doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.04.001

东北黑土地保护性用养技术与装备研究进展

王春雷[1,2]　刘　冲[1,2]　林东洪[1,2]　刘忠军[1,2]　刘立晶[1,2]　唐　汉[3]

(1.中国农业机械化科学研究院集团有限公司,北京 100083;2.农业装备技术全国重点实验室,北京 100083;
3.东北农业大学工程学院,哈尔滨 150030)

摘要:东北黑土地保护性用养技术主要包括保护性耕作和地力培育等技术。本文在综述保护性用养技术应用面积、技术模式和实施效应的基础上,重点阐述了免少耕播种、深松、秸秆还田和有机肥施用关键技术的工作原理、技术特点,并分析归纳了现有保护性用养技术模式及配套机具的发展动态。结合黑土地保护与利用的研究进展与发展需求,在厘清当前黑土地保护性用养技术与机具发展存在的主要问题基础上,从加强基础理论研究、突破关键技术瓶颈、提升保护性用养技术与机具智能化、加强农机农艺融合和因地制宜发展黑土地保护性用养技术体系等方面展望了未来的发展方向。

关键词:黑土地;保护性耕作;免少耕播种;深松;地力培育

中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)04-0001-21　　**OSID**:

Research Progress of Protective Utilization and Maintenance Technology and Machine in Northeast Black Land of China

WANG Chunlei[1,2]　LIU Chong[1,2]　LIN Donghong[1,2]　LIU Zhongjun[1,2]　LIU Lijing[1,2]　TANG Han[3]

(1. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing* 100083, *China*
2. *State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology*, *Beijing* 100083, *China*
3. *College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: The protective utilization and cultivation technology system for Northeast China's black soil region primarily encompasses conservation tillage and soil fertility cultivation practices. While developing black soil agricultural production and ensuring national food security, this technology can solidify soil and improve soil properties, maintain ecosystem health and stability. It is the core technical means to promote the protection and utilization of black soil. The application coverage, technical frameworks, and implementation impacts of protective utilization and cultivation technology system for Northeast China's black soil region were systematically reviewed. It specifically elucidated the operational mechanisms and technical characteristics of core technologies, including no/minimum tillage seeding, subsoil, straw mulching, and organic fertilizer application, while critically analyzing the developmental trajectories of existing technical paradigms and associated machinery systems. Building upon advancements and demands in black soil conservation and utilization, the key challenges in current technological and mechanization development were identified. Finally, it proposed future directions from multiple dimensions: strengthening fundamental theoretical research, overcoming critical technical bottlenecks, advancing intelligent conservation-oriented systems, enhancing agronomic-mechanization integration, and establishing regionally adaptive protective utilization and cultivation technology system frameworks. These insights aimed to inform the optimization of protective utilization and cultivation technology system for Northeast China's black soil region.

Key words: black land; conservation tillage; no/minimum tillage seeding; subsoil; soil fertility cultivation

收稿日期:2025-01-24　修回日期:2025-03-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD1500400)和中国机械工业集团有限公司基金项目(QNJJ-PY-2022-05)

作者简介:王春雷(1994—),男,博士后,主要从事种植机械化技术与装备研究,E-mail:wangchunlei@swu.edu.cn

通信作者:刘立晶(1976—),女,研究员,博士生导师,主要从事种植机械技术与装备研究,E-mail:xyliulj@sina.com

0 引言

东北黑土地是我国重要的粮食生产和输出基地,在国家粮食生产体系中发挥着“稳压器”和“压舱石”的作用[1]。然而,长期不合理的耕作方式和高强度的重用轻养做法导致土壤健康严重透支,黑土地“变薄”、“变瘦”、“变硬”等问题日益突出,阻碍了作物生长发育与农业可持续发展,严重威胁国家粮食和地区生态安全[2-3]。我国耕地资源稀缺,无法实行休耕措施保护黑土地,为此,国家和地方政府近年来出台了系列政策[4-8],大力推动实施黑土地保护与利用国家行动,并于 2022 年颁布了《中华人民共和国黑土地保护法》,强化用好养好黑土地。

保护性用养是一种以保护性耕作(免少耕播种、深松)和地力培育(作物秸秆还田、有机肥施用等)为核心内容的现代农业技术[9-10]。其通过协同利用上述技术,有效突破传统耕作重用轻养的局限,实现黑土利用与保护,近年来在东北黑土区得到大面积应用。东北地区位于高纬度寒区,秸秆腐解慢,覆盖地表时易致低温冷害,且覆盖量大会影响免少耕播种机的通过性[11];同时,黑土区机械化作业水平较高,土壤压实板结严重,加之肥料、农药粗放施用导致土壤结构遭到破坏,耕地肥力下降等,严重影响播种质量及作物生长发育[12-13]。因此,如何处理作物秸秆、整备种床、改善土层结构、培肥地力成为黑土地保护性用养技术高质高效实施的难点与重点。

目前,针对黑土地保护性用养技术的研究主要集中在免少耕播种、深松和地力培育等方面。其中,免少耕播种主要是清洁种床整备及精密播种;深松主要涉及触土部件减阻脱附和联合作业机具;地力培育主要围绕秸秆还田、有机肥施用展开研究[14-15]。因此,本文在总结归纳东北黑土地保护性用养概况的基础上,系统阐述免少耕播种、深松和地力培育等主要技术的原理、特点,厘清相关机具的研究进展和存在问题,展望黑土地保护性用养技术的发展趋势,为我国东北黑土地保护与利用提供参考,总体框架如图 1 所示。

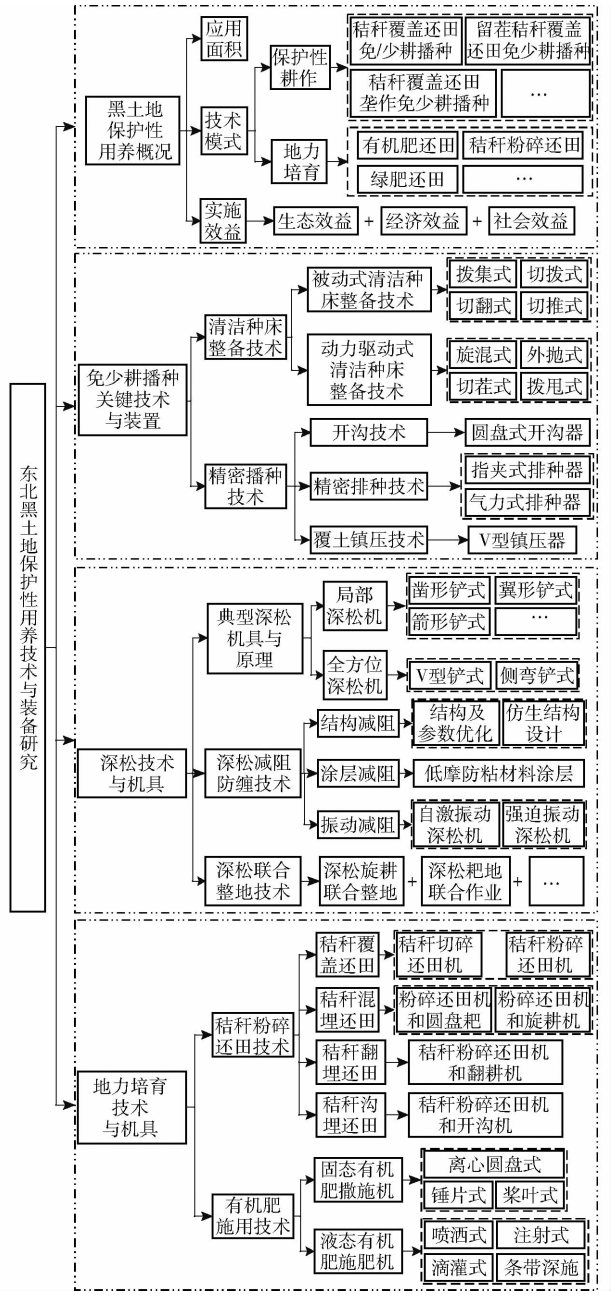


图 1 东北黑土地保护性用养技术与机具研究总体框图

Fig. 1 Overall framework of research on protective utilization and maintenance technology in northeast black land of China

1 东北黑土地保护性用养概况

《东北黑土地保护规划纲要(2017—2030 年)》(以下简称《规划纲要》)明确定义黑土是拥有黑色或暗黑色腐殖质表土层的土壤,被誉为“耕地中的大熊猫”,是一种性状好、肥力高、适宜农耕的优质土地[16]。中国东北地区是世界主要黑土带之一,典型黑土区耕地面积约 1.85×10^7 hm^2,土壤类型主要包括黑土、黑钙土、白浆土、草甸土、暗棕壤、棕壤等,主要分布在三江平原、松嫩平原、大兴安岭东南麓、长白山-辽东丘陵、辽河平原等地区[17]。《规划纲要》明确指出,到 2030 年,在东北地区实施黑土地保护面积 1.67×10^7 hm^2。内蒙古自治区 1.4×10^6 hm^2,黑龙江省 9.87×10^6 hm^2,吉林省 4.13×10^6 hm^2,辽宁省 1.27×10^6 hm^2。

1.1 黑土地保护性用养应用面积

目前,黑土地保护性用养的应用面积主要是通过保护性耕作面积体现的。该技术对农田实行免

耕、少耕，并充分利用作物秸秆、残茬等自然条件覆盖地表，能够减少土壤风蚀和水蚀、提高地力与粮食产量，有助于促进农业可持续发展和生态环境保护[18]。根据全国农业机械化统计年报，东北四省（区）在 2009—2019 年期间的保护性耕作平均实施面积超过 3.43×10^6 hm^2，但年度实施面积变化表现为先增大后减小[19]。自 2020 年起，国家将黑土地保护纳入国家粮食安全战略核心议程，我国黑土地保护与利用政策体系逐步升级，在《规划纲要》基础上又相继颁布《东北黑土地保护性耕作行动计划（2020—2025 年）》、《国家黑土地保护工程实施方案（2021—2025 年）》、《中华人民共和国黑土地保护法》等专项政策及法律[4-8,16-17]。制度体系的完善显著加速了保护性耕作技术的推广应用。四省（区）2020—2024 年保护性耕作实施面积分别超过 3.07×10^6、4.8×10^6、5.53×10^6、6×10^6、7.47×10^6 hm^2，年均复合增长率达 24.9%，并且明确到 2025 年实施保护性耕作面积达到 9.33×10^6 hm^2，与 2024 年相比，增长率为 25%[4,20-21]。

1.2　黑土地保护性用养技术模式

黑土地保护性用养技术主要以实现粮食稳产高产、地力保育提升、区域生态有序恢复等共赢为原则。近些年在国家黑土地保护与利用行动计划推动下，结合三江平原区、松嫩平原区、大兴安岭东南麓区、长白山-辽东丘陵山区、辽河平原区等黑土区不同的自然条件、地形地貌、土壤类型、种植制度、土壤退化突出问题等，形成了多种相适宜的黑土地保护与利用技术模式，其中所涉及的典型黑土地保护性耕作和地力培育技术模式如表 1 所示[14,17,22]。

1.3　黑土地保护性用养实施效应

国内外研究表明，保护性用养技术对推动黑土地从“重用轻养”向“用养并重”发展具有重要意义，实施效应包括生态效益、经济效益和社会效益 3 方面。

（1）生态效益

黑土地保护性用养采取秸秆覆盖免少耕播种、秸秆/有机肥还田和深松作业，多年的试验结果证明该技术能够实现以下生态效益：①有效防止土壤流失，降低土壤水蚀造成的土壤流失 98% 以上，减少水土流失量最高达 80 t/（hm^2·a），降低土壤风蚀导致的土壤蠕移量、跃移量和沉降量分别为 39.41%、13.11% 和 40%[23-24]。②改善土壤物理特性，降低 0 ~ 30 cm 耕层内土壤的紧实度和容重分别超过 20%、5.76%[14,25]；促进黑土大团聚体（粒径大于 2 mm）形成，降低微团聚体（粒径小于 0.25 mm）含量，使耕作层土壤平均等效直径、水稳定性大团聚体含量分别增加 11.8% 和 16.21% 以上[26-27]。③提升黑土蓄水保墒效果，降低表层土壤流失和水分蒸发，增加 9.68% ~ 11.22% 的土壤大孔隙（等效直径 100 μm 以上）含量和 160% 以上的土壤入渗率，使土壤透气/水性变好，持水保水能力增强，作物生育期土壤含水量和利用率分别提高 15% ~ 25% 和 7.24%[28-29]。④改善土壤化学特性，通过秸秆/有机肥还田增加碳源，免少耕播种减少土壤扰动，有效降低有机质矿化分解，并提高土壤有机质含量[30-31]。保护性用养连续实施 5、10、15 a 后，分别增加表层（0 ~ 5 cm）土壤有机质 10%、21% 和 52%，0 ~ 20 cm 黑土层氮/磷/钾、速效氮/磷/钾提高 5% ~ 30%（与有机质含量增幅相关）[32-33]。⑤提高土壤生物多样性，保护性用养连续实施超过 10 a 后，黑土层中蚯蚓、线虫及微生物等生物的物种丰富度、密度及生物量分别提高 10% ~ 20%、20% ~ 40% 和 40% ~ 60%，有利于改善土壤结构、提高有机质和养分含量、抑制病虫害、促进能量流动与物质循环、提高作物产量，维持区域生态系统健康与稳定[34-35]。⑥降低黑土压实板结，保护性用养可减少机械进地次数，并通过改善黑土物理、化学和生物特性，以及秸秆覆盖等显著增强土壤抗压实能力和回弹性能，从而降低压实风险[14]。

