕整地工序的装备研发已取得显著进展,但随着现代农业对耕整地作业生产效率、种床构建质量以及装备智能化水平的要求不断提高,将水旱轮作视为一个完整系统,从全局系统视角统筹优化水旱轮作全过程耕整地技术体系的迫切需求日益凸显。本文聚焦水旱轮作区耕整地作业核心环节,在阐述水旱轮作区区域分布、轮作类型基础上,围绕秸秆处理、土壤细碎、开沟作畦、种床厢面整形及多功能联合作业等关键耕整地技术,系统综述相关技术与装备研究与应用进展,归纳当前面临不足,并展望面向高效、低耗、智能化方向的发展趋势,以期为水旱轮作区耕整地装备优化升级提供理论参考。

## 1　水旱轮作区概况

### 1.1　区域分布

水旱轮作区分布主要由水热气候条件与种植制度共同决定。由于水稻生长对高温多雨环境的特殊需求,而旱地作物则需要相对干燥的季节,水旱轮作模式高度集中于热带及亚热带季风气候区。受季风环流影响,这些区域夏季高温多雨,与水稻喜湿耐涝的生理特性高度契合;冬季则相对干燥少雨,能够满足小麦、油菜等旱作物对土壤水分的需求,从而形成了季节性“淹水种稻–排水旱作”的交替模式。

从全球分布来看,水旱轮作区主要集中于亚洲,其次为非洲和美洲。亚洲凭借典型的季风气候与悠久的稻作传统,成为全球水旱轮作分布最广泛的区域;非洲随着尼日尔河流域及马达加斯加等地稻作技术的发展,水旱轮作应用规模逐步扩大;拉丁美洲虽水稻总产较高,但以大规模单季稻种植或休耕模式为主,水旱轮作应用相对有限。欧洲及大洋洲受气候条件与种植习惯限制,水旱轮作较少。在亚洲,中国、印度、日本、韩国及东南亚各国构成了亚洲水旱轮作的核心分布区域,其中中国凭借广阔的长江流域及以南区域的稻作带与多样化的种植制度,成为全球水旱轮作面积最大、模式最为丰富的地区。

从国内种植区域分布来看,水旱轮作区主要分布于秦岭–淮河以南的广大稻作区域,形成了以长江中下游地区为主体,西南地区与华南地区为重要支撑的总体布局。长江中下游地区是中国水旱轮作分布最为集中的区域,涵盖湖北、湖南、江西、安徽、江苏、浙江等地,占全国水旱轮作总面积的一半左右;西南地区的四川、重庆、贵州、云南等省市轮作规模次之,位列全国第二;华南地区的广东、广西、福建等省区同样分布有较大规模的水旱轮作区。

### 1.2　轮作类型

水旱轮作区轮作类型在特定气候条件、地理环境等因素共同作用下形成,其多样性与区域性特征直接决定了耕整地作业技术需求。轮作类型作为种植制度核心内容,决定了作物在时间与空间上的配置方式,影响土壤物理性状的演变轨迹及机械化作业的生产模式。

从气候–地理视角出发,中国水旱轮作区可划分为华东与华中亚热带季风区、西南高原盆地季风区及华南与东南沿海热带季风区 3 大类型,各区域因水热条件差异形成了特征鲜明的轮作类型,耕整地装备作业有不同特点如表 1 所示。华东与华中亚热带季风区以中国长江流域为代表,属亚热带季风气候,雨热同期、四季分明,普遍实行“稻–麦”或“稻–

油”一年两熟制。秋季茬口衔接时间较短,前茬水稻收获后需立即整地播种旱作,地表留存高湿、高韧性秸秆,同时土壤粘重潮湿,秸秆-土壤混合物易造成后茬耕整机具堵塞。西南高原盆地季风区以四川盆地及云贵高原为代表,地形复杂,立体气候显著,盆地冬暖春早,高原光照充足但热量有限。轮作类型主要为稻-油和稻-麦模式,部分区域冬闲田为稻-绿肥(如紫云英)等养地保育模式,低热河谷地区则发展稻-特色经济作物(如烟草、药材)轮作,以平衡土壤养分、抑制病虫草害。该区域前茬水稻秸秆与复杂地形导致大型装备难以下田,且水旱交替使耕层结构不稳定。华南与东南沿海热带季风区以华南及东南沿海和台湾地区为代表,属热带湿润气候,高温多雨,干湿季节相对分明,地势低洼处地下水位高,典型轮作模式为“稻-稻-旱作”或“稻-旱作”(如蔬菜、马铃薯、油菜、绿肥)等一年两熟或三熟形式。长期淹水环境导致土壤酸化与潜育化问题突出,前茬水稻留存秸秆与高湿粘重土壤的混合体对农机具触土部件的粘附性较强,作业阻力较大。

在水旱轮作区,除了典型的稻-麦轮作、稻-油轮作类型外,基于差异化的土壤条件与生产需求,水旱轮作还发展出多种轮作类型,如稻-蔬菜(如马铃薯)、稻-玉米(或大豆)、稻-绿肥、稻-特色经济作物(如烟草、药材)等轮作类型。这些类型在时间与空间上高效衔接,最大化土地利用效率、平衡土壤养分、抑制病虫草害,提升周年经济效益。例如,稻-麦、稻-油模式以保障粮油供给为核心目标,稻-蔬菜模式经济效益显著,属集约化生产类型,稻-绿肥模式则侧重于养地保育,是可持续农作的重要体现。

**表 1 我国主要水旱轮作区**

**Tab. 1 China's primary paddy - upland rotation areas**

| 区域 | 地理特征与气候概况 | 常见轮作类型 | 耕整地作业特点 |
|---|---|---|---|
| 华东与华中亚热带季风区 | 主要在长江流域,属亚热带季风气候,雨热同期、四季分明;土壤类型多样,以水稻土和冲积土为主,秋季常伴阴雨,土壤含水量较高 | 主要轮作类型有稻-麦/油,其它轮作类型有稻-蔬菜、稻-绿肥等 | 秋季茬口衔接时间较短,前茬水稻收获后需立即整地播种旱作,地表留存的高湿、高韧性秸秆,同时土壤粘重潮湿,秸秆-土壤混合物易造成后茬耕整机具堵塞 |
| 西南高原盆地季风区 | 主要在四川盆地及云贵高原,地形复杂,立体气候显著,盆地冬暖春早,高原光照充足但热量有限;土壤类型多样,盆地以紫色土为主,高原地区多为黄壤和红壤 | 主要轮作类型有稻-麦/油、稻-绿肥,其它轮作类型有稻-烟草、稻-药材等 | 前茬水稻秸秆与复杂地形导致大型装备难以下田,且水旱交替使耕层结构不稳定、土壤熟化度低 |
| 华南与东南沿海热带季风区 | 主要在华南及东南沿海和台湾地区,属热带湿润气候,高温多雨,干湿季节相对分明,地势低洼处地下水位高;土壤以高度风化的赤红壤和潜育化水稻土为主 | 主要轮作类型有稻-稻-马铃薯/蔬菜、稻-稻-油,其它轮作类型有稻-稻-绿肥、稻-甘薯等 | 长期淹水环境导致土壤酸化与潜育化问题突出,前茬两季水稻留存秸秆与高湿粘重土壤的混合体对农机具触土部件的粘附性较强,作业阻力较大 |

### 1.3 耕整地技术

水旱轮作区耕整地技术是在特定轮作模式与地形特征共同约束下,为应对“干湿交替”作业工况而发展形成的多环节协同技术体系。该区域土壤经历周期性干湿交替后,物理结构与力学性质发生显著变化。其机理在于,土壤颗粒体系在反复吸湿与失水过程发生基质吸力波动、黏粒膨胀收缩以及孔隙结构重组,进而导致土体流变特性在黏滞流动、固结硬化与开裂脆化之间动态转变。具体而言,淹水期土壤分散,呈粘滞泥浆状,排水落干后则迅速板结,容重升高且易于开裂。这种剧烈的状态转换要求耕整地机具具备很强的工况适应性。同时,湿润状态下粘重土壤对金属部件的粘附性强,增加作业阻力与能耗,地表留存的高留茬、高湿度秸秆与土壤混合,形成韧性强且易缠绕的介质,进一步加剧了机具堵塞。

因此,水旱轮作区开展农业机械化生产时,需要对地表留存的秸秆进行处理,以减少对耕整地机具作业堵塞,对板结土壤进行细碎,形成具有适宜孔隙度的种床环境,便于作物根系透气透水,对种床厢面进行整形,使种床土壤层松紧适度及厢面形状满足种植农艺要求,进行开沟作畦,便于雨水排水或田间灌溉管理等。为系统应对这些需求,水旱轮作区已发展出涵盖秸秆处理、土壤细碎、开沟作畦、种床厢面整形、多功能联合作业等耕整地技术体系,如表 2 所示。

秸秆处理技术旨在解决前茬高留茬、高湿秸秆易导致下茬机具缠绕堵塞难题。通过粉碎还田、混埋深埋、厢面覆盖等还田手段,或打捆、捡拾造粒等离田方式,对田间秸秆进行处理。还田方式侧重于实现秸秆的资源化利用与土壤培肥,通过物理手段将秸秆破碎并均匀混入耕层,重构“秸秆-土壤”复合介质的空间分布;离田方式则侧重于快速清除地表秸秆障碍,为后茬播种创造洁净作业环境。

表 2　水旱轮作区主要耕整地技术

Tab. 2　Key tillage techniques for paddy – upland rotation areas

| 主要技术 | 常用作业方式 | 作用原理 | 技术作用 |
|---|---|---|---|
| 秸秆处理技术 | 粉碎还田、混埋与深埋、秸秆覆盖、打捆离田、造粒离田等 | 利用甩刀、犁体或捡拾器等部件，对前茬高留茬、高湿秸秆进行细碎、掩埋或离田收集，消除地表秸秆障碍 | 清除地表秸秆堵塞作业障碍，为后茬播种创造洁净作业环境 |
| 土壤细碎技术 | 翻耕作业、碎土作业等 | 利用铧式犁、旋耕装置或驱动耙等触土部件，对板结土壤进行强力切削、破碎与搅拌，将大土块细碎化并重构土壤三相结构，降低土壤容重并恢复其通透性 | 破碎土块，创造细碎疏松的土壤结构 |
| 种床厢面整形技术 | 镇压作业、起垄作业、平地作业等 | 利用镇压辊、起垄犁或平地铲等部件，对耕后地表进行几何形状重塑与修整，优化种床的厢面形状与调整土壤紧实度，构建“平整、细碎、紧实适度”的种床厢面结构 | 将耕整后的土壤整理成适宜形状的厢面及调整土壤紧实程度 |
| 开沟作畦技术 | 主动旋转式开沟、被动挤压式开沟等 | 利用旋转刀盘、成型犁体等部件，通过移除或挤压土壤构建由围沟、腰沟及厢沟组成的互通式排灌网络，快速疏导田间积水并调控地下水位 | 实现农田地块排水调控、灌溉管理等 |
| 多功能联合作业 | 灭茬/埋茬–旋耕联合、开沟–旋耕联合、犁旋一体化等 | 通过优化空间布局与传动系统，将秸秆处理、土壤耕整、开沟作畦等多道工序集成于同一作业平台，实现多道工序一次性完成，提高作业效率，减少机具进地次数 | 通过一次作业实现秸秆处理、土壤细碎、种床厢面整形、开沟作畦等相关功能 |
| 其它耕整地技术 | 土壤深松、土壤消毒等 | 疏松深层土壤、打破坚硬犁底层，增加耕作层深度；土通过化学熏蒸或物理灭菌手段，消灭土壤内病菌病害等细菌、微生物 | 增强土壤蓄水透气和根系下扎能力，控制土传病害、消减连作生物障碍等 |

土壤细碎技术针对前茬收获后土壤板结、通气性差的问题，利用铧式犁、旋耕装置或驱动耙等触土部件，对土壤进行强力切削、破碎与翻转。通过将大土块细碎化并重新排列土壤固、液、气三相结构，为种子萌发与根系生长创造适宜的土壤物理环境。

开沟作畦技术旨在构建由围沟、腰沟、厢沟组成的互通式排灌网络。该技术利用旋转刀盘、成型犁体等部件移除或挤压土壤，形成稳定的沟形断面，实现田间积水的快速疏导与灌溉管理等。

种床厢面整形技术通过对耕后地表进行几何形态重塑与微地形修整，利用镇压辊、起垄犁体或平地铲等部件，优化种床厢面形状与调节土壤紧实度。该技术旨在构建“平整、细碎、紧实适度”的种床厢面结构。

多功能联合作业是为提高机具作业生产效率，将秸秆处理、土壤细碎、开沟作畦等多道工序集成于同一作业平台，以减少机具进地次数、降低土壤压实与能源消耗，可提高机具作业效率。

此外，针对水旱轮作区特有的连作障碍与土壤退化问题，深松与土壤消毒等耕整地手段亦发挥着相关作用。深松技术通过疏松深层土壤、打破坚硬犁底层，增强土壤蓄水透气和根系下扎能力；土壤消毒技术则通过化学熏蒸或物理灭菌手段，有效控制土传病害、消减连作生物障碍，为作物健康生长提供保障。

## 2　耕整地技术与装备研究现状

### 2.1　秸秆处理

目前在水旱轮作区，对秸秆处理主要分为秸秆还田和秸秆离田 2 种方式。秸秆还田是通过粉碎、埋覆、厢面覆盖等手段将秸秆直接留存于农田，培肥地力；秸秆离田是通过打捆、造粒等方式将秸秆收集移出农田，减轻大量秸秆对耕作机具作业堵塞压力。

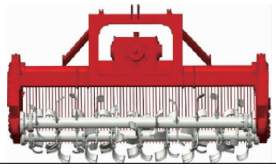
#### 2.1.1　秸秆还田技术与装备

秸秆还田是通过机械作业将作物秸秆粉碎后埋覆于土壤耕层或覆盖于种床厢面的技术措施，旨在实现秸秆资源化利用、培肥地力并改善土壤理化性状。根据秸秆还田后在耕层中分布形式及其对应的机具作业方式，现有技术主要分为粉碎还田、埋覆还田和种床厢面覆盖还田 3 种类型，对应的典型机具结构和主要特点如表 3 所示。

在秸秆粉碎还田技术与装置研究方面，吴峰等[9]针对秸秆粉碎后抛式多功能免耕播种机秸秆输送装置功耗高、易堵塞的问题，优化了抛送管道结构，并通过试验得到了抛送叶轮转速、喂入量和管道截面积的最佳工作参数，提升了秸秆输送顺畅性，降低了能耗，保障了秸秆粉碎后还田作业的可靠性。朱惠斌等[10]针对长江中下游稻麦轮作区土壤黏重、根茬韧性强、秸秆量大导致免耕播种易堵塞的问题，设计了一种双轴破茬免耕装置，通过前轴旋耕刀破茬开沟、后轴甩刀二次粉碎的协同作业，结合 EDEM – ADAMS 仿真优化了刀轴转速与位置参数，有效实现了高茬黏重稻茬田的破茬粉碎与防堵作业。吴惠昌等[11]开发了基于超声波测距的留茬高度自动控制系统，通过监测驱动轴负载变化，自动调整碎秸装置高度，避免了因入土灭茬导致的秸秆输送装置堵塞，保证了秸秆粉碎后还田作业顺畅与高效。

表 3 秸秆还田典型机具

Tab. 3 Typical equipment for straw returning to fields

| 技术类型 | 主要结构 | 主要特点 |
|---|---|---|
| 粉碎还田 |  | 秸秆粉碎[12]常用关键部件，主要包括锤爪式、直刀、L 形弯刀和 Y 形甩刀，其中锤爪式主要专门处理粗硬、木质化类型秸秆，质量大、材料厚实，使用寿命长；直刀式切割锋利干脆，适合干燥、直立的旱田秸秆，结构简单，制造和更换成本较低；L 形弯刀切土碎草兼顾，碎草同时翻埋入土，促进腐熟，滑切省力，对强韧性秸秆切断率高、切面平整；Y 形甩刀防缠绕强，适合处理柔韧水稻秸秆，水旱兼顾，能劈砍干草，撕裂湿草 |
| 埋覆还田 |  | 秸秆混埋还田机具[13]，利用埋茬弯刀与双刃旋耕刀的协同作用，对高茬黏重稻茬田地表留存的大量秸秆进行处理，混合于土壤层内，消除秸秆对播种机旋耕、开沟等触土部件作业堵塞，实现黏重土壤细碎、高茬秸秆埋覆和厢面平整，形成质量好的直播种床 |
| |  | 秸秆深埋还田机具，利用前轴正旋浅耕与后轴反旋深埋的协同作用，对稻田湿黏土壤与大量秸秆进行深耕深埋及碎土平整作业。将秸秆强制送入 15 ~ 30 cm 深层土壤并压实封闭，实现全量深埋 |
| 种床厢面覆盖 |  | 秸秆粉碎覆盖还田机具[14]，由粉碎刀辊、抛送风机及可调输送管组成，可与拖拉机动力输出轴配套作业。作业时，刀辊高速切割粉碎秸秆，风机通过输送管定向抛撒碎段至地表，形成均匀覆盖层 |
| |  | 秸秆切碎覆盖还田机具，主要由拨秸、割秸、提秸、输秸部件及液压系统构成，可与拖拉机配套作业。通过拨秸切割，提升输送，将秸秆定向铺覆于非播种带，液压系统调节覆盖质量，实现秸秆覆盖均匀 |

在秸秆埋覆还田技术与装置研究方面，秦宽等[15]开发了联合收获开沟埋草一体机，利用开沟装置形成的沟壑空间容纳秸秆并覆土。Zhang 等[16]提出了双轴分层切削深旋均匀混埋技术方案，通过前后双轴深浅搭配的旋耕配置，在不增加耕层秸秆占比的前提下，将秸秆均匀分布于 20 cm 以上土层，实现了较高埋茬率。Zheng 等[17]设计了一种适用于高速水稻播种的主动式埋茬部件，采用渐开线齿形圆盘刀片与液压马达独立驱动，实现高埋茬率。仝振伟等[18]提出了直注式秸秆深埋技术，利用原位土壤抬升铲在不打乱土层序列的前提下创造深层容纳空间。

在秸秆厢面覆盖还田技术与装置研究方面，罗伟文等[19]通过物理空间重构，利用导流装置将粉碎后的秸秆被动滑切至非播种带，成功将种带清洁率提升至 90% 以上。Shi 等[20]通过优化秸秆粉碎后抛条铺施肥播种机作业参数，利用 EDEM 离散元仿真与响应面法对粉碎刀辊转速、输送叶轮转速和前进速度进行寻优，实现了粉碎秸秆的稳定性与行间铺设一致性的提升。廖宜涛等[21]通过研发油菜精量联合直播机覆盖秸秆装置，利用弹齿捡拾、螺旋集秸、链式提升与均匀铺放机构的协同作业，将前茬水稻秸秆收集处理后均匀覆盖于播种后的厢面上。张青松等[22]针对稻油轮作区油菜直播时地表秸秆量大、机具易堵塞的问题，设计了一种秸秆覆盖还田装置。该装置通过拨秸、割秸、提秸、输秸部件协同作业，将部分秸秆输送至厢面覆盖，部分秸秆混埋还田。结果表明装置作业通过顺畅，覆盖均匀性良好。

秸秆还田技术通过粉碎、埋覆或厢面覆盖等方式将前茬秸秆留存于农田，实现秸秆资源化利用与土壤培肥的统一。该技术通过物理手段将秸秆破碎并均匀混入耕层或覆盖于厢面，重构“秸秆-土壤”复合介质的空间分布，在化解长江流域、沿海区域等地区高湿高韧秸秆对后续作业造成缠绕堵塞的同时，避免了种床“架空”与根系悬空等生产难题。

### 2.1.2　秸秆离田技术与装备

秸秆离田是通过收集、打捆或压缩成型等技术手段将前茬作物秸秆从田间移除的过程，旨在减轻大量秸秆对后续耕播作业的堵塞压力。根据秸秆成型方式及资源化利用途径，现有技术主要分为打捆离田和造粒离田 2 种类型，对应的典型机具结构和主要特点如表 4 所示。

在秸秆打捆离田技术与装置研究方面，李叶龙

**表 4　秸秆离田典型机具**

**Tab. 4　Typical equipment for straw removal from fields**

| 技术类型 | 总体结构 | 主要特点 |
|---|---|---|
| 打捆离田 |  | 秸秆打圆捆离田机具[23]，主要由捡拾装置、喂入机构、成捆室、捆扎系统及行走装置构成，可与拖拉机配套作业。作业时，前部弹齿滚筒捡拾地表秸秆并喂入成捆室，经持续压缩形成圆捆，达到预设密度后自动捆扎并排出 |
| |  | 秸秆打方捆离田机具，主要由捡拾装置、压缩室及捆扎系统构成，可与动力设备配套作业。作业时，捡拾装置将秸秆喂入压缩室往复压缩成型并捆扎，可一次完成田间秸秆的捡拾、粉碎揉丝、强制喂入、高密度压缩成型及自动缠网打捆等一体化作业，实现高密度方捆 |
| 造粒离田 |  | 该秸秆造粒离田机具由捡拾器、双压模圈、颗粒提升装置及颗粒仓构成，与拖拉机配套作业。机具连续完成秸秆捡拾、高压造粒、筛分与集储，无需预碎即可通过高压对向挤压，将秸秆直接塑形为保留天然纤维的 16 mm 颗粒，可大幅缩减秸秆体积，实现秸秆造粒离田 |
| |  | 该秸秆造粒离田机具由捡拾切割、锤片式粉碎、动辊平模造粒装置及储料仓等构成，配套刮板、螺旋输送系统。经捡拾切割、粉碎调质后，通过平模压辊挤压造粒，成品暂存储料仓，实现田间秸秆捡拾、造粒、离田一体化作业 |