（2）经济效益

相较于传统耕作，保护性用养实施的经济效益主要体现在稳定/增加作物产量和节约生产成本两方面。保护性用养对作物产量的影响与气候条件、地形、土壤特性等有关，丰水年和平水年可提高出苗率 5% ~ 10%，增加作物产量 0 ~ 20%[14]；极端气候条件下具有较强的抗灾害优势，能够实现作物稳产或增产 16.2% ~ 47.4%[36]；保护性用养可减少作业工序 2 ~ 3 次，显著降低燃油消耗和人工费用（降低幅度约 50%），增收 1 050 ~ 1 800 元/hm^2[11]。

（3）社会效益

黑土地保护性用养通过秸秆残茬覆盖降低地表风速和固土，能够有效减少地表水分蒸发和农田土粒运动、飞扬，达到减少土壤风蚀和抑制沙尘暴效果；同时，通过免少耕和秸秆还田等减少秸秆焚烧，降低 CO_2 排放、增强土壤碳收集量，提高东北黑土区减碳效益，降低大气污染[37]。保护性用养连续实施 10 a 后，降低 CO_2 年均排放量约 10%，减少碳足迹（粮食生产的净碳排放）50% ~ 80%[38]。

实践证明，黑土地保护性用养技术在固土、改善土壤理化与生物特性、蓄水保墒、地力保育、环境保护、节本增收等方面表现出其他生产方式不可替代的优势，具有良好的生态、经济及社会效益，对推动

表 1 黑土地保护性用养典型技术模式

Tab. 1 Typical technical mode of utilization and cultivation of black land protection

用养类型	模式名称	技术特点	适宜区域
保护性耕作	秸秆覆盖还田免耕播种[9]	秋季作物机械收获后,将秸秆直接全量/部分覆盖地表,当年或翌年用秸秆集行机、灭茬机等处理秸秆,通过免耕播种机直接播种,包括等行距、宽窄行和二比空等种植模式	松嫩平原南部、西部风蚀黑土区;辽河平原西部、北部黑土区;长白山-辽东丘陵水蚀黑土区;大小兴安岭沿麓黑土区等
	秸秆覆盖还田少耕播种[11]	在秸秆全量/部分覆盖地表前提下,通过条带耕作/灭茬、圆盘耙等进行苗带秸秆处理,然后免耕播种;或秸秆处理、免耕播种同步完成	松嫩平原南部、西部风蚀黑土区;辽河平原西部、北部黑土区;长白山-辽东丘陵水蚀黑土区;大小兴安岭沿麓退化黑土区等
	秸秆覆盖还田垄作免少耕播种[13]	在起垄种植田块,秋季收获后将秸秆覆盖在垄沟,春季进行垄上灭茬和免少耕播种,若不灭茬则进行垄侧免少耕播种,苗期进行中耕培垄	松嫩平原南部、西部风蚀黑土区
	留茬秸秆覆盖还田免少耕播种[8]	秋季作物收获时保留根茬(高度 25 cm 以上),上部秸秆全量/部分覆盖地表,春季时根据土壤墒情选择性进行免少耕播种或错行免少耕播种	松嫩平原南部、西部风蚀黑土区;大兴安岭东/东南麓及大小兴安岭沿麓黑土区等
	秸秆覆盖轮作[12]	以秸秆覆盖玉米-大豆轮作为主,玉米收获后秸秆覆盖地表,翌年免少耕播种大豆,大豆收获后秸秆覆盖地表,翌年免少耕播种玉米	松嫩平原中东部、北部黑土区;三江平原黑土区;辽河平原中部、南部黑土区;大兴安岭东南麓及大小兴安岭沿麓黑土区等
	秸秆覆盖还田免少耕和深松整地[14]	秋季收获后作物秸秆全量/部分覆盖地表,翌年适时进行免少耕播种,同时根据土壤条件选择性的在收获后/播种前/苗期进行深松作业	松嫩平原南部、西部风蚀黑土区;辽河平原西部、北部黑土区;大兴安岭东/东南麓及大小兴安岭沿麓黑土区等
地力培育	秸秆深混还田[14]	秋季作物机械化收获后,通过秸秆粉碎机对秸秆进行二次粉碎,使其长度不超过 10 cm,粉碎长度合格率 90% 以上,利用翻转犁进行 30 ~ 35 cm 深度的秸秆深翻混埋作业,晒垡 3 ~ 5 d 后采用重耙以对角线方向耙地 2 次,旋耕起垄形成良好种床以待播种	松嫩平原中东部、南北部黑土区;三江平原黑土区;辽河平原黑土区;长白山-辽东丘陵酸化瘠薄黑土区;大兴安岭东南麓及沿麓黑土区等
	秸秆覆盖与混埋还田[5]	秋季作物收获后,根据土壤条件选择性进行秸秆粉碎(长度 0 ~ 10 cm)后均匀抛撒覆盖还田、秸秆粉碎条带覆盖还田、整秆覆盖还田、秸秆集行覆盖还田以及利用缺口重耙切碎秸秆并混拌到 0 ~ 20 cm 耕层中,平整地表至待播种状态	松嫩平原南部黑土区;辽河平原黑土区等
	有机肥还田[7]	秋季作物收获后,采用撒肥机撒施固态有机肥于地表,然后翻耕混埋至 30 ~ 35 cm 耕层,晒垡 3 ~ 5 d 后通过重耙呈对角线方向耙地 2 次,旋耕起垄、平整地表以待播种;液体有机肥可撒施于种植期、拔节期或大喇叭口期,若作为播种基肥需翻耕混拌于耕层中	松嫩平原中东部、北部黑土区;大小兴安岭沿麓退化黑土区等
	秸秆和有机肥深混还田[15]	秋季作物收获后,通过秸秆粉碎机对秸秆进行二次粉碎(长度 0 ~ 10 cm),采用撒肥机抛撒有机肥并将秸秆、有机肥翻耕至 30 ~ 35 cm 耕层,使其与土壤充分配伍,晒垡 3 ~ 5 d 后使用重耙以对角线方向耙地 2 次,利用旋耕机和镇压装置起垄、平整地表,形成良好种床以待播种	松嫩平原中东部、南北部黑土区;辽河平原中部、南部黑土区;大小兴安岭沿麓退化黑土区等
	绿肥还田[14]	通过人工或机械化生产绿肥,然后采用抛撒、翻耕机械等将绿肥直接或异地翻压或经堆沤后混埋到土层中,平整地表至待播种状态	大小兴安岭沿麓黑土区
	秸秆还田和深松整地[6]	秋季作物收获后,通过深松机疏松土壤、消除犁底层,再选择性进行秸秆全量深混还田、秸秆表层覆盖还田等作业	松嫩平原南部、西部风沙黑土区;辽河平原黑土区;长白山-辽东丘陵酸化瘠薄黑土区等

东北黑土区农业现代化建设,维持区域生态健康与稳定、实现农业可持续发展,加快乡村振兴等起到极大的促进作用。

2 黑土地免少耕播种关键技术与机具

免少耕播种是指直接在未翻耕或少量耕整的秸秆残茬覆盖地上进行播种作业。东北黑土区气候寒冷,种植方式以垄作为主,秸秆残茬覆盖地表易导致春季地温低、播种机通过困难,影响免少耕播种质量和出苗效果[11, 39]。并且开沟、排种、覆土镇压等播种环节的作业性能亦会影响播种质量。清洁种床整备和精密播种可有效解决上述问题,因此,重点综述两种技术的研究进展。

2.1 清洁种床整备技术与装置

清洁种床整备是实施免少耕播种的前提,按照作业原理分为被动式和动力驱动式清洁种床整备;

按照作业方式分为播前和播时清洁种床整备，其中前者为清洁种床整备、免少耕播种分步作业，后者则为复式作业。本文主要阐述归纳被动式和动力驱动式清洁种床整备技术与装置。

2.1.1　被动式清洁种床整备技术与装置

被动式清洁种床整备装置主要依靠拖拉机牵引力、机具自身重力、地表或秸秆摩擦力等进行滚转运动，将种床上秸秆、残茬清理到种床两侧并对表土进行免耕或微小耕整从而形成清洁的种床[40]。被动式清洁种床整备技术具有土壤扰动少、功耗低、作业效率高等优势，在秸秆部分覆盖还田情况下应用较多，根据原理主要分为“拨集”、“切拨”、“切翻”和“切推”等几种形式。

拨集式清洁种床整备技术是利用搂草指盘拨动秸秆，并归集到种床两侧，达到清洁种床整备效果[41]。该技术结构简单、清秸质量高、动力消耗少，根据安装位置可分为前置式和后置式搂草指盘，其中前置式可与免少耕播种机配套作业，一次便可完成清洁种床整备和免少耕播种作业。

切拨式清洁种床整备技术的工作原理是采用圆盘刀切断播种床上的秸秆、根茬，并通过拨草轮、清茬盘等将其拨移至种床两侧，实现清洁种床整备[42]。该技术在切断、拨离秸秆的同时，可切碎种床上的硬土层，有利于后续开沟、施肥及播种作业。

切翻式清洁种床整备技术是指利用凹面圆盘刀等将播种床上的秸秆、根茬及表土切开切断，并进行翻扣，从而创造出清洁种床[43]。该技术能够切断并翻埋秸秆、残茬，既可提高免少耕播种作业性能，又可加速秸秆腐解，还可防止秸秆被风再次吹回种床。

切推式清洁种床整备的工作原理是通过单个或多个偏置缺口圆盘刀切断播种床上的秸秆、根茬、表土等，同时将其推送至种床外以形成清洁种床[11]。该技术可同时清理秸秆，疏松表层土壤。

国外在被动式清洁种床整备方面研究较早，关键技术早已产品化，并得到大面积推广应用。John Deere、Case、Maschio 等企业的被动式清洁种床整备装置大多由圆盘刀、拨草指盘等组成，且都能保证良好的种床整备质量，但其体积与质量大，需通过大功率拖拉机牵引作业。国内学者开展了适用小规模地块的被动式清洁种床整备装置研究，林静等[43]设计阿基米德螺线锯齿型缺口圆盘破茬刀切碎秸秆、根茬，采用星型清垄轮拨动碎秸并侧推至两侧垄沟，形成垄上清洁种床。梁宁[44]开展圆盘刀切茬性能提升研究，设计一种适用东北免耕播种机的新型缺口圆盘刀，切茬性能较好。贾洪雷等[45]改进设计一种凹面爪式清茬机构，通过清茬轮爪向后抛送秸秆，凹面结构同时向侧方推移秸秆以实现种床整备。王奇等[46]设计一种星齿凹盘式清洁种床整备装置，通过星齿顺次切削实现断秆切茬，采用凹面结构提高碎秸抛掷初速度，确保其能被顺利清理至种床两侧。曹鑫鹏等[47]设计一种侧置切刀与拨茬齿盘组合切翻式种床整备装置，利用前者切碎种床中心右侧秸秆与硬土，后者将碎秸等沿齿盘凹面切线抛出种床并混埋。王加一等[48]设计一种随动自调刃口角式破茬刀，能够适应不同深度根茬和土壤，实现低阻力、深进给切割，清秸性能较好。高振等[49]设计一种协拨组合式种带秸秆清理装置，利用离散元分析优化清秸装置的结构与工作参数，秸秆清理与集行性能良好。

东北黑土区部分配备典型被动式清洁种床整备装置的免少耕播种机如表 2 所示。

2.1.2　动力驱动式清洁种床整备技术与装置

动力驱动式清洁种床整备技术的工作原理是利用拖拉机动力输出轴、液压马达或电机等提供动力，驱动清洁种床整备装置对播种床上秸秆、残茬及土壤等进行切割、粉碎作业，并将碎秸清理到播种床两侧，从而形成清洁的播种床[11, 53]。动力驱动式清洁种床整备装置按作业原理主要分为“旋混”、“外抛”、“切茬”和“拨甩”等几种形式。