等[24]设计稻秆圆捆机辊盘式卷捆机构，利用旋转圆盘代替单侧卷捆室侧壁以增加旋转草芯形成动力并降低侧壁摩擦阻力，实现了稻秆打捆过程的堵塞消除与卷捆功耗降低。王浩杨等[25]设计了捡拾割台、螺旋输送器、压缩装置等关键部件集成的自走式秸秆捡拾打捆机，通过田间试验实现了田间废弃秸秆的高效捡拾、压缩打捆与一体化离田收集。Zhao 等[26]建立圆捆机喂入装置的离散元仿真模型，利用对喂入辊转矩与液压缸活塞杆受力的动态分析及安全系数的有限元计算，实现了喂入量波动时自动过载保护与喂入间隙调节，提高了圆捆机打捆作业的可靠性。Guo 等[27]通过设计 D 型打结器分体式主轴，利用整体式键连接将主轴分为两段并在中部设置分离结构，实现了打结器损坏时无需拆卸其他部件即可快速更换，提升了方捆机打捆作业的维修便利性与效率。

在秸秆造粒离田技术与装置研究方面，德国 Krone 公司研发的 Premos 5000 型移动作业式秸秆造粒机[28]采用 2 个带齿孔的对向旋转压模圈对输送带运送的秸秆进行挤压成型，通过调整刮板与压模圈的距离控制颗粒长度，实现了田间或固定场所下多种秸秆的直接造粒与高附加值利用。苏子超[29]设计移动式秸秆造粒机关键部件，利用锤爪式捡拾装置与拨辊动刀配合完成秸秆的捡拾切割，通过锤片式粉碎装置粉碎后由动辊平模式造粒装置挤压成型，实现了田间秸秆的捡拾、粉碎、造粒与收集一体化作业。张天鹏等[30]设计了移动作业式秸秆造粒机的制粒系统，利用螺旋喂料器均匀供料、桨叶式调质器蒸汽调质、环模与压辊挤压成型，实现了田间秸秆连续制粒与颗粒收集。

秸秆离田技术通过打捆或造粒等方式将作物秸秆从田间移除，实现秸秆资源高值化利用与田间耕整部件作业障碍的同步消除。该技术通过捡拾、压缩、成型等工序改变秸秆物理形态，缩减体积并提升储运效率，有效破解两季稻种植区、茬口紧、地表留存大量秸秆等地区耕整地作业时，秸秆缠绕堵塞触土部件难题，减轻秸秆滞留对后续耕作机具作业压力。

## 2.2　土壤细碎

土壤细碎是通过铧式犁、旋耕装置或驱动耙等触土部件对板结土壤进行切削、破碎与混拌，以细化土块、重构土壤固液气三相结构的技术过程，

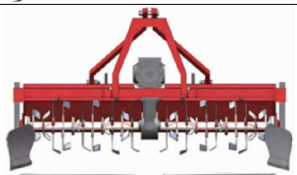
旨在为作物种子萌发和根系生长创造适宜的土壤物理环境。根据作业深度及机具对土壤的作用方式,现有技术主要分为翻耕作业和碎土作业 2 种类型,对应的典型机具结构和主要特点如表 5 所示。

在翻耕作业技术与装置研究方面,程玉龙等[31]通过开展冬耕晒垡装备选型分析与试验研究,对比分析了铧式犁、翻转犁、圆盘犁及犁旋一体机等机型的作业特点与适应性,明确了以水田灭茬犁为代表的铧式犁耕深稳定性好、翻垡埋茬率高的优势,实现了深耕晒垡、改善土壤耕层结构的效果。刘明勇等[32]探究了不同导曲线、铧刃角、安装角及端点角对翻垡效果和犁体应力的影响,确定了椭圆曲面导曲线及最优参数组合,有效降低了耕作阻力。刘晓鹏等[33]提出了驱动圆盘犁对置组合设计方案,有效降低牵引阻力及通过对称布置抵消单向翻土产生的侧向力。孙文成[34]采用“犁组左翻埋茬、刀辊反转碎土、犁铧两侧开沟”的工艺方案,通过对犁组结构与犁体曲面等关键部件的设计与运动学分析,实现了种床深耕、合理耕层构建。

在碎土作业技术与装置研究方面,张军等[35]通过田间对比试验发现,分层旋耕技术利用上下分层切削原理,显著增加了 10 ~ 20 cm 土层的耕深和持水量,使土壤密度降低,有效实现了深层土壤的疏松与精细破碎。张青松等[36]设计了一种油菜直播机开沟浅旋装置,基于滑切减阻原理优化旋耕弯刀,作业实现土壤细碎均匀。刘国阳等[37]设计了振动横挡阻隔式旋耕防粘刀辊,通过横挡阻隔与激振装置产生的往复剪切运动,有效防止了土壤在刀辊内部粘结,提升了耕整质量和减粘脱附性能。祝英豪等[38]针对水旱轮作区旋耕作业功耗大、轴向受力不均问题,设计了人字形旋埋刀辊,通过人字形对称排列与螺旋横刀参数优化,实现减阻节能。张春岭等[39]设计了六头螺旋旋耕刀辊,采用等滑切角二次切刀与四头旋耕刀交替排列,解决了黏重土壤旋耕作业质量差、功耗高问题。

**表 5 土壤细碎典型机具**

**Tab. 5 Typical equipment for soil crushing**

| 技术类型 | 主体结构 | 主要特点 |
|---|---|---|
| 翻耕作业 |  | 被动式翻耕作业机具,由多铧犁组成,依靠犁铧和犁壁的曲面结构有效翻转土层、覆盖残茬,同时具备一定碎土能力;依靠土壤反作用力实现入土,结构相对简单,维护成本低 |
| |  | 主动式翻耕作业机具,由主动驱动圆盘刀辊、传动系统及机架构成,与拖拉机配套作业,由拖拉机动力输出轴(PTO)驱动,圆盘高速旋转切削土壤,实现破碎与翻抛,同步埋覆秸秆,入土碎土能力强,适配黏重、秸秆量大地块的深层耕整与还田需求 |
| 碎土作业 |  | 正向旋耕作业机具[40],由渐变螺旋升角匀土刀辊、厢沟犁、挡土板及传动系统构成,与拖拉机配套作业。刀辊外侧向内侧螺旋升角渐小,作业时先开沟再旋耕,通过切土、运土协同将沟侧土壤向中部匀布。有效改善开沟旋耕后地表不平、土壤分布不均等问题 |
| |  | 反向旋耕作业机具[41],由深浅旋组合式刀辊、菱形施肥铲及传动系统构成,与拖拉机配套。采用反转旋耕模式,刀辊反向旋转切削土壤并后抛,深旋弯刀与防堵直刀配合实现施肥铲防堵,同步完成深施肥 |

土壤细碎技术通过对板结土壤进行切削、破碎等,将大土块细碎化并重构土壤三相结构,从而降低土壤容重、恢复耕层通透性,创造细碎疏松的土壤结构。该技术为在水旱轮作区粘重稻田土壤作业场景,构建适宜作物生长的种床环境及提升水旱轮作区耕整地作业质量提供了重要支撑。

### 2.3 种床厢面整形

种床厢面整形技术是通过镇压、起垄及平地等作业对耕后地表进行几何形态重塑与修整,以优化种床厢面形状并调节土壤紧实度的技术环节,旨在为种子萌发和幼苗生长创造平整细碎、紧实适宜的种床条件。根据作业功能及机具对地表的作用方式,主要分为镇压作业、起垄作业和平地作业等类型,对应典型机具结构和主要特点如表 6 所示。

在镇压作业技术与装置研究方面,王伟康[42]采用圆锥组合式镇压轮对播后种床进行镇压,通过螺杆调节镇压轮高度控制镇压力,有效实现播后压实保墒。秦宽[43]为稻麦联合收割开沟埋草一体机设计了播种系统镇压轮,镇压轮质量 60 kg、半径 125 mm,安装于开沟器后方用于小麦播后镇压,田

**表 6　种床厢面整形典型机具**

**Tab. 6　Typical equipment for seedbed leveling**

| 技术类型 | 主体结构 | 主要特点 |
|---|---|---|
| 镇压作业 |  | 整体镇压机具[45]，由前后双镇压辊、镇压强度调节机构（含弹簧、带孔圆柱销）及机架构成，与拖拉机配套作业。作业时，前辊开槽控深，后辊二次压实，通过调节弹簧预压缩量精准控压，对水稻种床完成开槽、覆土及镇压复式作业 |
| |  | 单体镇压机具[46]，由双圆盘开沟器、种沟镇压轮、挡板、拉伸弹簧及四杆仿形机构构成，与播种机配套。作业时开沟器成沟，挡板防土壤回流并整平沟底，各镇压轮依托弹性机构独立适配地表起伏，将种子嵌入土壤，弹簧调节镇压强度，提升出苗率与整齐度 |
| 起垄作业 |  | 被动起垄机具，由起垄犁体、整形侧板、限深轮及机架构成，依靠拖拉机牵引作业。犁体切削聚拢土壤形成垄体雏形，经整形侧板挤压整形，可快速构建规整垄体，改善田块排水保墒能力 |
| |  | 适应于水田主动起垄机具[47]，由起垄辊、微垄开沟器、平整部件及旋耕部件构成，与拖拉机配套。依托动力驱动旋耕碎土、起垄辊滚压成垄，微垄开沟器同步开沟，平整部件仿形整平，实现大垄排水与微垄蓄水协同，适配冷浸田终年积水、土壤黏重的作业需求，提升土壤通气性与温度 |
| 平地作业 |  | 水田搅浆平地机具，由机架、液压仿形系统、平地刮板及搅浆部件构成，与水田拖拉机配套作业。机具通过仿形推刮实现田面高低找平，同步搅浆破碎泥块、混匀浆土，降低田面高程差、提升泥浆均匀度，为水稻移栽或直播提供优质平整苗床 |
| |  | 旱地平地机具[48]，由三点悬挂机架、平地铲、多组支撑轮及激光控制系统构成，与拖拉机配套，依托激光信号定位，液压驱动平地铲“挖高填低”，多轮支撑分散压力减少轮辙，提升田面平整度 |

间试验表明能有效压实土壤。Liu 等[44]基于双纽线曲线设计了一种仿生镇压辊，通过几何方法改进光滑辊表面结构，利用 EDEM 建立辊-土离散元模型研究土壤粘附行为，优化后的参数组合能显著降低土壤粘附量与前进阻力。

在起垄作业技术与装置研究方面，李蒙良等[49]采用等间距腹板被动旋转切土原理形成与畦沟方向垂直的微垄，并优化了腹板数量和顶角参数，田间试验微垄合格率达 90% 以上，为油菜直播提供了一种新的种床制备技术。张青松等[50]设计了油菜垄作精量联合直播机起垄装置，由双边起垄犁、单边起垄犁和平整拖板组成，通过收土曲面和整形挡板配合完成开沟起垄和平土整形。杜文斌等[51]设计了油菜高速带状微垄联合直播机浅耕犁，采用变螺距扭曲螺旋犁体曲面实现土壤定向抛送并打破犁底层，满足油菜微垄种床制备的高速化作业。

在平地作业技术与装置研究方面，按水旱轮作平地工作环境的不同，平地技术可分为水田搅浆平地环节和旱地平地环节。

在水田搅浆平地技术与装置研究方面，丁启朔等[52]针对水田搅浆作业缺乏专用刀具设计理论的问题，基于逆向工程提出以侧切刃刃口楔角为核心，进行了结构设计，实现了搅浆刀设计理论的量化界定。Shi 等[53]结合 GNSS - RTK 自适应控制系统实现碎土、埋茬、搅浆和平地一次完成，通过缺口圆盘耙和搅浆辊旋转将土壤与水混合形成均匀泥浆层，刮土板和平地辊协同作业消除地表高差。Yu 等[54]针对传统水田整地作业精度低的问题，设计了自动调平控制系统，实现水田复式整地机自动调平。

在旱地平地技术与装置研究方面，唐灵茂[55]采用 RTK - GNSS 高精度定位与位移传感器建立数学模型，实现了作业过程平后区域三维地形的实时测量，田间试验表明系统可有效提高平地精度与效率。汪沛等[56]提出了农田精准平整过程三维地形实时测量方法，以安装 GNSS 双天线和姿态传感器的支撑轮式旱地平地机为平台，通过卡尔曼滤波器融合 GNSS 与加速度提高定位精度，结合平地铲运动学模型解算支撑轮底点坐标，田间试验表明比机载 GNSS 测量准确性提高 29.5%。Guan 等[57]引入 UAV - RTK 低空遥感技术，开发了自动化平整度评

估系统，为土地平整决策提供精准评估。Irseli 等[58]对激光平地机进行了自动化改造，设计了铲刀倾斜调节和牵引力自动控制系统，通过 PLC 控制液压系统实现平地铲 ±11°倾斜调节。

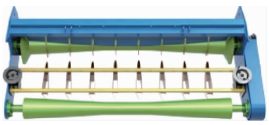
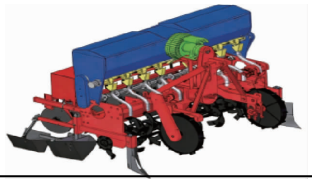
种床厢面整形技术通过镇压、起垄、平地等作业方式，对耕后地表进行几何形态重塑与土壤紧实度调节，构建“平整、细碎、紧实适度”的种床厢面结构。该技术将结构设计、功能优化与精准调控等技术手段融合应用，在长江流域及沿海区域等降雨量较大的区域，可以提升地表平整度与垄形规整度，为提升播种质量与作物出苗整齐度提供了支撑。

### 2.4 开沟作畦技术与装备

开沟作畦是通过机械部件对土壤进行切削、移除或挤压，以构建由围沟、腰沟及厢沟组成的田间排灌网络的技术环节，旨在调控土壤水分、改善根系通气条件并提升排渍能力及灌溉管理能力。根据开沟部件的运动方式及土壤迁移原理，主要分为主动旋转式开沟和被动挤压式开沟类型，对应的典型机具结构和主要特点如表 7 所示。

表 7 开沟作畦典型机具

Tab. 7 Typical equipment for digging furrows and making ridges

| 技术类型 | 总体结构 | 开沟作畦装置 | 主要特点 |
|---|---|---|---|
| 主动旋转式开沟 |  |  | 水平旋转开沟机具[59]，由类螺桨刀组、双侧可变匀土板及同轴反旋传动器构成，与拖拉机配套作业，依托动力驱动刀组水平旋转切削土壤，完成开畦沟作业 |
| |  |  | 立式旋转开沟机具，由立式刀盘、切削刀具、机架及传动系统构成，与拖拉机配套作业，立式刀辊高速旋转，通过刀片垂直切削土壤并抛撒碎土，可对板茬地及黏湿土壤进行开沟，高效开挖深窄规整沟道，对周边土壤扰动小 |
| |  |  | 主动挤压开沟机具[60]，由圆盘切茬刀、变径起垄辊、开沟盘及传动系统构成，与拖拉机配套，圆盘切茬刀与变径起垄辊协同旋转切茬压土，实现沟垄定型 |
| 被动挤压式开沟 |  |  | 铧式被动挤压式开沟机具[61]，由封闭型开畦沟犁组、变轴颈整形辊及仿形机构构成，与油菜直播机配套。依托机具前进动力，铧式犁组被动挤压土壤开沟，作业出排水畦沟 |
| |  |  | 组合式船型被动挤压开沟机具，由船式开沟犁、整形拖板及限位调节杆构成，与油菜联合直播机配套，依托机具前进动力，开沟犁被动切削挤压土壤成型，作业出排水畦沟 |

在主动旋转式开畦沟技术与装置研究方面，宋柏桦[62]采用立轴式螺旋刀具实现土壤切削、提升和抛撒一次完成，为稻茬田播种开沟提供了技术方案。刘立超[63]设计了油菜免耕直播机主动旋切式开畦沟装置，使用前后刀盘反向旋转和内外层刀片分层布置实现土壤分层切削抛送，实现开沟作畦功能。Han 等[64]设计了螺旋式分土机构，通过双螺旋轴反向旋转将开沟犁堆积的条状土壤向两侧推送，解决了排水沟堵塞和厢面平整度下降问题。王立宗等[65]针对长江中下游稻油轮作区现有油菜驱动型开畦沟装置高速作业功耗大、沟形不稳定的问题，设计了类螺旋式开畦沟装置，通过类螺旋式刀片和后磨刃结构减小触土投影面积降低切削阻力，田间试验结果表明优化后装置在高速开畦沟作业下功耗显著降低。

在被动挤压式开畦沟技术与装置研究方面，刘晓鹏等[66]设计了一种配合铧式前犁使用的组合式船型开沟器，通过船式开沟犁的切削挤压成型与整形拖板的二次平整，实现了稳定梯形畦沟的开筑。卜祥利等[67]设计了一种仿靴形锐角开沟犁，基于三面楔模型与土壤动力学分析确定抛物线滑切刃口及翼板倾角等参数，通过挡土板与仿靴整形板对土壤的侧向挤压实现沟型一次成型，解决了开沟作业中粘土、壅草和沟型不稳定的问题。顾昕[68]设计了一种集“破土-翻土-分土”于一体的中置式畦沟整备装置，基于熊爪趾仿形导曲线构建犁体曲面，结合翼

板与侧板对土壤的侧向挤压作用实现沟型一次成型。Wang 等[69]基于激光平地技术设计了前铲后犁组合式坡面开沟装置，通过前铲破土、后犁整形及螺旋匀土机构协同作业，配合激光接收器与液压系统实现沟底坡度的实时调控。

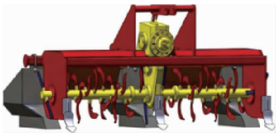
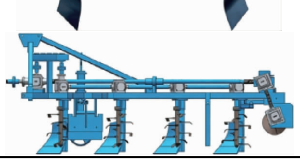
开沟作畦技术通过主动旋转式或被动挤压式开沟方式，利用旋转刀盘、成型犁体等部件移除或挤压土壤，构建由围沟、腰沟及厢沟组成的排灌系统。在长江流域及沿海区域等降雨量较大的区域，该技术可实现田间积水的快速疏导与排灌管理，解决了水旱轮作区因干湿交替导致的土壤滞水、根系缺氧等生产难题，是改善耕层水气环境、保障作物根系正常生长的重要调控手段。

### 2.5　多功能联合作业技术与装备

多功能联合作业是通过灭茬/埋茬-旋耕联合、开沟-旋耕联合或犁旋一体化等方式，利用优化空间布局与传动系统的集成方案，将秸秆处理、土壤耕整、开沟作畦等多道工序集中于同一作业平台，实现多工序一次性完成的作业过程。按照工序组合形式及区域生产需求，可以分为灭茬/埋茬-旋耕联合作业、开沟-旋耕联合作业和犁旋一体化等类型，对应的典型机具结构和主要特点如表 8 所示。

**表 8　多功能联合作业典型机具**

**Tab.8　Representative multi-functional combined-operation machinery**

| 技术类型 | 总体结构 | 主要特点 |
|---|---|---|
| 灭茬/埋茬-旋耕联合 |  | 埋茬旋耕联合作业机具，由深松铲组、碎土刀辊、埋茬装置及机架构成，与拖拉机配套作业，通过深松铲与旋耕埋茬刀的协同作用，对土壤进行深松和同步碎土，并进行秸秆埋覆复式作业，镇压部件同步整平表土。能有效消除残茬干扰，适配秸秆全量还田及播前耕整需求 |
| |  | 灭茬旋耕联合作业机具[70]，由卧式粉碎装置、旋耕刀辊、对置双螺旋埋覆辊及传动系统构成，与拖拉机配套，通过 PTO 动力驱动，先经粉碎装置切碎秸秆，再由旋耕刀辊碎土，埋覆辊实现秸秆均匀混埋 |
| 开沟-旋耕联合 |  | 稻麦轮作开沟-旋耕联合作业机具，由旋耕部件、铧式犁开沟器、播前镇压部件及机架构成，与拖拉机配套，依托旋耕、开沟、镇压、护沟工艺，旋耕部件碎土、开沟器切削成沟，镇压部件可调强度压实种床 |
| |  | 稻菜轮作开沟-旋耕联合作业机具，由犁体式成沟起垄部件、旋转式切土部件及垄面整理部件构成，与拖拉机配套，旋耕弯刀碎土埋茬，沟壁切土直刀划切沟壁，犁体部件推土成垄并整形，高效构建出排水顺畅且垄型稳固的高质量种床 |
| 犁旋一体化 |  | 驱动圆盘犁与旋耕联合作业机具，由驱动圆盘犁组、双刃型旋耕装置及两侧开畦沟部件构成，与拖拉机配套，机具采用“前盘后旋”模式，驱动圆盘犁切翻土壤秸秆，双刃型旋耕刀辊二次碎土并交替抛土埋覆秸秆，同步完成开沟，实现秸秆埋覆、耕深稳定、厢面平整 |
| |  | 犁翻与旋耕联合作业机具[71]，由扣垡装置、旋耕装置及开畦沟部件构成，与拖拉机配套，扣垡装置采用“先抬后扣”工艺翻埋秸秆，旋耕装置以双头螺旋排布刀片细碎土壤并向中间输送，同步完成开沟，机具作业耕深较传统旋耕机提升显著，作业厢面平整 |
| |  | 铧式犁组与立式旋耕联合作业机具[72]，由铧式犁组、立式旋耕碎土装置及横向螺旋输送器平地装置构成，与拖拉机配套，铧式犁组破土深翻，立式旋耕刀辊切碎土壤并搅拌秸秆，螺旋输送器装置输土回填犁沟，实现土壤翻埋、细碎作业 |

在灭茬/埋茬-旋耕联合技术与装置研究方面，周华[73]针对稻油轮作区秸秆量大、还田难度高导致旋埋刀辊功耗大、秸秆埋覆深度浅的问题，设计了由滑切型自激振动深松装置与秸秆还田旋埋刀辊组成的深旋埋联合耕整机，通过先深松后旋埋的作业顺序降低旋埋功耗仅为单独深松与单独旋埋功率之和的 82.2% ~85.0%，秸秆埋覆率达 92.0% ~93.0%，满足稻油轮作区秸秆还田农艺要求。廖庆喜等[74]设计了一种主动铲锹式油菜直播种床整备机，通过曲柄连杆机构带动铲锹实现切土、抛土和秸秆埋覆，耕深较传统旋耕提高 99.2 mm，秸秆埋覆率为 89.43%，并集成被动式开畦沟、碎土、