旋混式清洁种床整备技术又称条带旋耕，是指通过安装在播种单体前方的旋耕刀或灭茬刀对播种床进行条带浅旋，切断、粉碎秸秆残茬并混埋于表层土壤，创造出清洁种床[54]。条带旋耕能够在切秸碎茬的同时疏松表土，通过将碎秸与土壤混拌有效降低播种床上秸秆覆盖率，加速秸秆腐解，近年来在东北黑土地应用较广泛。

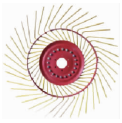
外抛式清洁种床整备技术包括“侧抛”和“碎抛”两类[11, 55]，前者是通过驱动开沟器前方的直刀、螺旋刀齿等循环击打、粉碎秸秆根茬，并将碎秸抛送到种床侧方；后者则是利用高速旋转的粉碎刀具将播种床上的秸秆残茬切断粉碎，并带动碎秸沿导向机构抛送至播种单体后方。外抛式清洁种床整备装置的刀具仅作用于地表秸秆与残茬，对土壤扰动小，且可将碎秸外抛至当前播种床外，实现高质量免少耕播种作业。

切茬式清洁种床整备技术是通过动力驱动切茬圆盘刀主动旋转，将秸秆、根茬切断并侧推到播种床两侧，同时切割播种床上硬土以疏松表层土壤，进而提高播种质量[53]。

拨甩式清洁种床整备技术是采用驱动弹齿、立刀等旋转运动，拨动秸秆并甩送至播种床两侧，适用全量或部分秸秆覆盖情况，但无法清理播种床上根

表 2 配备典型被动式清洁种床整备装置的免少耕播种机

Tab. 2 No-tillage planter equipped with typical passive clean seedbed preparation device

型号	类型	关键部件	总体结构	主要特点
配备秸秆集行装置的免耕播种机[50]	拨集式			采用“搂草指盘前置+免耕播种机后置”安装方式,适用于秸秆全量或部分覆盖还田的作业条件,搂草指盘个数 2~8,直径 1 m,清理播种带数量 1~4,播种行数 1~4,配套动力大于等于 15 kW,作业速度 8~12 km/h,生产率 0.5~4.0 hm^2/h
2BMG 系列免耕播种机[51]	切拨式			整机采用牵引方式作业,开沟装置前方设置有“单圆盘+星型拨草轮”组合切拨式种床整备装置,作业行数 2~6,作业行距 550~700 mm,播种深度 20~80 mm,配套动力 26.1~89.48 kW,作业速度 6~8 km/h,作业效率 0.5~2.4 hm^2/h
2BMY 系列免耕播种机[52]	切拨式			整机采用牵引方式作业,开沟装置前方设置有“波纹圆盘+双渐开线星轮”组合切拨式清洁种床整备装置,作业行数 2~4,作业行距 400~650 mm,播种深度 30~80 mm,配套动力 25.7~59.66 kW,作业速度 6~8 km/h,作业效率 0.5~1.2 hm^2/h
2BMZF-5 型垄作免耕播种机[11]	切翻式			整机采用悬挂方式作业,开沟器前方设置有切翻式清洁种床整备装置,平面圆盘切断秸秆根茬后,通过两侧的凹面圆盘将碎秸侧翻至垄沟,形成垄台清洁的 W 形种床,作业行数 5,行距 560~700 mm,作业速度 4~7 km/h

茬,需配套破茬开沟装置实现免少耕播种作业[56]。

科研工作者在东北黑土区动力驱动式清洁种床整备技术与装置方面的研究较多,主要聚焦于减少秸秆全量覆盖还田条件下播种床上的秸秆量。陈海涛等[57]设计一种适用大垄密植原茬地免耕播种的侧抛式清秸装置,通过多组旋转刀齿循环击打、粉碎秸秆与根茬,并运输、抛撒至播种床侧方。贾洪雷等[58]基于蝗虫口器结构和咬合方式设计一种动态仿生种床整备装置,可实现高效破茬作业。于畅畅等[59]设计一种缺口圆盘与螺旋清茬刀组合的种带清理装置,缺口圆盘切割秸秆与根茬后由清茬刀将其运送到播种带两侧,实现清洁种床整备。曹鑫鹏等[60]设计一种适用秸秆全量覆盖还田条件下的清秸装置,利用电机带动清秸弹齿高速旋转,将播种单体前方秸秆拨甩归集至两侧,形成清洁种床。于文一[61]研制一种缺口双圆盘刀和导草机构组合的种床整备装置,能够对地表秸秆进行有效切割、抛撒和分流,作业效果较好。李向军等[62]设计一种垄台种床整备装置,通过动力驱动拨草轮将秸秆拨至垄沟,并对垄台进行条带浅旋以疏松土壤,形成疏松清洁的种床。王加一等[63]设计一种用于垄台条带旋耕的驱动破茬刀,可有效降低作业阻力并提高破茬效果。东北黑土区部分配备典型动力驱动式清洁种床整备装置的免少耕播种机如表 3 所示。

2.2 精密播种技术与装置

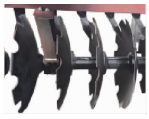
清洁种床整备是免少耕播种作业成功的先决条件,而高质量、高效率播种亦是免少耕播种顺利实施的重要技术保障。精密播种是当前东北黑土区免少耕播种广泛采用的播种技术,其原理是按照农艺要求的株距、播深将种子精准地播到田间,达到种子株距、播深及行距在耕层三维空间中均匀一致,实现苗齐、苗壮、苗全[67]。该技术不仅可增加作物产量,而且可以减少化肥和良种用量、降低生产成本。根据工作原理与作业环节,主要分为开沟、排种、覆土镇压等技术。

开沟是播种作业的首要步骤,其深度、宽度及深度一致性等关键参数性能直接影响施肥、播种作业质量[68]。东北黑土地免少耕播种应用较多的开沟装置是圆盘式开沟器,其防堵能力优良,能够有效避免种床整备后残留秸秆干扰,进而保证开沟质量[11]。目前,东北黑土区免少耕精密播种开沟技术与装置的研究,主要集中在提升开沟装置破茬入土性能、降低开沟阻力、减少土壤扰动和提高开沟深度一致性等方面。

精密排种器是精密播种技术的核心,工作原理是通过充种、清种、携种和投种等过程将种群定量分离,形成均匀有序种子流后单粒排出,达到精密排种目的[69]。目前在东北黑土区应用较多的精密排种器主要是机械式和气力式两种类型[70],其中前者包括勺轮式、指夹式等类型;后者分为气吸式和气压式两种类型,因其具有排种精度高、种子损伤低且适用

表 3　配备典型动力驱动式清洁种床整备装置的免少耕播种机

Tab. 3　No-tillage planter equipped with typical power-driven clean seedbed preparation device

型号	类型	关键部件	总体结构	主要特点
2BYFT 系列免少耕施肥播种机[64]	旋混式			采用悬挂式作业，通过条带旋耕装置进行清秸种床整备，双圆盘开沟器开沟，播种行数 3/4，配套动力 22.1 ~ 51.5 kW，作业行距 600 mm，作业速度 2 ~ 5 km/h，生产率 0.29 ~ 0.96 hm^2/h
2BMQY 系列免耕播种机[65]	旋混式			采用牵引式作业，通过条带旋耕实现清洁种床整备，锄铲开沟器开沟后进行播种，作业行数 2/4，作业行距 650 mm，配套动力 44.1 ~ 88.2 kW，作业速度 3 ~ 6 km/h，作业效率 0.39 ~ 1.56 hm^2/h
2BMFJ 系列免耕覆秸播种机[66]	侧抛式			采用悬挂式作业，利用清秸装置处理种床上秸秆、根茬并均匀抛撒到机具两侧，然后依次进行施肥、播种，可实现已播地表残茬均匀覆盖，适用秸秆全量或部分还田，作业行数2 ~ 8（玉米）或 4 ~ 16（大豆），配套动力 29.6 ~ 162.8 kW，作业速度小于 10 km/h
2BDPM - 12 型免耕播种机[53]	切茬式			采用悬挂式作业，通过拖拉机动力输出轴驱动开沟器前方的斜置凹面圆盘刀旋转，切碎秸秆根茬并推移至种床外，圆盘刀直径 403 mm，玉米播种行数 6，行距 545 mm，生产效率 0.43 ~ 0.86 hm^2/h

高速（大于 10 km/h）作业等优势，在大型合作社和农场中应用较多。

覆土镇压是指利用适量土壤将种沟内种子均匀严密覆盖，并施加适宜强度的压力，促使种子与周围湿润土壤密切接触，达到供墒、提墒和保墒效果[71]。覆土镇压作为精密播种的必要环节，其作业性能对种子分布均匀性、出苗、生长及产量等有重要影响。目前，东北黑土区免少耕播种的覆土镇压作业普遍采用 V 型镇压器完成，该装置具有结构简单、作业效率高等优点。

国外在精密播种方面的研究较早，经过多年研究积累，已形成成熟的技术体系与产品系列，特别是在高速电驱气力式精密播种领域处于领先地位。国外知名农机企业 Horsch、Amazone、Kverneland 等综合考虑农艺要求、土壤类型及免耕播种机整体结构与功能等因素，目前研发形成的系列免耕精密播种机，能够实现高速作业，并且可精准监控播种深度、排种均匀性等作业参数，保证精密播种作业质量，目前在我国东北地区有少量应用。

东北黑土区免耕精密播种方面的研究较多，尤其是针对免少耕地表不平、土壤紧实度较高易造成排种器振动，制约播种作业速度和作业质量等问题。在精密排种器及播种机振动特性规律研究方面，王奇等[72]探究了指夹式排种器及免耕播种机在免耕地表作业时的振动特性研究；刘虎等[73]研究了气吸式精量排种器自振特性及其对地表激励的振动响应规律。在免耕精密播种机优化设计方面，侯守印等[74]优化设计了一种柔性清护种机械式精量排种器，可降低免耕播种作业时沙土和碎秸等对排种质量的影响。陈永亮[75]针对高速免耕播种时机具振动加剧、播种质量降低等问题，通过离散元、有限元分析等优化播种单体结构与工作参数，以提升播种性能。林震[76]结合磁力排种技术设计了一种磁力指夹式排种器，可有效克服免耕作业时地表振动对排种作业的影响，提高排种性能。此外，近年来学者、农机企业等正在研究推广应用电驱气力式精密播种、高速防粘防堵和智能化等技术，以提高免少耕播种作业质量和效率，促进农业生产规模化。

东北黑土区典型免少耕精密播种机如表 4 所示。

3　深松技术与机具

农业机械化程度的不断提升和长期不合理的开垦利用等，导致土壤产生严重的压实板结现象，不利于作物根系吸收水分、养分，严重影响作物生长及产量[3, 9]。深松技术能够有效解决上述问题，是指在不破坏土层垂直结构、不翻转土壤前提下，通过深松机打破土壤紧实结构、疏松土壤的一项机械技术[53]。相关研究表明，深松能够改善土壤结构，降低土壤容重和土壤紧实度，增加土壤孔隙度，提高土壤水分入渗率和利用率，减少水土流失，并为作物生长提供优良的种床环境[81]。因此，深松作为一种重要的土壤保育耕作技术，目前已经在东北黑土区农业生产中得到广泛应用推广。

3.1　典型深松机具与原理

深松技术主要依靠深松机完成，其关键作业部

表 4 典型免少耕精密播种机

Tab. 4 Typical no-tillage precision seeder

型号	排种器类型	总体结构	技术特点
2BMQ 系列免耕精量播种机[77]	机械传动指夹式		采用牵引式作业方式,驱动方式为地轮与链条组合传动,通过组合圆盘和轮齿式破茬拨草盘实现垄台种床整备,作业行数 2/4/5/6,配套动力 37.28 ~ 118 kW,作业速度 6 ~ 8 km/h,作业行距 400 ~ 700 mm,作业效率 0.6 ~ 3 hm^2/h
2BMQ 系列免耕气吸式播种机[78]	机械传动气吸式		采用悬挂式作业方式,通过拖拉机后输出轴驱动风机,独立传动轮驱动排种器,切拨式清洁种床整备装置清理种床,双圆盘开沟器开沟,作业行数 4/5/6/7/8,配套动力 29.4 ~ 132.4 kW,作业速度 8 ~ 10 km/h,作业行距 550 ~ 650 mm
2BMZF 系列免耕精量播种机[79]	机械传动指夹式		采用牵引式作业方式,驱动方式为地轮与链条组合传动,通过组合圆盘和轮齿式破茬拨草盘实现垄台种床整备,作业行数 2 ~ 7,配套动力 29.4 ~ 132.4 kW,作业速度 6 ~ 8 km/h,作业行距 500 ~ 670 mm,作业效率 0.48 ~ 3.92 hm^2/h
Maestro TX 系列免耕精量播种机[80]	电驱传动气压式		采用悬挂式作业方式,电驱传动气压排种,并利用高速气流实现精准投种,播种下压力、施肥量与作业速度等实时监控,可实现玉米、大豆等高速精量播种,作业行数 6 ~ 7,配套动力大于 95 kW,作业速度 6 ~ 15 km/h,作业行距 450 ~ 800 mm