平整装置,实现了耕整与埋茬的联合作业。张秀梅[75]设计了由螺旋横刀与 IIT245 型旋耕刀组合而成的组合刀辊,通过螺旋横刀对秸秆的压覆拖拽与旋耕刀的破茬减阻协同作用,田间试验表明,组合刀辊植被埋覆率达 94% 以上,耕深大于 20 cm,实现了秸秆埋覆与土壤耕整的联合作业。

在开沟-旋耕联合技术与装置研究方面,包攀峰等[76]通过旋转式切土部件与犁体式成沟起垄部件的协同作用实现深层旋耕与从动开沟起垄,田间试验结果表明,沟面宽稳定度和垄高稳定度分别达 99.11% 和 98.84%,回土率仅 6.92%,满足南方黏重土壤油菜窄垄深沟种植农艺要求。何瑞银等[77]设计了复式播种机种床构建装置,集旋耕、开沟、播前镇压与护沟于一体,采用可调镇压技术与横向输土方式构建虚实结合的理想种床,作业后碎土率达 92.75%,畦沟平均深度为 201 mm,沟深稳定性系数为 91.38%,有效改善了种床结构与畦沟质量,满足该地区小麦高质量播种要求。边祺旺[78]设计了一种由组合式开畦沟部件和双刃反旋旋耕部件组成的联合作业装置,通过破土前犁、封土侧板、整形后犁构成的连续曲面实现开沟整形,并配合双刃反旋旋耕刀实现土壤细碎与秸秆埋覆,机具秸秆埋覆率达 90.34%,厢面平整度为 19.19 mm,从而同步完成开沟作畦和种床耕整功能。

在犁旋一体化技术与装置研究方面,魏国梁等[79]设计了由扣垡装置、旋耕装置及开沟装置组成的犁旋组合式油菜直播机,通过扣垡犁对土垡的“先抬后扣”式侧边翻埋与旋耕装置碎土平整协同作业实现了高茬秸秆有序翻埋;田间试验结果表明,在 2 种高茬工况下,平均耕深达 249 mm 和231 mm,秸秆埋覆率分别为 90.35% 和 91.24%。陶菘奎[80]设计了犁翻旋耕平整一体机,采用铧式犁翻耕、立式旋耕碎土、横向螺旋输送器输土平地的组合原理,平均耕深达 200.10 mm,土壤碎土率为 85.37%,地表平整度为 17.56 mm,实现了土壤深翻、细碎和回填犁沟一次完成的效果。秦宽等[81]针对稻麦轮作区传统耕作需多次下地导致土壤压实的问题,设计了犁翻旋耕复式作业耕整机,实现犁耕、旋耕、秸秆还田和平地的一次性联合作业。田间试验结果表明,该机作业后耕深达 21.6 cm,碎土率为 91.3%,能够满足待播整地要求。肖文芳等[82]针对长江中下游稻茬田土壤黏重、秸秆量大导致油菜直播机具易堵塞的问题,设计了一种犁旋组合式种床整理机,通过犁翻扣垡埋茬、旋耕碎土平整、开沟侧边作畦的协同作业,实现了秸秆全量还田与种床高效整备,田间试验结果表明,平均碎土率为 92.8%,秸秆埋覆率达 92.9%,有效解决了机具堵塞缠绕难题,显著提升了耕整地作业质量。

多功能联合作业将秸秆处理、土壤细碎、开沟作畦等多道工序进行集成,通过机具一次性作业完成耕层重构与种床整备。该技术通过减少机具下田次数,有效降低土壤压实程度与能源消耗,同时协调各作业部件间的运动匹配与功耗分配,解决了水旱轮作区地块面积较小等区域因工序复合导致的作业负荷增大、部件堵塞等相互制约难题。多功能联合作业是提升水旱轮作区耕整地作业效率、实现抢抓农时、减耗增效的重要技术。

### 2.6 其他耕整技术

水旱轮作区存在由于长期耕作易形成硬犁底等物理障碍和作物长期连作,易出现土传病害累积及次生盐渍化等生物障碍等情况。针对水旱轮作区特有的连作障碍与土壤退化问题,除了上述秸秆处理、土壤细碎、开沟作畦、种床厢面整形及多功能联合作业等关键技术,深松与土壤消毒等耕整地手段亦发挥着一定作用。

在深松技术与装置研究方面,针对水旱轮作区特有的湿粘土壤环境,丁启朔等[83]通过离散元仿真建立了双层深松模型,揭示了深松铲对土壤的微观作用过程,结合原位耕作试验平台明确了水稻土深松的最佳耕深临界点,实现了深松土壤扰动过程的微观解析与宏观耕深优化。陈硕等[84]利用 RecurDyn 与 EDEM 耦合仿真技术建立了振动试验台-土壤系统模型,通过响应面法优化振频、振幅和前进速度参数,田间试验结果表明在耕深 300 mm 条件下,作业效果良好。许行行等[85]针对深松作业深度监测不准、无法直观反映整体质量的问题,设计了基于阻力与 GPS 的监测系统,通过建立“深松阻力-土壤坚实度-深松深度”数学模型,实现深度实时监测与路径精准记录,可生成三维地貌图直观反映漏松与重叠作业情况。王元俊[86]设计了一种采用固定铲与振动铲相结合的切振共作深松机,通过偏心机构驱动振动翼板产生强迫振动实现“先切后振”的作业原理,从而实现了降低耕作阻力、降低功耗、改善土壤紧实度及提高深松稳定性的功能。梁志杰等[87]针对传统弹簧激振源自激振动深松机适应性差的问题,设计了一套液压系统并建立了基于 PID 反馈调节的液压缸激振源工作压力调控策略,通过试验整定 PID 参数实现了激振源工作压力的快速平稳控制,从而改善了自激振动深松机的耕深稳定性。

在土壤消毒技术与装置研究方面,汪小昱等[88]研制了一种移动式土壤旋耕蒸汽消毒机,通过将旋

耕装置与蒸汽消毒系统有机结合，在旋耕作业的同时利用高温蒸汽对土壤进行消毒，田间试验表明该机能有效杀灭土壤病原菌，满足土壤消毒的温度要求，为水旱轮作区提供了一种绿色高效的物理消毒装备。Gao 等[89]设计了一种立式旋耕变量消毒联合作业机，通过立式螺旋刀辊深松土壤并配合基于 STM32 的变量施药系统实现药剂与土壤均匀混合，结合仿真与田间试验优化了耕作参数，有效实现了深旋耕与土壤消毒的联合作业。张爱琪等[90]以脉动燃烧器为热动力源，通过试验优化喷管结构，使脉动燃烧器能够自激自吸稳定工作并高效产热产汽，实现了土壤蒸汽消毒机小型化与稳定蒸汽消毒功能。王东[91]设计了一种间歇移动式土壤蒸汽消毒装置，通过将高温蒸汽注入土壤使土壤升温至指定温度并保持一定时间，实现了高效环保的土壤消毒功能。陶丽欢等[92]设计了一种基于臭氧杀菌技术的旋耕式土壤消毒机，通过高压放电制取臭氧并利用臭氧充气铲将臭氧注入土壤，结合旋耕作业使臭氧与土壤充分混合，实现了旋耕与臭氧消毒一体化作业，能有效杀灭根结线虫。高建民等[93]研制了一种采用中空旋耕刀轴内部喷药与表面喷药相结合的深旋耕气雾消毒联合作业机，通过锥齿轮换向和人字形齿轮传动驱动立式旋耕刀辊，并利用仿真优化刀片形状及排列，实现了土壤深层旋耕与高效气雾消毒的联合作业功能。

深松与土壤消毒等耕整地手段为应对水旱轮作区因长期单一耕作引发的深层土壤物理障碍及连作引致的生物障碍问题提供了可选解决方案。深松作业在存在土壤板结、根系下扎受限和耕层浅薄问题的稻麦、稻油轮作等区域通过疏松深层土壤、打破紧实犁底层，增强土壤蓄水透气和根系下扎能力，优化耕层空间结构；土壤消毒在稻菜、稻薯等高温高湿、土传病害高发的轮作区域依托化学熏蒸或物理灭菌方式，可有效控制土传病害、消减连作引发的生物胁迫，为作物健康生长提供保障。上述技术手段与秸秆处理、土壤细碎等耕整作业形成互补，共同构成了水旱轮作区应对复杂障碍、维持耕地持续生产能力的重要技术补充。

## 3　存在问题

水旱轮作区耕整地装备研究与应用在秸秆处理、土壤细碎、种床厢面整形、开沟作畦以及多功能联合作业等方面已取得了一定进展，随着水旱轮作区对生产效率、机具作业质量要求等方面的提高及耕地障碍问题的日益凸显，现有技术与装备在应对“干湿交替”的水旱轮作工况时仍面临诸多挑战，主要体现在以下方面：

（1）多相耦合作用机理不明与装备工况适应性不足。水旱轮作区特有的干湿交替环境导致土壤物理力学特性在板结硬化与粘滞流变之间剧烈波动。现阶段，土壤、耕整部件与秸秆残茬之间的多相耦合相互作用机制尚不清晰，缺乏能统一表征不同含水率下土壤动态本构关系的理论模型[94-96]，导致传统机具在应对高黏附、高流变复杂生境时，作业质量波动大、切削能耗高，制约了装备广适性与作业效能。

（2）秸秆高效处理与优质种床协同构建困难。高复种指数带来的大量高湿、高韧性秸秆滞留，使得秸秆高效处理与优质种床构建之间的矛盾日益突出，难以在确保秸秆全量还田的前提下，避免种床“架空”和机具堵塞。现有的粉碎还田技术难以有效切断高湿软秸秆，易造成秸秆缠绕刀轴，而深埋技术作业功耗大，秸秆在土壤中的空间分布不均会影响下茬作物的出苗率和根系下扎[97-98]。如何平衡秸秆还田的生态效益与当季作物的农艺要求，并通过机械手段实现秸秆与土壤的合理混合，是当前的一个技术难题。

（3）作业环境智能感知缺失与参数自适应调控能力薄弱。耕整作业环境具有高度的时空变异性，需要装备具备实时感知和决策的能力，目前大多数机具仍处于“被动执行”阶段，难以在确保作业效率和质量的同时，根据负载变化自动调节作业参数。缺乏针对泥浆、粉尘及高振动环境下高鲁棒性的传感器，导致对耕深、碎土率及地表平整度等关键指标的在线监测困难[99-101]；作业参数如速度、转速、深浅等的调整仍主要依赖驾驶员经验，难以实现“土壤硬度-机具负荷”闭环控制，限制了装备在复杂非均质田块中智能化水平和作业精度提升。

（4）触土部件损伤机制认知不足与装备作业可靠性偏低。水旱轮作区触土部件面临着严苛的磨损环境，兼具旱季石英砂颗粒的强磨料磨损与水季酸性土壤的电化学腐蚀，单一的材料强化手段难以有效延长部件寿命。现有的触土部件多采用锰钢、硼钢等材料，虽然硬度较高，但在应对“磨损-腐蚀”耦合损伤会出现部件早期失效、刃口钝化快等问题[102-103]；频繁的干湿交替和高冲击载荷对材料的综合力学性能提出了更高要求，但高性能耐磨耐蚀复合材料或涂层技术的应用成本较高，制约了在量产农机上的大规模推广与应用。

## 4　发展趋势

随着农业现代化的深入推进，农业装备研究正朝着高效、节能、智能化和可持续化的方向快速发

展。作为水旱轮作区机械化生产的关键支撑,耕整地技术与装备研究亦将不断创新,呈现如下发展趋势:

(1)多场耦合仿真与数字孪生突破。针对多相耦合作用机理不明、装备工况适应性不足问题,未来研究将深化离散元-计算流体动力学-多体动力学(DEM-CFD-MBD)深度融合驱动的虚拟样机系统,构建"水-土-草-机"多相流协同仿真框架,集成土壤流变学、秸秆柔性形变及气流场分布等关键因素,实现对复杂作业过程量化评估与机理性揭示。数字孪生与虚实交互技术的引入将进一步推动耕整地装备向全生命周期管理延伸,支持在虚拟环境中开展不同作业工况下压力测试与参数寻优,为提升装备在干湿交替工况下广适性与作业效能提供理论支撑。

(2)结构拓扑优化与仿生设计。针对秸秆高效处理与优质种床构建协同困难的瓶颈,未来研究将深度融合拓扑优化与仿生学原理,开发兼具秸秆处理与土壤破碎能力的新型触土部件。通过土壤生物体表非光滑特征与湿黏土壤、秸秆残茬的互作机理,优化犁体曲面、刀片及开沟器等结构和空间布局,借助仿生微凸体、沟槽或波纹结构破坏土壤-金属间连续水膜并削弱界面粘附,使装备能够在单次作业中构建出秸秆分布均匀、土壤细碎适度、厢面平整紧实的优质种床,实现秸秆还田生态效益与当季作物农艺要求的有效平衡。

(3)智能感知与精准调控技术。针对作业环境智能感知缺失、参数自适应调控能力薄弱的问题,耕整地装备智能化将加速推动视觉、触觉及高精度定位等多源感知技术的深度融合,构建"土壤-机具-作物"实时互馈框架。依托边缘计算技术快速解析田间非结构化信息,实现对湿黏堵塞、板结强度、沟畦成形和厢面平整度等作业状态的在线监测与识别。作业参数自适应决策技术通过嵌入深度学习算法构建动态决策机制,融合土壤比阻数据与机具负荷参数,建立面向水旱轮作区的自适应调控机制,实现对旋耕深度、前进速度及镇压强度等作业状态的智能感知与自适应调整,实现装备在板结与泥泞交替工况下高质量作业。

(4)材料表面工程与部件可靠性提升。针对触土部件损伤机制认知不足、装备作业可靠性偏低问题,材料表面工程研究将加速发展激光熔覆、离子喷涂等梯度涂层技术,实现触土部件表面高硬度耐磨与基体高韧性抗冲的精准匹配。基于电化学腐蚀机理的多元合金配方有望突破酸性水田环境下寿命限制;纳米技术驱动的自修复涂层系统可通过微胶囊释放修复剂动态愈合微裂纹,有效应对"磨损-腐蚀"耦合损伤,提升关键部件在不同作业工况下服役寿命与作业可靠性。

数字孪生、自修复涂层等前沿技术具有良好的应用潜力,然而其研发投入、硬件优化及后期维护成本相对较高,短期内全面推广仍面临一定困难。未来推广应优先依托规模化种植大户,借助规模化作业提升装备利用率,并通过模块化配置、分阶段升级及重点环节先行替代等路径,逐步降低普通农户的应用门槛,推动高成本技术实现收益平衡。

## 参 考 文 献

[1] 吴梦洋, 崔思梦, 李玥瑶, 等. 稻麦轮作系统作物水足迹效率及其驱动力研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(5): 543-551.
Wu Mengyang, Cui Simeng, Li Yueyao, et al. Crop water footprint efficiency and its driving forces in rice-wheat rotation system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(5): 543-551. (in Chinese)

[2] 邹家荣, 贾忠华, 朱卫彬, 等. 平原河网地区稻麦轮作农田排水与氮素流失特征研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3): 321-330.
Zou Jiarong, Jia Zhonghua, Zhu Weibin, et al. Characteristics of drainage and nitrogen losses from rice-wheat rotation fields in plain river network area of eastern China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 321-330. (in Chinese)

[3] 李庭宇, 尧水红, 王天舒, 等. 不同休耕模式对豫中潮土土壤孔隙和储水潜力的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2025(2): 1-12.
Li Tingyu, Yao Shuihong, Wang Tianshu, et al. Effects of different fallow managements on pore distribution and water storage potential of fluvo-aquic soils in central Henan Province[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2025(2): 1-12. (in Chinese)

[4] Ding T Y, Guo Z C, Hua K K, et al. Effects of legumecover crop rotations on soil pore characteristics and particulate organic matter distributions in Vertisol based on X-ray computed tomography[J]. Geoderma, 2025, 461: 117464.

[5] 燕桓, 魏国梁, 张青松, 等. 稻茬田油菜直播机组合式开种沟装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(9): 199-211.
Yan Huan, Wei Guoliang, Zhang Qingsong, et al. Design and experiment of combined seed furrow opener for rapeseed direct

seeder in rice stubble field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 199 – 211. (in Chinese)

[6] 史乃煜, 陈海涛, 叶俊宏, 等. 华东稻麦轮作区立旋自走电驱动式定角度清秸机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(8): 127 – 137.
Shi Naiyu, Chen Haitao, Ye Junhong, et al. Design and experiment of vertical rotating self-propelled fixed-angle straw cleaning machine in East China rice and wheat crop rotation area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 127 – 137. (in Chinese)

[7] 张青松, 廖庆喜, 肖文立, 等. 油菜种植耕整地技术装备研究与发展[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(5): 702 – 711.
Zhang Qingsong, Liao Qingxi, Xiao Wenli, et al. Research process of tillage technology and equipment for rapeseed growing [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5): 702 – 711. (in Chinese)

[8] Lin J, Liao Q, Wang X, et al. Exploring straw movement through the simulation of shovel-type seedbed preparation machine-straw-soil interaction using the DEM – MBD coupling method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 226: 109465.

[9] 吴峰, 徐弘博, 顾峰玮, 等. 秸秆粉碎后抛式多功能免耕播种机秸秆输送装置改进[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 18 – 26.
Wu Feng, Xu Hongbo, Gu Fengwei, et al. Improvement of straw transport device for straw-smashing back-throwing type multi-function no-tillage planter[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 18 – 26. (in Chinese)

[10] 朱惠斌, 吴宪, 白丽珍, 等. 基于 EDEM – ADAMS 仿真的稻茬地双轴破茬免耕装置研制[J]. 农业工程学报, 2022, 38(19): 10 – 22.
Zhu Huibin, Wu Xian, Bai Lizhen, et al. Development of the biaxial stubble breaking no-tillage device for rice stubble field based on EDEM – ADAMS simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(19): 10 – 22. (in Chinese)

[11] 吴惠昌, 胡志超, 吴峰, 等. 后抛式免耕播种机碎秸装置离地高度自动控制系统研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(24): 1 – 9.
Wu Huichang, Hu Zhichao, Wu Feng, et al. Development of automatic control system for straw smashing height adjustment device of back throwing type no-tillage planter[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(24): 1 – 9. (in Chinese)

[12] 杜凯, 马少辉. 秸秆粉碎还田机的发展现状与问题研究[J]. 现代农业装备, 2023, 44(11): 22 – 24.
Du Kai, Ma Shaohui. Research on development status and problems of straw crushing and returning machine[J]. Modern Agricultural Equipment, 2023, 44(11): 22 – 24. (in Chinese)

[13] 杜文斌, 周国威, 张青松, 等. 油菜直播组合式埋茬防堵装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(5): 60 – 70.
Du Wenbin, Zhou Guowei, Zhang Qingsong, et al. Design and experiment of the anti-blocking device combined stubble burying for rapeseed direct seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(5): 60 – 70. (in Chinese)

[14] 施印炎, 罗伟文, 胡志超, 等. 全量秸秆粉碎条铺与种带分型清秸装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 58 – 67.
Shi Yinyan, Luo Weiwen, Hu Zhichao, et al. Design and test of equipment for straw crushing with strip-laying and seed-belt classification with cleaning under full straw mulching[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 58 – 67. (in Chinese)

[15] 秦宽, 丁为民, 方志超, 等. 稻麦联合收获开沟埋草一体机播种系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 54 – 62.
Qin Kuan, Ding Weimin, Fang Zhichao, et al. Design and experiment of seeding system for harvest ditch and stalk-dispensing machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 54 – 62. (in Chinese)

[16] Zhang Y F, Shi W, Zhou H N, et al. Parameter optimization and test based on discrete element method for biaxial layered cutting and deep rotary tillage process in rice stubble fields[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2025, 18(5): 171 – 180.

[17] Zheng G, Qi B, Zhang W Y, et al. Key device design and experimental study of high-speed seeded preparation for rice paddy sowing[J]. Computational Particle Mechanics, 2025, 12: 759 – 773.

[18] 仝振伟, 李洪文, 卢彩云, 等. 直注式秸秆捡拾粉碎深埋机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 83 – 95.
Tong Zhenwei, Li Hongwen, Lu Caiyun, et al. Design and experiment of direct-injection straw picking and crushing deep burying machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 83 – 95. (in Chinese)

[19] 罗伟文, 顾峰玮, 吴峰, 等. 全秸硬茬地碎秸行间集覆小麦播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 42 – 52.
Luo Weiwen, Gu Fengwei, Wu Feng, et al. Design and experiment of wheat planter with straw crushing and inter-furrow collecting-mulching under full amount of straw and root stubble cropland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 42 – 52. (in Chinese)

[20] Shi Y Y, Yu H W, Jiang Y, et al. Optimization of strip fertilization planter for straw throwing and paving[J]. Agriculture, 2022, 12(5): 613.

[21] 廖宜涛, 李玥宾, 廖庆喜, 等. 油菜精量联合直播机覆秸秆装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 52 – 62.
Liao Yitao, Li Yuebin, Liao Qingxi, et al. Design and test of straw gather-mulch device of combined precision rapeseed seeder

[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 52 – 62. (in Chinese)

[22] 张青松, 齐涛, 燕桓, 等. 稻茬田油菜直播秸秆覆盖还田装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(1): 186 – 196.
Zhang Qingsong, Qi Tao, Yan Huan, et al. Design and experiment of rape direct seeding straw mulching returning device in rice stubble field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 186 – 196. (in Chinese)

[23] Wang Q Y, Bai Z W, Li Z Q, et al. Straw spring teeth interaction analysis of baler picker in smart agriculture via an ADAMS – DEM coupled simulation method[J]. Machines, 2021, 9(11): 296.