件是深松铲,作业时利用拖拉机牵引向前运动,并对犁底层进行切削达到疏松土壤的目的。根据深松铲的工作原理和结构分为局部深松机、全方位深松机。

局部深松机通过铲尖对土壤挤压、上抬作用,以及铲柄刃部对土壤的切割作用达到松碎土壤、构建虚实并存耕层的效果。立柱式深松铲作为局部深松机的关键部件,包括铲柄与铲尖两部分,铲柄一般分为弯弧式、直立式、倾斜式 3 种型式,且其运动方向的投影总是与地表垂直[82]。铲尖一般分为凿形、箭形、鹅掌形和双翼形等型式,其中凿形铲尖与铲柄的宽度相近,但作业时工作阻力较小;而箭形、鹅掌形与双翼形铲尖宽度较大,通常用于中耕时的土壤疏松作业[83]。

全方位深松机利用深松铲从土层中切离出梯形截面土垡并回铺到田中,形成适于作物生长的“上虚下实且紧层下方有鼠道”的土层结构,实现全面深松的目的[84]。全方位深松机主要分为 V 型铲式和侧弯铲式两种,前者由底刀和 2 个左右对称布置的侧刀组成;后者采用 L 形侧弯铲,其铲尖安装在侧弯铲倾斜侧下端。两种深松机不仅能够疏松土壤,而且不会对深松铲底部及侧边的土壤造成过度挤压变形。

保护性用养模式下应用的典型深松机具如表 5 所示。

3.2 深松减阻防缠技术

黑土地保护性用养模式下,合理适时深松可以改善土壤结构、提高土壤肥力、增加作物产量[13-14]。然而,在东北黑土地推广应用深松技术时,采用秸秆覆盖还田免少耕播种会增加土壤紧实度,造成深松作业阻力增大,所需能耗大约是种植、收获等环节的 3 ~ 5 倍[89];此外,深松铲易被地表杂草和秸秆缠绕,进一步增加牵引阻力,影响深松作业质量。针对上述问题,学者们开展了相应研究,主要集中在结构减阻、涂层减阻和振动减阻方面。

结构减阻是指通过对深松铲铲尖和铲柄的结构及其关键参数进行优化设计,以达到减阻降耗的目的。如一些学者采用理论分析、回归分析和试验等方法研究了深松铲入土角、铲柄倾角及双翼角度(倾角与张角)等参数与牵引阻力间的数学模型,并根据深松作业条件提出了多种深松铲关键结构和参数的改进方案,且均取得了较好的减阻降耗效果[90-91]。针对深松铲易被秸秆残茬缠绕,造成深松作业阻力和动力消耗增大问题,研究人员通过在深松铲前配套破茬防堵装置或优化改进现有深松铲铲柄结构与关键参数以提高其通过性,降低作业阻力[92]。随着仿生技术的发展,也有一些学者采用仿生学技术进行深松铲的结构减阻,通过模仿穴兔、蝼蛄、穿山甲、螳螂、田鼠等动物的爪趾或挖掘姿态,以

表 5　典型深松机具

Tab. 5　Typical subsoiler

分类	型号	类型	总体结构	技术特点
立柱式深松机	Labrador 系列深松机[85]	凿形铲式深松机		采用 3 个凿形深松铲全部安装于机具主梁的布置方式，整机质量 485 kg，配套动力大于等于 55 kW，工作幅宽大于等于 1.6 m，作业行距 100 ~ 225 mm，最大作业深度为 650 mm
	1S 系列深松机[86]	翼铲式深松机		深松铲采用“前二（三）后三（四）”布置方式安装在机架上，深松铲数 5/7，配套动力 95.61 ~ 191.23 kW，工作幅宽 2.5/3.5 m，铲间距 500 mm，作业深度大于等于 300 mm，作业速度 3 ~ 6 km/h，生产率 0.60 ~ 1.68 hm^2/h
全方位深松机	1SQ 系列深松机[87]	V 形铲式全方位深松机		采用 V 形铲刀对土壤进行高效率的深松，并可在松土层底部形成鼠道沟（暗洞），V 形铲数量 1 ~ 3，深松深度 400 ~ 500 mm，配套动力 11 ~ 73.6 kW，生产效率为 0.4 ~ 1.67 hm^2/h
	1S 系列深松机[88]	侧弯铲式全方位深松机		深松铲采用“前二（二）后二（四）”布置方式安装在机架上，配套动力大于 74/110 kW，铲间距 550 mm，作业深度大于等于 300 mm，作业速度 5 ~ 6 km/h，生产率 1.1 ~ 2.1 hm^2/h

及其他生物的形态特征（如鲨鱼鳍）等设计减阻深松铲，减阻、减黏脱附效果较好[93-95]。

涂层减阻是指在深松铲表面涂覆一层具有减阻能力的涂层，达到降低深松铲耕作阻力和油耗的目的[96]。虽然涂层技术可显著降低深松作业阻力和动力消耗、提高作业效率，但涂覆过程通常很复杂并且成本高昂，限制了其在深松铲上的应用[97]。

振动减阻即振动深松机，其工作原理是在振动装置或弹性元件作用下，深松铲按照一定频率振动并完成深松作业。相较于普通深松机，振动深松机能够有效提高松土、碎土效果，降低牵引阻力[98]。根据振动产生来源分为自激振动深松机和强迫振动深松机。其中自激振动深松机的工作原理是通过在深松铲和机架间安装激振元件，将两者变成铰接连接，作业过程中地表起伏、深松深度变化及土壤力学性质不均匀等原因导致深松铲受力发生变化，同时激振元件受力被压缩或拉伸驱动深松铲振动，从而降低牵引阻力，提高碎土效果[99]。自激振动深松机的振动频率与振幅主要受深松作业环境影响，典型激振元件主要有弹簧和液压缸 2 种。

强迫振动深松机的工作原理是通过拖拉机输出轴、液压马达等为振动装置提供动力，使深松铲按照一定频率、幅度振动，并带动土壤经周期性振动后破碎，达到疏松土壤目的[100]。振动装置通常采用偏心机构、凸轮和曲柄连杆等。强迫振动深松机虽然可以提高碎土效果，但会增加作业功耗。

随着计算机仿真技术的快速发展，大量学者综合运用理论分析、离散元与运动学仿真、优化设计及试验等手段对深松铲工作过程中的耕作阻力、土壤扰动及运动状态与轨迹等进行研究[101-103]。通过对比深松土壤的微观与宏观扰动状态，揭示深松铲-土壤-秸秆间互作关系，校正并构建深松耕作阻力与深松铲结构与参数、土壤力学特性的数学模型，并基于此提出多种适用不同作业环境的深松铲结构与关键参数改进方法[104-105]。

3.3　深松联合整地技术与机具

黑土地保护性用养是一种尽可能减少土壤扰动的可持续性先进农业技术，在单一深松作业机具的基础上发展联合作业机具，从而减少机具进地次数，降低土壤压实，有效提高作业效率。深松联合整地指在深松时能一次完成两种以上作业项目的机械整地技术，根据联合作业的方式不同主要分为深松旋耕联合作业机、深松旋耕起垄联合作业机、耙地深松联合作业机等。

深松旋耕联合作业机的主要特征是深松铲安装在旋耕刀辊前方机架上，旋耕刀辊后方设置有镇压辊等[82]。作业时深松铲先疏松中下层土壤以打破坚硬犁底层，然后利用拖拉机动力输出轴驱动旋耕刀松碎平整深松后的地表，并通过镇压辊进行压实，既可增加土壤的透气性和透水性，又能为种子生长创造良好的生长环境。深松旋耕起垄联合作业机即在深松旋耕联合作业机基础上配套起垄装置，以提高作业效率，减少机具的进地次数，降低土壤压实。

深松耙地联合作业机是将深松铲和圆盘耙组

合,其中深松铲安装在机具最前方,圆盘耙组一般采用双排偏置安装[84]。工作时,深松铲对土壤进行局部深松,打破坚硬犁底层,形成虚实并存结构,增强土壤透气性与渗透性、提高土壤蓄水保墒能力,利于作物生长发育;圆盘耙组对深松后的地表进行灭茬、碎土,并通过镇压装置细碎平整土壤,创造出优良的种床环境,提高播种质量。

近年来,相关学者也开展了适用东北黑土区的联合整地作业技术与机具研究,如吕金庆等[106]设计了一种集深松碎土、铲除杂草、侧深施肥、培土起垄等多功能于一体的中耕机;林静等[107]研制了一种深松灭茬旋耕起垄联合作业机;郭明卓[108]设计了一种适合垄作保护性耕作技术模式的破茬深松联合作业机;钮生振[109]研制了一种具有翻土功能的复合式深松铲,一次作业能够完成深松、合墒、镇压等多项工序。

东北黑土区典型深松联合整地作业机如表 6 所示。

表 6 典型深松联合整地作业机

Tab. 6 Typical subsoiling combined soil preparation machine

类型	关键部件	总体结构	技术特点
Max - Chisel 系列垂直灭茬深松联合作业机[110]			采用“偏置凹形波纹圆盘刀 + 自激振动深松铲 + 碎土镇压轮”进行灭茬、碎土、深松和平整地表等作业,适用于垂直耕作。深松铲间距 380 mm,圆盘刀间距 190 mm,整机配备液压与智能控制系统,以确保联合整地作业质量
2730 系列灭茬深松联合作业机[111]			采用偏置平面圆盘刀 + 凿形深松铲 + 镇压辊等进行灭茬、深松、合墒、镇压碎土等作业,整机配置先进的液压系统和智能控制系统,可以适应各种地况,圆盘刀数量 22 ~ 62,深松铲数量 7 ~ 9,深松最大作业深度可达 406 mm
1SL 系列深松旋耕联合作业机[112]			采用凿形深松铲 + 旋耕刀进行深松、地表灭茬、碎土、平整地表等作业,深松铲个数 4,深松深度 300 ~ 400 mm,旋耕深度 80 ~ 140 mm,作业幅宽 1.75/2 m,作业速度 4 ~ 6 km/h,配套动力大于 44 kW,生产率 0.7 ~ 1.2 hm^2/h
1ZF 系列联合整地作业机[113]			采用偏置缺口圆盘刀 + 平面圆盘刀 + 浅松铲 + 深松铲等进行灭茬、浅松、深松和平整地表作业,整机通过 5 个液压油缸来实现各部件的作业深度调整,对土壤适应能力强,深松作业深度 250 ~ 350 mm、浅松作业深度 150 ~ 250 mm
1GZN 系列联合整地作业机[114]			采用深松铲 + 旋耕刀 + 起垄犁铲布置方式,一次进行深松、旋耕和起垄作业,适用于未耕地或已耕地上的耕整作业,配套动力 59.66 ~ 149.14 kW,起垄数 3 ~ 6,作业深度 80 ~ 160 mm,生产率 0.27 ~ 1.96 hm^2/h

4 地力培育技术与机具

地力培育是指通过科学的农业生产活动,构建优良土体、培育肥沃耕层,提高土壤肥力及生产力的一项现代农业技术,是实现黑土地保护与利用的重要技术保障[14]。东北黑土地保护性用养条件下的地力培育主要包括秸秆粉碎还田和有机肥施用技术。

4.1 秸秆粉碎还田技术与机具

秸秆粉碎还田是指作物收获后利用秸秆粉碎机械将秸秆粉碎至标准规定长度后再还田,是秸秆综合利用的主要方式之一,具有操作简便、作业质量好、生产率高、成本低等优势[115]。相关研究表明,秸秆还田能够降低土壤容重,增加土壤水稳定性团聚体含量和孔隙度,增强土壤保水持水能力,提高土壤养分和固炭能力,提高土壤生物多样性,是推动黑土地保护与利用的重要保障[116]。根据工作原理和还田后秸秆分布位置,分为秸秆覆盖还田、秸秆混埋还田、秸秆翻埋还田和秸秆沟埋还田等几种形式。