[24] 李叶龙, 王德福, 王沫, 等. 稻秆圆捆机辊盘式卷捆机构的设计及参数优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 27 – 34.
Li Yelong, Wang Defu, Wang Mo, et al. Design and parameters optimization of roll-disk baling mechanism for rice straw round baler[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(6): 27 – 34. (in Chinese)

[25] 王浩杨, 荆天天, 唐忠, 等. 田间废弃秸秆捡拾打捆机设计与试验[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(10): 2368 – 2378.
Wang Haoyang, Jing Tiantian, Tang Zhong, et al. Structural design and experiment of picking and baling machine for wasted straw in field[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2024, 36(10): 2368 – 2378. (in Chinese)

[26] Zhao Z, Huang H, Yin J, et al. Dynamic analysis and reliability design of round baler feeding device for rice straw harvest [J]. Biosystems Engineering, 2018, 174: 10 – 19.

[27] Guo J, Cen H, Tang H, et al. Research on design of the D-knitter split spindle[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2218: 012077.

[28] 科罗尼. 科罗尼 Premos 5000 可移动作业生物秸秆制粒机[J]. 农业机械, 2019(22): 56.

[29] 苏子超. 移动式秸秆造粒机关键部件设计及试验[D]. 南京: 南京农业大学, 2021.
Su Zichao. Design and test of key components of mobile straw pelletizer[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2021. (in Chinese)

[30] 张天鹏, 肖茂华, 康晶晶, 等. 移动作业式秸秆造粒机制粒系统设计[J]. 农业装备技术, 2020, 46(2): 8 – 10.
Zhang Tianpeng, Xiao Maohua, Kang Jingjing, et al. Design of granulating system for mobile straw pelletizer[J]. Agricultural Equipment & Technology, 2020, 46(2): 8 – 10. (in Chinese)

[31] 程玉龙, 张文斌, 张龙全, 等. 冬耕晒垡装备选型分析与试验研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2021, 59(4): 36 – 39, 30.
Cheng Yulong, Zhang Wenbin, Zhang Longquan, et al. Type selection analysis and experimental study on tillage equipment [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2021, 59(4): 36 – 39, 30. (in Chinese)

[32] 刘明勇, 向雪, 闫春爱, 等. 基于 LS – DYNA 的铧式犁结构优化设计及性能分析[J]. 农机化研究, 2024, 46(10): 153 – 160.
Liu Mingyong, Xiang Xue, Yan Chunai, et al. Optimal design and performance analysis of the plough structure based on LS – DYNA[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(10): 153 – 160. (in Chinese)

[33] 刘晓鹏, 张青松, 肖文立, 等. 稻油轮作区驱动圆盘犁对置组合式耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 33 – 41.
Liu Xiaopeng, Zhang Qingsong, Xiao Wenli, et al. Design and experiment on symmetrical driven disc plows combined tillage machine for rice-rapeseed rotation area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 33 – 41. (in Chinese)

[34] 孙文成. 驱动犁翻与反转旋耕组合式油菜直播种床整理机设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
Sun Wencheng. Design and experiment on driven disc ploughing and reverse rotary tilling integrated machine for rapeseed seedbed preparation[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[35] 张军, 丁启朔, 丁为民, 等. 分层旋耕对水稻土耕层物理性状的影响[J]. 南京农业大学学报, 2015, 38(6): 1016 – 1022.
Zhang Jun, Ding Qishuo, Ding Weimin, et al. Effect of stratified rotary tillage on paddy soil physical properties[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2015, 38(6): 1016 – 1022. (in Chinese)

[36] 张青松, 齐涛, 敖倩, 等. 油菜机械直播机开沟浅旋装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 58 – 67, 104.
Zhang Qingsong, Qi Tao, Ao Qian, et al. Design and experiment of rapeseed direct seeding machine with furrow opener and shallow plowing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 58 – 67, 104. (in Chinese)

[37] 刘国阳, 夏俊芳, 郑侃, 等. 振动横挡阻隔式旋耕防粘结刀辊设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(23): 29 – 40.
Liu Guoyang, Xia Junfang, Zheng Kan, et al. Design and experiments of the barrier type rotary anti-adhesion blade roller with vibration crosspiece[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(23): 29 – 40. (in Chinese)

[38] 祝英豪, 张居敏, 曾荣, 等. 人字型水旱两用旋埋刀辊设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 49 – 57.
Zhu Yinghao, Zhang Jumin, Zeng Rong, et al. Design and experiment of herringbone type rotary blade roller for burying stubble in paddy field and dry land[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 49 – 57. (in Chinese)

[39] 张春岭, 夏俊芳, 张居敏, 等. 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 Chunling, Xia Junfang, Zhang Jumin, et al. 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)

[40] 郑侃，李宇飞，夏俊芳，等. 开沟旋耕机渐变螺旋升角轴向匀土刀辊设计与试验[J]. 农业机械学报，2021，52(5)：63－73.
Zheng Kan，Li Yufei，Xia Junfang，et al. Design and experiment of land leveling blade roller of ditching and rotary tiller with gradual spiral angle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(5)：63－73.（in Chinese）

[41] 王彪. 油菜直播机旋耕深施肥部件设计与试验[D]. 武汉：华中农业大学，2022.
Wang Biao. Design and experiment of components for rotary tillage and deep fertilization of rapeseed direct seeding machine[D]. Wuhan：Huazhong Agricultural University，2022.（in Chinese）

[42] 王伟康. 小麦旋耕开沟播种机的设计与试验研究[D]. 南京：南京农业大学，2016.
Wang Weikang. Design and experimental research on rice and wheat seeding machine[D]. Nanjing：Nanjing Agricultural University，2016.（in Chinese）

[43] 秦宽. 稻麦联合收割开沟埋草多功能一体机播种及开种沟系统设计与试验[D]. 南京：南京农业大学，2017.
Qin Kuan. Design and experiment of seeding system and seed furrow opening for harvest ditch and stalk-disposing machine[D]. Nanjing：Nanjing Agricultural University，2017.（in Chinese）

[44] Liu H J，Zhang W Y. Optimization design and simulation experiment of a press roller based on a lemniscate-shaped curve in rice-wheat rotation region of China[J]. Agriculture，2022，12(10)：1599.

[45] 程馨慧. 水稻旱直播双辊镇压控深播种装置设计与试验研究[D]. 扬州：扬州大学，2025.
Cheng Xinhui. Design and experimental study on twin-roll pressing controlled deep seeding device for rice dry direct seeding[D]. Yangzhou：Yangzhou University，2025.（in Chinese）

[46] 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）

[47] 张青松，蔡家顺，于良航，等. 冷浸田起垄平整装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(2)：50－59.
Zhang Qingsong，Cai Jiashun，Yu Lianghang，et al. Design and experiment of ridging leveling device for cold waterlogged paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(2)：50－59.（in Chinese）

[48] 胡炼，杜攀，罗锡文，等. 悬挂式多轮支撑旱地激光平地机设计与试验[J]. 农业机械学报，2019，50(8)：15－21.
Hu Lian，Du Pan，Luo Xiwen，et al. Design and experiment on multi-wheel support laser land leveler hanging on tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，50(8)：15－21.（in Chinese）

[49] 李蒙良，廖庆喜，裴立民，等. 油菜直播机旋切式微垄种床制备装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(5)：47－58.
Li Mengliang，Liao Qingxi，Pei Limin，et al. Design and experiment of rotary-cut micro-ridge seedbed device for rapeseed direct seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(5)：47－58.（in Chinese）

[50] 张青松，廖宜涛，陶威，等. 油菜垄作精量联合直播机起垄装置设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报，2020，55(3)：181－189.
Zhang Qingsong，Liao Yitao，Tao Wei，et al. Design and experiment for ridge lifting device of rapeseed planter[J]. Journal of Gansu Agricultural University，2020，55(3)：181－189.（in Chinese）

[51] 杜文斌，林建新，李晓冉，等. 油菜高速带状微垄联合直播机浅耕犁设计与试验[J]. 农业工程学报，2025，41(12)：38－48.
Du Wenbin，Lin Jianxin，Li Xiaoran，et al. Design and experiments of the shallow plow for the high-speed strip micro-ridge combined direct seeding machine for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE，2025，41(12)：38－48.（in Chinese）

[52] 丁启朔，吕绪敏，孙克润，等. 基于逆向工程的搅浆刀作业性能界定与关键设计参数研究[J]. 农业机械学报，2021，52(3)：68－74.
Ding Qishuo，Lü Xumin，Sun Kerun，et al. Performance and design parameter definition on puddling knife using reverse engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(3)：68－74.（in Chinese）

[53] Shi Y，Hong J，Shen X，et al. Application of integrated multi-operation paddy field leveling machine in rice production[J]. Agronomy，2025，15(12)：2877.

[54] Yu Z，Wang X，Zhang W，et al. Simulation analysis and experimental study of the hydraulic system for an automatic leveling paddy field land preparation machine using AMESim[J]. INMATEH-Agricultural Engineering，2025，77：471－480.

[55] 唐灵茂. 基于 GNSS 的旱地精准平地系统设计与试验研究[D]. 广州：华南农业大学，2019.
Tang Lingmao. Design and experimental study of accurate dry land flat system based on GNSS[D]. Guangzhou：South China Agricultural University，2019.（in Chinese）

[56] 汪沛，冯达文，陈高隆，等. 农田精准平整过程中三维地形实时测量方法研究[J]. 农业机械学报，2023，54(3)：41－48.
Wang Pei，Feng Dawen，Chen Gaolong，et al. Real-time 3D terrain measurement method and experiment in farmland leveling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(3)：41－48.（in Chinese）

[57] Guan S，Takahashi K，Nakano K，et al. Real-time kinematic imagery-based automated levelness assessment system for land

leveling[J]. Agriculture, 2023, 13(3): 657.

[58] Irseli G, Altinbalik M T. Adaptation of tilt adjustment and tracking force automation system on a laser-controlled land leveling machine[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 150: 374 - 386.

[59] 王立宗, 廖庆喜, 李蒙良, 等. 油菜高速免耕直播机驱动型开畦沟装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(19): 15 - 26.
Wang Lizong, Liao Qingxi, Li Mengliang, et al. Drive-type ditching device of the high-speed no-tillage direct seeder for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(19): 15 - 26. (in Chinese)

[60] 李运通, 蔡朗, 李甜, 等. 油麦玉兼用精量联合直播机旋压灭茬整理装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2026, 57(11): 162 - 175.
Li Yuntong, Cai Lang, Li Tian, et al. Design and test of rotary stubble-cutting and seedbed preparation device for multi-crop combined precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(11): 162 - 175. (in Chinese)

[61] 廖宜涛, 武安阳, 秦永豪, 等. 油菜精量联合直播机凸垄厢面构建装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(12): 121 - 133.
Liao Yitao, Wu Anyang, Qin Yonghao, et al. Design and experiment of convex ridge surface shaping device for rapeseed direct seeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 121 - 133. (in Chinese)

[62] 宋柏桦. 立式螺旋开沟机的设计研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
Song Baihua. Design and research of vertical spiral ditching machine[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013. (in Chinese)

[63] 刘立超. 油菜免耕直播机开畦沟装置设计与厢面质量研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
Liu Lichao. Ditching device design and soil surface quality study of no-tillage direct seeder for rapeseed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[64] Han L J, Yuan W, Yu J J, et al. Simulation and experiment of spiral soil separation mechanism of compound planter based on discrete element method (DEM)[J]. Agriculture, 2022, 12(4): 511.

[65] 王立宗, 廖庆喜, 张子龙, 等. 油菜高速直播机开畦沟装置刀组优化与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(3): 37 - 49.
Wang Lizong, Liao Qingxi, Zhang Zilong, et al. Optimization and experiments of the blade group of ditching devices in rapeseed direct seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(3): 37 - 49. (in Chinese)

[66] 刘晓鹏, 肖文立, 马磊, 等. 油菜联合直播机组合式船型开沟器设计与开沟质量试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 79 - 87.
Liu Xiaopeng, Xiao Wenli, Ma Lei, et al. Design and ditching quality experiment on combined ship type opener of direct rapeseed seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 79 - 87. (in Chinese)

[67] 卜祥利, 廖庆喜, 孙文成, 等. 油菜种床整备开畦沟仿靴形锐角开沟犁设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(2): 77 - 84.
Bu Xiangli, Liao Qingxi, Sun Wencheng, et al. Design and test of a boot-like acute angle furrow plough for preparing ditch of rapeseed seedbed[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(2): 77 - 84. (in Chinese)

[68] 顾昕. 稻茬油菜直播机中置式畦沟整备装置设计与试验[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2023.
Gu Xin. Design and experiment of intermediate furrow preparation device for rice stubble rape streamer[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[69] Wang Q Y, Peng M, He J, et al. Design and experiment of the ditching device for wheat seeders capable of ditching sloped drainage furrows in rice-wheat rotation areas[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2025, 18(1): 154 - 164.

[70] 邓玮鸿. 油菜秸秆粉碎旋耕埋覆还田机设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
Deng Weihong. Design and experiment of rapeseed straw crush rotary tillage and burial returning machine[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[71] 谢昊明. 驱动型犁旋联合耕整机改进设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
Xie Haoming. Improvement design and experiment of driven disc plough-rotary combined tiller[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[72] 石俊阳, 何瑞银, 陶菘奎, 等. 犁旋平复式耕整机设计与作业参数优化[J]. 南京农业大学学报, 2025, 48(3): 686 - 700.
Shi Junyang, He Ruiyin, Tao Songkui, et al. Design and operation parameter optimization of plowing-rotary-leveling compound tiller[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2025, 48(3): 686 - 700. (in Chinese)

[73] 周华. 稻油轮作区秸秆还田深旋埋联合耕整机试验与仿真研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
Zhou Hua. Experimental and simulation study on combined tillage machine for deep rotary burying of straw incorporation into soil in rice-rape rotation area[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[74] 廖庆喜, 林建新, 张青松, 等. 稻油轮作区铲锹式油菜直播种床整备机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 26 - 35.
Liao Qingxi, Lin Jianxin, Zhang Qingsong, et al. Design and experiment of shovel type seedbed preparation machine suitable

for rapeseed direct seeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 26 – 35. (in Chinese)

[75] 张秀梅. 高茬秸秆还田旋耕机工作机理与试验研究[D]. 武汉：华中农业大学, 2017.
Zhang Xiumei. Study on working mechanism and experimental of rotary tiller for high straw returning[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[76] 包攀峰, 吴明亮, 官春云, 等. 犁旋组合式油菜播种开沟起垄装置设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(20): 23 – 31.
Bao Panfeng, Wu Mingliang, Guan Chunyun, et al. Design of plow-rotary style ditching and ridging device for rapeseed seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20): 23 – 31. (in Chinese)

[77] 何瑞银, 刘枭枫, 李毅念, 等. 小麦复式播种机种床构建装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(8): 239 – 251.
He Ruiyin, Liu Xiaofeng, Li Yinian, et al. Design and experiment of seedbed construction device for wheat compound seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(8): 239 – 251. (in Chinese)

[78] 边祺旺. 油菜直播机触土关键部件设计与试验[D]. 武汉：华中农业大学, 2023.
Bian Qiwang. Design and experiment of key components of rapeseed direct seeding machine touching soil[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[79] 魏国梁, 张青松, 刘立超, 等. 犁旋组合式油菜直播机扣垡装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 38 – 46.
Wei Guoliang, Zhang Qingsong, Liu Lichao, et al. Design and experiment of plowing and rotary tillage buckle device for rapeseed direct seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 38 – 46. (in Chinese)

[80] 陶菘奎. 犁翻旋耕平整一体机的设计与试验[D]. 南京：南京农业大学, 2022.
Tao Songkui. Design and experiment of plough turning and leveling machine[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[81] 秦宽, 丁为民, 方志超, 等. 犁翻旋耕复式作业耕整机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 7 – 16.
Qin Kuan, Ding Weimin, Fang Zhichao, et al. Design and experiment of plowing and rotary tillage combined machine[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16): 7 – 16. (in Chinese)

[82] 肖文芳, 舒彩霞, 廖庆喜, 等. 犁旋组合式稻茬全量还田油菜直播种床整理机设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2019, 38(6): 139 – 146.
Xiao Wenfang, Shu Caixia, Liao Qingxi, et al. Design and test of tillage machine combined with plough and rotary for managing seedbed before planting rapeseed by burying of rice straw incorporated into soil[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(6): 139 – 146. (in Chinese)

[83] 丁启朔, 葛双洋, 任骏, 等. 水稻土深松阻力与土壤扰动效果研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 47 – 56.
Ding Qishuo, Ge Shuangyang, Ren Jun, et al. Characteristics of subsoiler traction and soil disturbance in paddy soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 47 – 56. (in Chinese)

[84] 陈硕, 刘伟琦, 郑嘉成, 等. 基于振动深松试验台的深松工作参数优化试验[J]. 江西农业大学学报, 2025, 47(4): 1120 – 1130.
Chen Shuo, Liu Weiqi, Zheng Jiacheng, et al. Optimization testing of subsoiling working parameters for vibration deep loose test-bed[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2025, 47(4): 1120 – 1130. (in Chinese)

[85] 许行行, 刘伟琦, 陈硕, 等. 深松作业质量监测系统设计与试验[J]. 农机化研究, 2025, 47(10): 205 – 211.
Xu Hanghang, Liu Weiqi, Chen Shuo, et al. Design and experiment of quality monitoring system for subsoiling operations[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(10): 205 – 211. (in Chinese)

[86] 王元俊. 切振共作深松机开发与试验研究[D]. 重庆：西南大学, 2025.
Wang Yuanjun. Development and experimental research of shear vibration co-working subsoiler[D]. Chongqing: Southwest University, 2025. (in Chinese)

[87] 梁志杰, 王勋, 王云霞. 自激振动深松机液压系统设计与调控策略研究[J]. 机械设计与制造, 2025, 45(11): 49 – 54.
Liang Zhijie, Wang Xun, Wang Yunxia. Research on hydraulic system and control strategy of self-excited vibration subsoiler [J]. Machinery Design & Manufacture, 2025, 45(11): 49 – 54. (in Chinese)

[88] 汪小旦, 李成光, 杨振杰, 等. 移动式土壤旋耕蒸汽消毒机的研制[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 18 – 24.
Wang Xiaochan, Li Chengguang, Yang Zhenjie, et al. Development of mobile soil rotary steam disinfection machine[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(2): 18 – 24. (in Chinese)

[89] Gao J, Shen Y, Ma B. Optimized design of touching parts of soil disinfection machine based on strain sensing and discrete element simulation[J]. Sensors, 2023, 23(14): 6369.

[90] 张爱琪, 许林云, 金晶, 等. 土壤蒸汽消毒机的脉动燃烧器喷管结构及工作特性[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(2): 92 – 99.
Zhang Aiqi, Xu Linyun, Jin Jing, et al. Structure and working characteristics of pulsating burner nozzle for soil steam sterilizer [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2024, 50(2): 92 – 99. (in Chinese)

[91] 王东. 间歇移动式土壤蒸汽消毒装置的设计与研究[D]. 昆明：云南农业大学, 2024.
Wang Dong. Design and research of intermittent mobile soil steam disinfection device[D]. Kunming: Yunnan Agricultural

University, 2024. (in Chinese)

[92] 陶丽欢, 刘元义, 毕玉亮, 等. 基于臭氧杀菌技术的旋耕式土壤消毒机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(4): 244 - 249, 265.
Tao Lihuan, Liu Yuanyi, Bi Yuliang, et al. Design and test of rotary tillage soil disinfection machine based on ozone sterilization technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(4): 244 - 249, 265. (in Chinese)

[93] 高建民, 艾安君, 刘兴达, 等. 深旋耕土壤高速气雾消毒联合作业机研制与试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2022, 43(4): 416 - 423.
Gao Jianmin, Ai Anjun, Liu Xingda, et al. Development and test of high-speed aerosol disinfection machine by deep rotary tillage method[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2022, 43(4): 416 - 423. (in Chinese)

[94] Obour P B, Keller T, Jensen J L, et al. Soil water contents for tillage: a comparison of approaches and consequences for the number of workable days[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 195:104384.

[95] 徐高明, 丁启朔, 汪小旦, 等. 秸秆-土壤-旋耕机交互下秸秆位移与埋覆效果研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 23 - 29.
Xu Gaoming, Ding Qishuo, Wang Xiaochan, et al. Analysis of straw displacement and burying effect in straw - soil - rotary tiller interaction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 23 - 29. (in Chinese)

[96] Jasoliya D, Untaroiu A, Untaroiu C. A review of soil modeling for numerical simulations of soil-tire/agricultural tools interaction[J]. Journal of Terramechanics, 2024, 111:41 - 64.

[97] Lin J X, Liao Q X, Wang X F, et al. Exploring straw movement through the simulation of shovel-type seedbed preparation machine-straw-soil interaction using the DEM - MBD coupling method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 226:109465.

[98] 康艳, 廖庆喜, 林建新, 等. 基于联合收获机平台的覆秸式油菜联合播种机研制[J]. 农业工程学报, 2024, 40(9): 15 - 25.
Kang Yan, Liao Qingxi, Lin Jianxin, et al. Development of the rapeseed direct seeding machine with stubble covering based on combined harvesting machine platform[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(9): 15 - 25. (in Chinese)

[99] Li W, Gu J, Liu J, et al. A review of key technological developments in autonomous unmanned operation systems for agriculture in China[J]. AgriEngineering, 2025, 7(3):71.

[100] Deng Y, Zhang W, Qi B, et al. Research progress and prospects of intelligent measurement and control technology for tillage depth in subsoiling operations[J]. Sensors, 2025, 25(12):3821.

[101] 陈伟, 张晓, 袁栋, 等. 农田耕整载荷六维力传感器结构优化与解耦研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 28 - 35.
Chen Wei, Zhang Xiao, Yuan Dong, et al. Structural optimization and decoupling of six dimensional force sensor for farmland tillage load[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 28 - 35. (in Chinese)

[102] Yazici A. Wear on steel tillage tools: a review of material, soil and dynamic conditions[J]. Soil and Tillage Research, 2024, 242:106161.

[103] Guo Y, Jin Y, Wang Z, et al. Research on a novel heat treatment process for boron steel used for soil-engaging components of tillage machinery[J]. Agriculture, 2024, 14(9):1555.