(1)秸秆覆盖还田

秸秆覆盖还田是指通过粉碎机具将秸秆、根茬与杂草等粉碎后直接抛撒覆盖于农田地表,具有保水保墒等优点,但易导致播种机土壤工作部件壅堵、出苗率低等问题。

秸秆覆盖还田主要通过秸秆粉碎还田机完成,其关键作业部件是粉碎刀,东北黑土区应用较多的秸秆还田机中粉碎刀包括锤型刀、直型刀、Y 型刀和 L 型刀等[53]。近些年,国内在秸秆覆盖还田机具的研究主要聚焦在粉碎刀具与部件两方面。科研人员在锤型刀、Y 型刀等典型粉碎刀具基础上,开展秸秆

物理、流体力学特性等研究，运用理论研究、三维虚拟设计、仿真分析等技术与方法创新设计粉碎刀结构，并通过高速摄像、试验和优化设计等手段对刀具关键结构与工作参数进行优化，均取得了良好的粉碎效果[117-119]；部分学者以降低秸秆粉碎还田机具能耗和振动为目标，开展了刀具合理排布及组合方式研究，目前常用的排布方式有对称、对称交错和螺旋线等排列方式[120]。

(2)秸秆混埋还田

秸秆混埋还田是指利用耕整地机械将粉碎后的秸秆、根茬等与表层土壤(0～20 cm)均匀混合，相较于秸秆覆盖还田，混埋还田能够加速秸秆腐解、改善土壤结构、减少土壤流失，但动力消耗大，所需成本较高。

在秸秆混埋还田机具方面，与国外大功率拖拉机配套的大型圆盘耙、联合整地机等不同，我国由于地块限制、大型机具发展缓慢等问题，当前主要以秸秆粉碎还田机＋中小型圆盘耙、秸秆粉碎还田机＋旋耕机等组合作业为主。针对黑土地部分种植和技术模式，高校与科研院所对秸秆混埋还田机具开展了相关研究。林静等[121]研制一种条带深松清垄秸秆混埋联合作业机，可将秸秆混埋至 15～20 cm 的土层中，秸秆混埋率可达 95.06%。薄鸿明[122]设计了一种秸秆混拌还田机，通过固定刀盘对集行处理的秸秆进行粉碎，并与垄沟内的土壤进行混拌，作业后可实现垄台种床整洁、垄沟混拌还田的效果。琚佳伟[123]研制了一种玉米秸秆粉碎混埋覆盖还田机，在粉碎装置将玉米秸秆粉碎后，并通过分量调节机构调节秸秆混埋量与覆盖量，从而实现秸秆混埋还田。杨超[124]设计了一种玉米秸秆粉碎和土壤混拌联合作业机具，通过对刀具关键结构参数与作业参数进行优化，取得了较好的秸秆粉碎混埋还田效果。王后升[125]设计了一种旋耕刀与埋指组合式秸秆混埋还田机，提高了秸秆旋埋深度和秸秆在土层中的分布均匀度。

(3)秸秆翻埋还田

秸秆翻埋还田是指利用翻耕机械将粉碎后的秸秆、根茬等翻埋至 20～30 cm 土层[14]，能够加深耕层、清洁种床、利于播种，但土壤扰动较大、作业成本高，地表覆盖物减少易造成土壤流失问题加剧。

秸秆翻埋还田主要通过秸秆粉碎还田机＋液压翻转犁组合作业完成。在秸秆翻埋还田机具研究方面，主要以降低翻转犁作业阻力、提升犁体耐磨性能和翻耕作业性能为研究重点。赵春凯[126]研制了适用苏打盐碱地的土壤亚表层秸秆隔层阻盐复式作业机，利用搂草盘拨集、圆盘刀切割、犁翻等工序，将秸秆翻埋到地表下 25～30 cm 深处。孙妮娜[127]设计了一种秸秆粉碎抛撒翻埋复式作业机，通过差速锯切组合刀具将秸秆粉碎，然后采用铧式犁将碎秸翻埋还田。王秀如[128]研制了适用盐碱地的驱动拨盘式秸秆翻埋还田机，利用拨盘圆齿搂集秸秆，并通过翼板式犁体将其翻埋至 28 cm 土层以下。

(4)秸秆沟埋还田

秸秆沟埋还田是指利用机械将秸秆和根茬粉碎，并将碎秸深埋至开沟装置开出的沟槽内，可有效减少地表秸秆覆盖量，提高播种机通过性，提高土壤温度[129]。

目前，国内秸秆沟埋还田机具主要以研发为主，通过现有秸秆粉碎还田机和开沟机组合作业实现秸秆沟埋还田。在秸秆沟埋还田机具研究方面，学者的研究重点包括秸秆收集、输送和开沟等，在秸秆收集方式上提出了动定刀捡拾、滑道弹齿捡拾、锤爪式甩刀捡拾等秸秆收集方法[130-131]；在秸秆输送方式上，螺旋输送器和气力输送器均表现出良好的秸秆运移输送性能[132-133]；在开沟方式上，研制了链式、螺旋式和仿生式等开沟装置，均可实现稳定开沟[134-135]。

东北黑土区部分典型秸秆粉碎还田机如表 7 所示。

4.2　有机肥施用技术与机具

有机肥是指源自动植物残体、排泄物或有机废弃物等有机物质，经过微生物作用或自然发酵制成的肥料，主要包括堆肥、厩肥、绿肥、沼渣/液等[141]。有机肥营养全面、有机质丰富，肥效温和持久，还田后能够促进微生物活动以分解有机物、释放养分，从而改善土壤结构，提高土壤有机质，提升土壤肥力，同时减轻化肥过量施用导致的环境负担，实现黑土地的长期生产力和可持续发展[116]。当前，有机肥还田主要以机械化施用为主，能够降低劳动强度，提高撒肥效率。根据有机肥的物理状态可分为固态有机肥撒施机和液体有机肥施肥机两种。

(1)固态有机肥撒施机

固态有机肥撒施机通常由肥箱、输送装置、抛撒装置和动力传输装置等构成，工作原理是在有机肥撒施作业过程中，输送装置将有机肥持续稳定地运移到抛撒装置，随后通过抛撒装置中的高速旋转部件击打肥块，使其碰撞破碎后被抛撒到地表[142]。在东北黑土地生产中，常见的输送装置有螺旋式、链板式和液压背推式等 3 种，抛撒装置主要包括离心圆盘式、锤片式和桨叶式等 3 种。

离心圆盘式有机肥撒施机因结构设计无传送装置，仅适用于流动性较好的商用有机肥，作业时肥料依靠自重从肥箱下落至撒肥盘，利用撒肥盘高速旋转产生的离心力将肥料抛撒到地表[143]。离心圆盘

表 7 典型秸秆粉碎还田机

Tab. 7 Typical straw crushing and returning machine

还田类型	型号	关键部件	总体结构	技术特点
	1JQ－280S 型秸秆切碎还田机[136]	 锤爪型		采用悬挂式挂接，双轴双侧皮带传动形式，配套动力 154.4～176.48 kW，工作幅宽为 2.8 m，作业效率为 0.98～1.68 hm^2/h
秸秆覆盖还田	1JH－120 型秸秆粉碎还田机[137]	 Y型		采用悬挂式挂接，侧边皮带传动，配套动力 29.4～40.5 kW，工作幅宽 1.2 m，作业速度 3～5 km/h，生产率 0.32～0.52 hm^2/h
	1JHS－180 型秸秆粉碎还田机[138]	 锤爪型+Y型		采用悬挂式挂接，双轴单侧皮带传动，整机质量 940 kg，配套动力 99.23～132.3 kW，工作幅宽 1.8 m，粉碎轴转速大于 2 300 r/min
秸秆混埋还田	1BJBG－4.0 型高速灭茬缺口圆盘耙[139]	 缺口圆盘耙		采用半悬挂连接，整机质量 5 280 kg，配套动力大于 161.8 kW，工作幅宽 4 m，作业深度 30～150 mm，作业速度 10～16 km/h
秸秆翻埋还田	L－1LYFT－445 型液压翻转犁[140]	 栅条犁体		采用大栅条犁体，整机质量 1 420 kg，配套动力大于 88.3 kW，工作幅宽 4.4 m，作业深度为 200～400 mm，犁体间距 930 mm

式有机肥撒施机操作简单、工作效率高，但单行作业时存在肥料横、纵向抛撒分布不均匀问题。

锤片式有机肥撒施机的输送装置一般采用双螺旋输送器，作业时高位螺旋输送器持续将肥料喂入低位螺旋输送器，然后低位螺旋输送器将肥料推向锤片抛撒装置，通过锤片将肥料撕裂、粉碎，并自下而上将肥料均匀有序地抛撒到地表[141]。该机型能够处理含水率在 0～100% 之间的有机肥，然而随着撒施距离机身逐渐变远，抛撒的肥料分布也会变得越来越稀疏。

桨叶式有机肥撒施机作业时，输送装置首先将车厢内的肥料输送到抛撒装置，再利用桨叶的高速旋转撞击将肥料抛撒到田间[142]。抛撒桨叶一般与旋转轴间有一定倾角，使得叶片上的肥料在随叶片做圆周运动的同时，也在向外做离心运动，从而增大抛撒肥料的幅宽，但也会产生横、纵向抛撒肥料分布不均匀的问题。

(2)液体有机肥施肥机

液体有机肥施肥机一般由储肥罐、真空泵、洒施装置、行走装置、动力传输装置、输送管路等组成，作业时利用真空泵使储肥罐内产生正压或负压，从而将罐体内液态有机肥吸/喷入输送管路并传送至洒施装置，然后通过洒施装置将液态有机肥均匀施入到农田土层[144]。液体有机肥施肥机按照施入方式主要分为喷洒施肥、滴灌施肥、注射式施肥和条带深施等。相较于固态有机肥撒施机，液体有机肥施肥机结构比较复杂，且液体有机肥制备需要特定场所，目前我国液体有机肥施肥机应用推广有限。

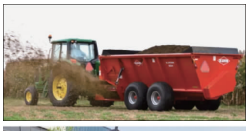
(3)有机肥还田技术与机具

国外开展有机肥施肥机械研究较早，目前基本实现了固态施肥的全程机械化作业，以及液态肥料的喷洒、深施和滴灌等自动化作业，而且国外有机肥施肥机械正在向大型化、多功能化、智能化及智慧化方向发展。我国开展有机肥施肥机械研究虽然较晚，但经过多年研究与试验也取得了较大进展。在有机肥的数值模拟研究方面，彭才望等[145]运用离散元软件和 JKR 模型通过仿真、物理试验对多种散体有机肥颗粒进行了参数标定，可为研究有机肥料与抛撒装置的互作关系提供参考。在有机肥输送装置研究方面，李娟等[146]设计了一种双体独立螺旋的分段配送机构，能够提高施肥均匀性。在有机肥抛撒研究方面，付静等[147]开展了有机肥含水率对施肥机抛撒性能的影响规律研究，可为施肥机抛撒装置的改进与优化提供参考。此外，部分学者借鉴精准施肥技术原理，开展了有机肥精准抛撒研究，郝延杰等[148]研制了一种精准施肥机及其控制系统，可实现撒肥量和撒肥幅度的变量调节；杨伟男等[149]以 T－S 模糊神经网络算法为核心，研发了一种变速撒肥控制系统，综合运用机-电-液控制技术实现了撒肥量精准调控。

黑土地保护性用养实施过程中的典型有机肥施用机具如表 8 所示。

表 8　典型有机肥施用机具

Tab. 8　Typical organic fertilizer fertilizing machine

分类	型号	抛撒类型	总体结构	技术特点
固态有机肥撒施机	2FX－800 型撒肥机[150]	离心圆盘式		采用三点悬挂挂接方式、配套动力 40 kW，整机质量 270 kg，作业速度 8～12 km/h，工作幅宽 18～24 m，排肥口间距 560 mm，作业效率 26～38 hm^2/h
	ProTwin Slinger8110 型撒肥机[151]	锤片式		采用拖拉机牵引作业，整机质量 1 696 kg，锤片数量 12，配套动力 45 kW，最大容量 12.48 m^3，侧抛撒肥，最大负载 4 536 kg
	2FH－S 型抛撒肥机[152]	桨叶式		采用拖拉机牵引作业，并利用动力输出轴提供动力，容积10 m^3，抛撒宽幅 8～12 m，装载质量 8 000 kg，配套动力 66.2～95.6 kW，整机质量 4 300 kg
液体有机肥施肥机	VFW 液态有机肥撒肥机[153]	喷洒施肥		采用拖拉机牵引作业，依据真空泵工作原理使罐体产生正压或负压，从而达到自吸和自喷的功能，并通过装备不同的施肥器实现多种施肥效果，罐体容积大于等于 3 000 L，配套动力大于 147.1 kW，施肥深度 0～200 mm，施肥宽度 6～18 m
		滴灌施肥		
		条带施肥		

5　展望

黑土地保护性用养技术是黑土地保护与利用顺利实施的重要保障，科研人员及农机企业经过多年研究、试验、优化和推广，目前已经形成了较成熟的东北黑土地保护性用养技术模式及配套机具，基本满足黑土地当前农业生产发展需求，但部分关键技术存在薄弱环节，仍需持续开展研究，充分发挥保护性用养技术优势，以补足当前技术与装备短板，推动黑土地保护与利用的高质高效应用发展。

5.1　黑土地保护性用养关键技术持续创新

（1）加强基础理论研究

国内虽然在免少耕播种、深松及地力培育技术与装备研发方面开展了系列研究，但相关基础理论有待进一步完善，包括保护性用养技术对土壤特性、节水培肥、碳循环、作物生长与产量、区域生态效益以及多种用养关键技术的耦合互作关系等都需进一步研究。以免少耕播种技术与机具为例，黑土区高速复杂环境下的机械－土壤－秸秆运动规律、播种部件－土壤－物料互作关系等仍需进一步探究。以深松技术与机具为例，仍需探明耕作部件碎土机理及深松对土壤特性、作物产量等的影响关系，作业功耗与黑土保护正增益的交互关系。以地力培育技术为例，仍需深入研究有机质组分和不同土壤类型的对应关系，秸秆/有机肥/绿肥还田－气候环境－土壤性状间交互作用，明确秸秆/有机肥/绿肥与土壤的配伍比例、施用的最佳时间、施用深度等，以实现黑土地地力精准调控。

（2）突破关键技术瓶颈

目前，黑土地保护性用养技术模式总体定型，关键装备基本过关，能够满足黑土地农业发展需求，但相关关键技术与装置仍需进一步优化与改进。以免少耕播种为例，进一步研究高性能清洁种床整备技术与装置，高效清理秸秆、根茬，创造优质种床，减少土壤扰动，提升免少耕播种作业可靠性和质量；开展高速精密播种技术研究，重点突破电驱气力式排种技术与装置，提高精密播种作业效率与性能，助力我国农业规模化、集约化发展；研究垄台修复、垄台种床整备、原垄免少耕播种等技术与配套机具，实现高性能原垄免少耕播种作业。以深松技术与机具为例，研究提升深松铲入土碎土性能的技术与机具，改进入土部件材料与加工工艺，降低动力消耗，实现低功耗、高质量深松作业。以地力培育为例，研究秸秆精细粉碎技术与刀具，提高秸秆粉碎质量；研制有机肥高效抛撒和深施装置，提高作业效率和抛撒均匀性；研究有机物料与土壤充分配伍技术与机具，充分

发挥有机物料作用,提升土壤肥力。研制复式作业技术与机具,减少进地次数和土壤压实,提高作业效率。此外,突破触土关键部件加工材料与工艺的“卡脖子”问题,提高触土部件的耐磨、耐疲劳和减阻性能,提高作业质量。

5.2 提升保护性用养技术与机具智能化

信息化和智能化技术赋能农机装备有利于实现节本增效,提高作业质量和综合效益。在免少耕播种作业过程中,采用电驱技术进行排种、排肥可有效克服地轮打滑导致的种肥漏播、漏施等问题,实现精准作业,提高免少耕播种作业质量;在免少耕播种、深松和地力培育作业过程中,利用机电液控制、机器视觉、物联网、深度学习、计算机等技术,实时监测清洁种床整备、播种、深松、秸秆粉碎、秸秆抛撒、秸秆翻混、有机肥抛撒等关键作业环节的作业质量,并对播种速度、开沟深度、播种深度等作业参数进行自动控制,实现复杂环境下稳定、可靠、高质生产作业。此外,还可配合信息检测、自动导航、无人驾驶、智能管控与决策等技术实现免少耕播种、深松及地力培育的区块化智慧作业,提升黑土地保护与利用的综合效益。

5.3 加强保护性用养技术农机农艺融合

黑土地保护性用养技术经过多年科研攻关,集成创新了多种秸秆覆盖、免少耕播种、深松、秸秆/有机肥/绿肥还田技术模式和配套机具,但仍存在一些问题需深入研究。如在清洁种床整备中,适宜的秸秆长度、覆盖量、种床特性(宽度、秸秆与土壤接触方式等)等对播种及后续生长发育的影响规律;深松作业特性-燃油消耗-土壤养护增益间的互作关系;秸秆粉碎宽度、有机肥施用量、秸秆/有机肥与土壤配伍比例、秸秆/有机肥施用深度等对土壤特性的影响规律等。此外,针对保护性用养关键技术与病虫草害防控、轮作模式、水肥管理等配套的农艺研究相对滞后。因此,未来需持续推进保护性用养技术与其他技术的深度集成,促进农机农艺深度融合、协调发展,有利于推动保护性用养技术实施,提升作业质量,从而充分发挥高保护性用养技术优势。

5.4 因地制宜发展保护性用养技术体系

东北黑土区分布区域广、涉及土壤类型多,不同地区水热条件、地形地貌、耕作模式和土壤退化类型、农业生态环境和作物种植生产特点等存在差异,需结合区域条件因地制宜发展适宜当地特色的保护性用养技术体系,从而充分发挥保护性用养技术蓄水保墒、改土提质、固土培肥、抗旱增产、节本增收,改善生态环境等优势,以推动保护性用养技术在东北黑土区的推广与应用。如黑土地保护性用养技术体系建设与发展过程中需要突出技术集成,推动多项关键技术组合配套,同时注重保护性用养技术与机械化协同发展,最大限度发挥保护性用养技术的生态、经济和社会效益;建立适用不同区域的黑土地保护性用养技术标准和技术规范,为黑土地保护与利用提供基本依据;黑土地保护性用养技术体系的建设与推广也需政府、高等院校、科研院所及推广部门的大力支持,农机企业与用户的通力协作,切实做到把黑土地这个“耕地中的大熊猫”保护好、利用好,实现黑土地的永续利用。

6 结束语

以秸秆覆盖还田免少耕播种、深松和地力培育等为核心内容的黑土地保护性用养技术可实现粮食增产、节约水肥和降低成本等方面的共赢。该技术在发展黑土地农业生产,保障国家粮食安全的同时,能够固土和改善土壤理化特性、提升土壤有机质和养分含量、促进生物多样性、减少 CO_2 排放,维持生态系统健康与稳定,实现农业可持续发展,是推进黑土地保护与利用的核心技术手段。

近 5 年,在黑土地保护与利用国家行动计划支撑下,黑土地保护性用养技术与机具研究发展迅猛,科研成果丰硕,研发的相关机具基本能够满足黑土地保护与利用机械化生产需要。然而,目前黑土地免少耕播种、深松、秸秆还田、有机肥抛撒等机具的机械化、智能化水平不高,农机农艺融合度低,尚无法实现高质、高效及智能化生产。因此,未来仍需加强黑土地保护与利用基础理论研究,完善相关技术标准和技术规范,开展高质高效保护性用养关键技术和配套机具核心部件研发攻关,突破限制、补齐短板,深化信息化、智能化、智慧化技术应用,为东北黑土地保护与利用提供坚实的技术支撑及全方位的配套装备保障。

参 考 文 献

[1] 李保国,刘忠,黄峰,等. 巩固黑土地粮仓保障国家粮食安全[J]. 中国科学院院刊,2021,36(10):1184 - 1193.
LI Baoguo, LIU Zhong, HUANG Feng, et al. Ensuring national food security by strengthening high-productivity black soil granary in northeast China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(10): 1184 - 1193. (in Chinese)

[2] 马瑞,田芷源,赵艳,等. 东北黑土典型水蚀区农田侵蚀与退化特征[J]. 水土保持学报,2024,38(5):71 - 81.
MA Rui, TIAN Zhiyuan, ZHAO Yan, et al. Characteristics of erosion and degradation for farmlands in the typical water erosion area of the black soil region, northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(5):71 - 81. (in Chinese)

[3] 黄怡婷,陈俊熹,高钰淏,等. 长期耕作对典型黑土水力性质的影响[J]. 土壤学报,2024,61(4):998 – 1008.
HUANG Yiting, CHEN Junxi, GAO Yuhao, et al. Effects of long-term tillage on hydraulic properties of typical black soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(4): 998 – 1008. (in Chinese)
[4] 农业农村部,财政部. 东北黑土地保护性耕作行动计划(2020—2025 年)[EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/gk/tzgg_1/tz/202003/t20200318_6339304.htm.
[5] 黑龙江省人民政府. 黑龙江省黑土地保护工程实施方案(2021—2025 年)[EB/OL]. https://www.hlj.gov.cn/hlj/c108373/202201/c00_31183958.shtml.
[6] 吉林省人民政府. 吉林省黑土地保护总体规划(2021—2025 年)[EB/OL]. https://xxgk.jl.gov.cn/szf/gkml/202205/t20220519_8454263.html.
[7] 辽宁省农业农村厅. 辽宁省黑土地保护实施方案(2021—2025 年)[EB/OL]. https://nync.ln.gov.cn/nync/zfxxgk/fdzdgknr/jyta/srddbjy/sssjrdechydjy2024n/20241209145852203 70/.
[8] 内蒙古自治区农牧厅,财政厅. 内蒙古自治区黑土地保护性耕作推进行动方案(2020—2025 年)[EB/OL]. https://nmt.nmg.gov.cn/yw/nmjx/202307/t20230705_2342492.html.
[9] 中国科学院. 东北黑土地白皮书(2020)[R/OL]. https://www.cas.cn/cm/202107/t20210712_4798060.shtml.
[10] 韩晓增,邹文秀. 东北黑土地保护利用研究足迹与科技研发展望[J]. 土壤学报,2021,58(6):1341 – 1358.
HAN Xiaozeng, ZOU Wenxiu. Research perspectives and footprint of utilization and protection of black soil in northeast China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(6): 1341 – 1358. (in Chinese)
[11] 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)
[12] 韩晓增,邹文秀,杨帆. 东北黑土地保护利用取得的主要成绩、面临挑战与对策建议[J]. 中国科学院院刊,2021,36(10):1194 – 1202.
HAN Xiaozeng, ZOU Wenxiu, YANG Fan. Main achievements, challenges, and recommendations of black soil conservation and utilization in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(10): 1194 – 1202. (in Chinese)
[13] 徐英德,裴久渤,李双异,等. 东北黑土地不同类型区主要特征及保护利用对策[J]. 土壤通报,2023,54(2):495 – 504.
XU Yingde, PEI Jiubo, LI Shuangyi, et al. Main characteristics and utilization countermeasures for black soils in different regions of northeast China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(2): 495 – 504. (in Chinese)
[14] 邓小明,张佳宝,张辉,等. 中国黑土地保护与利用科技创新战略研究[M]. 北京:科学出版社,2024.
[15] 中国科学院. 黑土地保护与利用报告(2021)[R/OL]. https://www.cas.cn/sygz/202210/t20221002_4849787.shtml.
[16] 农业农村部,国家发展改革委,财政部,等. 东北黑土地保护规划纲要(2017—2030 年)[EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/nybgb/2017/dqq/201801/t20180103_6133926.htm.
[17] 农业农村部,国家发展改革委,财政部,等. 国家黑土地保护工程实施方案(2021—2025 年)[EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/nybgb/2021/202109/202112/t20211207_6384018.htm.
[18] 朱勇,李建业,张程远,等. 长期保护性耕作对坡耕地黑土有机碳组分的影响[J]. 农业工程学报,2023,39(10):103 – 111.
ZHU Yong, LI Jianye, ZHANG Chengyuan, et al. Effects of long-term conservation tillage on black soil organic carbon components in sloping farmland[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(10): 103 – 111. (in Chinese)
[19] 农业农村部农机化管理司. 全国农业机械化统计年报[R]. 2009 ~ 2019.
[20] 农业农村部. 农业农村部召开东北黑土地保护性耕作座谈会[EB/OL]. http://www.njhs.moa.gov.cn/gzdt/202411/t20241108_6465913.htm.
[21] 农业农村部. 对十三届全国人大五次会议第 8782 号建议的答复[EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/ntjsgls/202207/t20220728_6405775.htm.
[22] 农业农村部种植业管理司和耕地质量监测保护中心. 东北黑土地保护利用集成技术模式[M]. 北京:中国农业出版社,2019.
[23] WEN Yanru, KASIELKE T, JIANG Heng, et al. Effects of lithology and soil horizons on gully morphology in the Mollisol region of China[J]. Geoderma, 2024, 446: 116907.
[24] 张光辉,杨扬,刘瑛娜,等. 东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J]. 水土保持学报,2022,36(2):1 – 12.
ZHANG Guanghui, YANG Yang, LIU Yingna, et al. Advances and prospects of soil erosion research in the black soil region of northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 1 – 12. (in Chinese)
[25] 郑粉莉. 东北黑土区复合土壤侵蚀特征及其防治[M]. 北京:科学出版社,2021.
[26] XIAO Yang, ZHOU Meng, LIU Xiaobing, et al. Pore connectivity and anisotropy affect carbon mineralization via extracellular enzymes in >2 mm aggregates under conservation tillage of Mollisols[J]. Soil & Tillage Research, 2024,244: 106253.
[27] ZHU Yuanchen, ZHANG Min, HAN Xiaozeng, et al. Evaluation of the soil aggregate stability under long term manure and chemical fertilizer applications: insights from organic carbon and humic acid structure in aggregates[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2024, 376: 109217.
[28] 文雪,温艳茹,刘宝,等. 黑土区不同耕作措施对土壤水分和玉米产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2024,30(8):1447 – 1460.

WEN Xue, WEN Yanru, LIU Bao, et al. Effects of different tillage practices on soil water and maize yield in the Mollisol region[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024, 30(8): 1447 - 1460. (in Chinese)

[29] LIU L, ZHANG L, LIU J, et al. Soil water and temperature characteristics under different straw mulching and tillage measures in the black soil region of China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 76: 256 - 262.

[30] LI Mengni, LI Xueliang, SHI Yulong, et al. Soil enzyme activity mediated organic carbon mineralization due to soil erosion in long gentle sloping farmland in the black soil region[J]. Science of the Total Environment, 2024, 929: 172417.

[31] HAO Xiangxiang, HAN Xiaozeng, WANG Cui, et al. Temporal dynamics of density separated soil organic carbon pools as revealed by δ13C changes under 17 years of straw return[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2023, 356: 108656.

[32] CUI Hu, SHUTES B, HOU Shengnan, et al. Long-term organic fertilization increases phosphorus content but reduces its release in soil aggregates[J]. Applied Soil Ecology, 2024, 203: 105684.

[33] ZHANG Y, LI X, GREGORICH E, et al. Tillage and cropping effects on soil organic carbon: biodegradation and storage in density and size fractions[J]. European Journal of Soil Science, 2020, 71(6): 1 - 12.

[34] LIU Chunzhu, HAN Xiaozeng, LU Xinchun, et al. Response of soil enzymatic activity to pore structure under inversion tillage with organic materials incorporation in a Haplic Chernozem[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 370: 122421.

[35] 郝紫玉,邵亚旭,刘涛,等. 东北农田黑土固碳微生物研究进展[J]. 微生物学通报,2024,51(6):1873 - 1886.
HAO Ziyu, SHAO Yaxu, LIU Tao, et al. Research advances of carbon-fixing microorganisms in the black soil of northeast China[J]. Microbiology China, 2024, 51(6): 1873 - 1886. (in Chinese)

[36] 梁爱珍,张延,陈学文,等. 东北黑土区保护性耕作的发展现状与成效研究[J]. 地理科学,2022,42(8):1325 - 1335.
LIANG Aizhen, ZHANG Yan, CHEN Xuewen, et al. Development and effects of conservation tillage in the black soil region of northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(8): 1325 - 1335. (in Chinese)

[37] 李保国,王贵满. 东北地区的保护性耕作技术-梨树模式[M]. 北京:科学技术文献出版社,2019.

[38] 武开阔,张哲,武志杰,等. 不同秸秆还田量和氮肥配施对玉米田土壤 CO_2 排放的影响[J]. 应用生态学报,2022,33(3):664 - 670.
WU Kaikuo, ZHANG Zhe, WU Zhijie, et al. Effects of different amounts of straw return and nitrogen fertilizer application on soil CO_2 emission from maize fields[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(3): 664 - 670. (in Chinese)

[39] 张丽华,徐晨,于江,等. 半湿润区秸秆还田对土壤水分、温度及玉米产量的影响[J]. 水土保持学报,2021,35(4):299 - 306.
ZHANG Lihua, XU Chen, YU Jiang, et al. Effects of straw returning on soil moisture, temperature and maize yield in semi humid area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 299 - 306. (in Chinese)

[40] 段益平,吴明亮,吕江南,等. 免耕播种防堵技术研究现状及发展建议[J]. 中国农业科技导报,2022,24(2):124 - 135.
DUAN Yiping, WU Mingliang, LÜ Jiangnan, et al. Research status and development suggestions of no-tillage seeding anti-blocking technology[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2022, 24(2): 124 - 135. (in Chinese)

[41] 张仕林. 免少耕玉米秸秆根土复合体与灭茬防堵装置互作机理研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2024.
ZHANG Shilin. Interaction mechanism between stubble soil complex of maize and anti-blocking devices under no-tillage planting[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024. (in Chinese)

[42] 梁赟. 纵向双圆盘二次切秆免耕防堵装置研究[D]. 北京:中国农业大学,2020.
LIANG Yun. Study on the vertical double-disc straw twice cutting of no-till and anti-blocking device[D]. Beijing: China Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[43] 林静,吕洲翼,李宏哲,等. 垄作免耕播种机被动式防缠绕破茬清垄装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(6):19 - 27,37.
LIN Jing, LÜ Zhouyi, LI Hongzhe, et al. Design and experiment of passive anti-winding stubble breaking and ridge cleaning device for no-tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 19 - 27, 37. (in Chinese)

[44] 梁宁. 免耕播种机缺口圆盘刀设计与试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2019.
LIANG Ning. Design and numerical simulation of gap cutting coulter for no-till planter[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[45] 贾洪雷,刘行,佘海波,等. 免耕播种机凹面爪式清茬机构仿真与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(11):68 - 77.
JIA Honglei, LIU Hang, YU Haibo, et al. Simulation and experiment on stubble clearance mechanism with concave claw-type for no-tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 68 - 77. (in Chinese)

[46] 王奇,唐汉,周文琪,等. 幅宽自动控制清秸防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(3):25 - 35.
WANG Qi, TANG Han, ZHOU Wenqi, et al. Design and experiment of automatic width control row cleaners[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 25 - 35. (in Chinese)

[47] 曹鑫鹏,王庆杰,李洪文,等. 玉米免耕播种机侧置切刀与拨茬齿盘组合清茬装置研究[J]. 农业机械学报,2021,52(3):36 - 44.
CAO Xinpeng, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Combined row cleaners research with side cutter and stubble clean disk of corn no-till seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 36 - 44. (in Chinese)

[48] 王加一,赵淑红,高连龙,等. 玉米垄作随动自调刃口角被动圆盘式破茬刀设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,

52(11):59 – 67.
WANG Jiayi, ZHAO Shuhong, GAO Lianlong, et al. Design and experiment of passive disc cutting blade in corn ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 59 – 67. (in Chinese)
[49] 高振,卢彩云,位旭阳,等. 协拨组合式玉米条带秸秆清理装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(10):68 – 79.
GAO Zhen, LU Caiyun, WEI Xuyang, et al. Design and experiment of co-stirring combined corn strip-straw cleaning device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 68 – 79. (in Chinese)
[50] 于猛,初小兵,吴振宇,等. 长春地区玉米秸秆归行技术及配套机具[J]. 农业与技术,2019,39(19):53 – 55.
YU Meng, CHU Xiaobing, WU Zhenyu, et al. Corn straw returning technology and supporting machinery in Changchun area [J]. Agriculture and Technology, 2019, 39(19): 53 – 55. (in Chinese)
[51] 2BMG 系列免耕播种机[EB/OL]. wwwont. com. cn/cn/products. html.
[52] 2BMY 系列免耕播种机[EB/OL]. https://www. nongjitong. com/product/282_65028857. html.
[53] 何进,李洪文,陈海涛,等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J]. 农业机械学报,2018,49(4):1 – 19.
HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1 – 19. (in Chinese)
[54] 陈文龙. 保护性耕作模式下条带旋耕机刀辊优化设计及试验[D]. 长春:吉林农业大学,2024.
CHEN Wenlong. Optimiz ation design and experiment of blade rollers for strip rotary tillers under protective tillage mode[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2024. (in Chinese)
[55] 陈海涛,李昂,史乃煜,等. 玉米秸秆残茬侧向抛出动力学模型建立与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(5):76 – 83.
CHEN Haitao, LI Ang, SHI Naiyu, et al. Kinetics modeling and experiment of lateral throwing of corn straws [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 76 – 83. (in Chinese)
[56] 史乃煜,陈海涛,王星,等. 弹齿式清秸装置防止残茬回带机构设计与试验优化[J]. 农业机械学报,2019,50(4):84 – 91.
SHI Naiyu, CHEN Haitao, WANG Xing, et al. Design and experiment optimization of prevent bring back stubble mechanism of spring-tooth type cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 84 – 91. (in Chinese)
[57] 陈海涛,侯磊,侯守印,等. 大垄玉米原茬地免耕播种机防堵装置设计与优化试验[J]. 农业机械学报,2018,49(8):59 – 67.
CHEN Haitao, HOU Lei, HOU Shouyin, et al. Design and optimization experiment of anti-blocking mechanism of no-tillage planter for grand ridge with raw corn stubble[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 59 – 67. (in Chinese)
[58] 贾洪雷,郭明卓,郭春江,等. 免耕播种机动态仿生破茬装置设计与参数试验优化[J]. 农业机械学报,2018,49(10):103 – 114.
JIA Honglei, GUO Mingzhuo, GUO Chunjiang, et al. Design of dynamic bionic stubble cutting device and optimization test of parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 103 – 114. (in Chinese)
[59] 于畅畅,王庆杰,李洪文,等. 螺旋切分式种带清理装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊 2):212 – 219.
YU Changchang, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Design and experiment of spiral-split sowing strip sleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 212 – 219. (in Chinese)
[60] 曹鑫鹏,王庆杰,李洪文,等. 主动旋转集行式清秸装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(6):26 – 34.
CAO Xinpeng, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Design and experiment of active rotating collective straw-cleaner[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(6): 26 – 34. (in Chinese)
[61] 于文一. 缺口双圆盘刀破茬导草装置设计与试验[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2023.
YU Wenyi. Design and experiment of double notch disc cutter stubble guide device[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023. (in Chinese)
[62] 李向军,赵大勇,崔波,等. 玉米少耕播种机主动式种床整理装置设计与试验[J]. 中国农机化学报,2023,44(7):1 – 8.
LI Xiangjun, ZHAO Dayong, CUI Bo, et al. Design and experiment of active seed bed arrangement device of cornless tillage sower[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(7): 1 – 8. (in Chinese)
[63] 王加一,赵淑红,杨智杰,等. 玉米条带少耕作业驱动式破茬刀设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(8):51 – 61.
WANG Jiayi, ZHAO Shuhong, YANG Zhijie, et al. Design and experiment of driving stubble cutter for corn strip with less tillage operation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 51 – 61. (in Chinese)
[64] 2BYFT 系列免少耕施肥播种机[EB/OL]. [2025 – 01 – 23]. https://www. nongjitong. com/company/nonghaha/53515009. html.
[65] 2BMQY 系列免耕施肥播种机[EB/OL]. [2025 – 01 – 23]. https://www. nongjitong. com/company/xinlexl/71181497. html.
[66] 2BMQF – 6 免耕覆秸播种机[EB/OL]. [2025 – 01 – 23]. https://item. nongji360. com/d/65361.
[67] LI Chuan, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Research on high-speed and clean production with a high-speed centrifugal maize precision seed metering device featuring variable hole insert numbers[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 227: 109620.
[68] 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)
[69] 孙文胜,衣淑娟,齐海龙,等. 双盘交错气压式玉米品字形密植高速精量排种器研究[J]. 农业机械学报,2024,55(10):168 - 179.
SUN Wensheng, YI Shujuan, QI Hailong, et al. Design and experiment of twin discs intertwined air-pressure high-speed precision seed-metering device for maize delta-row dense plantings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 168 - 179. (in Chinese)
[70] 解茁凡. 导流式集排大豆精量排种器设计与试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2023.
XIE Zhuofan. Design and testing of guided flow type soybean concentrate seed discharger[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023. (in Chinese)
[71] 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)
[72] 王奇,朱龙图,李名伟,等. 指夹式玉米免耕精密播种机振动特性及对排种性能的影响[J]. 农业工程学报,2019,35(9):9 - 18.
WANG Qi, ZHU Longtu, LI Mingwei, et al. Vibration characteristics of corn no-tillage finger-type precision planter and its effect on seeding performance[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 9 - 18. (in Chinese)
[73] 刘虎,周纪磊,方会敏,等. 基于模态的玉米高速精密排种器振动特性分析[J]. 农机化研究,2019,41(7):47 - 51,56.
LIU Hu, ZHOU Jilei, FANG Huimin, et al. Vibration analysis of high speed corn seeding machine based on modal analysis[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(7): 47 - 51, 56. (in Chinese)
[74] 侯守印,邹震,魏志鹏,等. 柔性机械式大豆精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(10):77 - 86,108.
HOU Shouyin, ZOU Zhen, WEI Zhipeng, et al. Design and experiment of flexible mechanical soybean precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 77 - 86, 108. (in Chinese)
[75] 陈永亮. 高速免耕播种机单体设计与试验研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2020.
CHEN Yongliang. Design and experimental study of high speed notillage seeder monomer[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020. (in Chinese)
[76] 林震. 磁力指夹式排种器设计及排种性能试验[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2020.
LIN Zhen. Design and performance test of magnetic finger clamp seed exporter[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020. (in Chinese)
[77] 2BMQ 系列免耕精量播种机[EB/OL]. [2025 - 01 - 23]. https://www.nongjitong.com/product/hljdwkj_2bmq-6_seeder.html.
[78] 2BMQ 系列免耕精量播种机[EB/OL]. [2025 - 01 - 23]. https://www.nongjitong.com/company/category/327335.html.
[79] 2BMZF 系列免耕精量播种机[EB/OL]. [2025 - 01 - 23]. https://www.nongjitong.com/company/category/329660.html.
[80] Maestro TX 免耕精量播种机[EB/OL]. [2025 - 01 - 23]. https://www.horsch.com/en_nz/products/planting/maestro/maestro-tx.
[81] PITTELKOW C M, LANG X, LINQUIST B A, et al. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture[J]. Nature, 2015, 517(7534): 365 - 368.
[82] 郑侃. 深松旋耕作业次序可调式联合作业机研究[D]. 北京:中国农业大学,2018.
ZHENG Kan. Study on subsoiling and rotary tillage operation adiustble combine machine[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
[83] 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-raperotation area[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020. (in Chinese)
[84] 李宝筏. 农业机械学[M]. 2 版. 北京:中国农业出版社,2018.
[85] Labrador 系列深松机[EB/OL]. [2025 - 01 - 23]. https://www.nongjitong.com/product/lemken_45202299.html.
[86] 1S 系列深松机[EB/OL]. [2025 - 01 - 23]. http://www.yituo.com.cn/cpzx/jjcp/ssj/201706/t20170620_156673.html.
[87] 1SQ 系列深松机[EB/OL]. [2025 - 01 - 23]. https://www.nongjitong.com/company/category/324222.html.
[88] 1S 系列深松机[EB/OL]. [2025 - 01 - 23]. https://www.nongjitong.com/company/category/327429.html.
[89] 路云. 仿生储能-仿形深松装置设计与试验研究[D]. 长春:吉林大学,2023.
LU Yun. Design and experimental study of bionic energy storage - profiling deep loosening device[D]. Changchun: Jilin University, 2023. (in Chinese)
[90] 高连龙. 深松过程中玉米秸秆运动研究及深松铲的设计[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2022.
GAO Lianlong. Study on movement of corn straw in subsoiling process and design of subsoiler[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022. (in Chinese)
[91] 孔羿勋,杨丹彤,赵闯,等. 基于回归拟合的深松耕作阻力测试系统改进设计[J]. 农机化研究,2022,44(2):95 - 98.
KONG Yixun, YANG Dantong, ZHAO Chuang, et al. Improved design of resistance test system for subsoiling based on regression fitting[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(2): 95 - 98. (in Chinese)
[92] 王雪松. 清秸深松组合式条带耕作机的设计与试验[D]. 北京:中国农业大学,2021.

WANG Xuesong. Design and experiment of combined strip cultivator with straw cleaner and subsoiler[D]. Beijing: China Agricultural University, 2021. (in Chinese)

[93] 陈菁,山弘道,魏传省,等. 基于离散元的仿鲨鱼鳍深松铲耕作行为仿真分析[J]. 中国农机化学报,2024,45(12):15-20.
CHEN Jing, SHAN Hongdao, WEI Chuansheng, et al. Simulation analysis of cultivation behavior of shark-fin-like deep pine shovel based on discrete elements[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(12): 15-20. (in Chinese)

[94] 张智泓,甘帅汇,左国标,等. 以砂鱼蜥头部为原型的仿生深松铲尖设计与离散元仿真[J]. 农业机械学报,2021,52(9):33-42.
ZHANG Zhihong, GAN Shuaihui, ZUO Guobiao, et al. Bionic design and performance experiment of sandfish head inspired subsoiler tine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 33-42. (in Chinese)

[95] 李冰. 基于蚁狮背部特征的仿生减阻深松铲研究[D]. 长春:吉林大学,2024.
LI Bing. Research on the performance of bionic drag-reducing subsoiler based on dorsal features of antlions[D]. Changchun: Jilin University, 2024. (in Chinese)

[96] 赵建国,李建昌,王安,等. 喷焊余温淬火改善深松铲尖铁基涂层耐磨性[J]. 农业工程学报,2018,34(3):65-71.
ZHAO Jianguo, LI Jianchang, WANG An, et al. Improvement of wear resistance of deep-shovel tip with Fe-based alloy coating by flame spray welding residual temperature quenching[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3): 65-71. (in Chinese)

[97] 张继豪,李静,陈文刚,等. 农业触土机具仿生减阻抗磨特性研究进展[J]. 表面技术,2024,53(20):36-50.
ZHANG Jihao, LI Jing, CHEN Wen'gang, et al. Research progress on bionic drag reduction and wear resistance characteristics of agricultural soil touching machinery structures[J]. Surface Technology, 2024, 53(20): 36-50. (in Chinese)

[98] 张斌,沈从举,李承明,等. 自激振动深松机关键部件仿真设计及试验[J]. 农机化研究,2021,43(10):51-57,63.
ZHANG Bin, SHEN Congju, LI Chengming, et al. Simulation design and test of key components of self-excited vibration subsoiler[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(10): 51-57,63. (in Chinese)

[99] 王云霞. 液压激振源自激振动深松机耕深测控系统研究与试验[D]. 北京:中国农业大学,2019.
WANG Yunxia. Research and experiment on a tillage depth control system for hydraulicaly self-excited subsoiler[D]. Beijing: China Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[100] 张航. 苏打盐碱地振动深松部件试验研究[D]. 长春:吉林农业大学,2022.
ZHANG Hang. Experimental study on vibrating subsoiling components in sodasaline alkali soil[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[101] 赵淑红,刘汉朋,杨超,等. 玉米秸秆还田交互式分层深松铲设计与离散元仿真[J]. 农业机械学报,2021,52(3):75-87.
ZHAO Shuhong, LIU Hanpeng, YANG Chao, et al. Design and discrete element simulation of interactive layered subsoiler with maize straw returned to filed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 75-87. (in Chinese)

[102] 袁军. 基于 DEM-MBD 耦合的自激振动深松机作业过程仿真分析与试验研究[D]. 长春:吉林大学,2022.
YUAN Jun. Simulation analysis and experimental study on operation process of self-excited vibration subsoiler based on DEM-MBD coupling[D]. Changchun: Jilin University, 2022. (in Chinese)

[103] 李明生,王元俊,谢守勇,等. 基于离散元法的切振共作深松机作业性能仿真分析及试验[J]. 农业工程学报,2024,40(20):81-90.
LI Mingsheng, WANG Yuanjun, XIE Shouyong, et al. Simulation analysis and test of the operation performance of shear vibration co-operation subsoiler based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(20): 81-90. (in Chinese)

[104] 张冲,范旭辉,李明森,等. 基于 EDEM 的凿式犁铲土壤扰动仿真分析与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊 2):52-59.
ZHANG Chong, FAN Xuhui, LI Mingsen, et al. Simulation analysis and experiment of soil disturbance by chisel plow based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp.2): 52-59. (in Chinese)

[105] 刘立晶,马超,刘忠军. 基于 EDEM 的带状深松全层施肥铲作业参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(10):74-83.
LIU Lijing, MA Chao, LIU Zhongjun. EDEM-based parameter optimization and experiment of full-layer fertilization shovel for strip subsoiling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 74-83. (in Chinese)

[106] 吕金庆,刘志峰,王鹏榕,等. 驱动式碎土除草多功能马铃薯中耕机设计与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(10):1-8.
LÜ Jinqing, LIU Zhifeng, WANG Pengrong, et al. Design and experiment of driving-type crushing-weeding multi-functional potato cultivator[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(10): 1-8. (in Chinese)

[107] 林静,张桐嘉,陈彬,等. 深松灭茬旋耕起垄联合作业机设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(2):28-39.
LIN Jing, ZHANG Tongjia, CHEN Bin, et al. Design and test of subsoiling rotary rilling and rilling combined operating machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 28-39. (in Chinese)

[108] 郭明卓. 基于动态仿生的破茬深松联合作业机设计及关键技术研究[D]. 长春:吉林大学,2019.
GUO Mingzhuo. Design and key technology research of stubble breaking and subsoiling combined machine based on dynamic bionics[D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)

[109] 钮生振. 深松整地联合作业机的设计与试验研究[D]. 长春:吉林农业大学,2019.

NIU Shengzhen. Design and experiment study of combined operation machine for deep loosening and land preparation[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[110] Max-Chisel联合作业机[EB/OL]. [2025-01-23]. https://www.greatplainsag.com/en/products/9641/max-chisel%C2%AE.

[111] 2730 系列灭茬深松联合作业机[EB/OL]. [2025-01-23]. Tillage | 2730 Combination Ripper | John Deere US. https://www.deere.com/en/tillage12730-combination-ripper/.

[112] 1SL 系列深松旋耕联合作业机[EB/OL]. [2025-01-23]. https://www.nongjitong.com/company/category/324396.html.

[113] 1ZF 系列联合整地作业机[EB/OL]. [2025-01-23]. https://www.nongjitong.com/company/33083/55338417.html.

[114] 1GZN 系列联合整地作业机[EB/OL]. [2025-01-23]. https://www.nongjitong.com/company/category/324328.html.

[115] 刘鹏. 异速对辊式玉米秸秆粉碎抛撒还田机研究[D]. 北京:中国农业大学,2022.
LIU Peng. Research of double rollers type maize stalk chopping and spreading machine with different rotational velocities [D]. Beijing: China Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[116] 中国科学院. 黑土地保护与利用报告(2022)[R/OL]. https://www.cas.cn/cm/202307/t20230725_4953103.shtml

[117] 付敏,高泽飞,陈效庆,等. 秸秆微粉碎刀具结构设计与粉碎性能数值模拟[J]. 可再生能源,2024,42(10):1279-1288.
FU Min, GAO Zefei, CHEN Xiaoqing, et al. Structure design and pulverizing performance numerical simulation of straw micro-pulverizing cutter[J]. Renewable Energy Resources, 2024, 42(10): 1279-1288. (in Chinese)

[118] 王将,王晓燕,李洪文,等. 水稻秸秆激荡滑切与撕裂两级切割粉碎装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(10):28-40.
WANG Jiang, WANG Xiaoyan, LI Hongwen, et al. Design and experiment of rice straw chopping device for agitation sliding cutting and tearing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 28-40. (in Chinese)

[119] 王金峰,张鑫,唐汉,等. 水稻秸秆反旋深埋滑切还田刀优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(11):28-39.
WANG Jinfeng, ZHANG Xin, TANG Han, et al. Optimal design and experiment of deep-buried reverse rotating sliding cutting straw returning blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 28-39. (in Chinese)

[120] 陈立才,王康军,吴罗发,等. 南方水田高留茬秸秆还田起浆机设计与试验[J]. 中国农机化学报,2022,43(5):179-185.
CHEN Licai, WANG Kangjun, WU Luofa, et al. Design and experiment of cultivator for high stubble straw returning pulping in southern paddy field[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(5): 179-185. (in Chinese)

[121] 林静,齐林,薄鸿明,等. 条带深松清垄秸秆混埋联合作业机的设计与试验[J]. 农机化研究,2019,41(1):77-84.
LIN Jing, QI Lin, BO Hongming, et al. Design and experiment of combined operation machine for banding subsoiling rideg cleaning and straw mixed returning[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(1): 77-84. (in Chinese)

[122] 薄鸿明. 1GTJH-3 玉米条带秸秆混拌还田机的设计与试验[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2017.
BO Hongming. Research and design on soil disk corn stubble cutting characteristics testing device[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[123] 琚佳伟. 玉米秸秆粉碎分量混埋覆盖机设计与试验[D]. 北京:中国农业大学,2018.
JU Jiawei. Design and experiment of the straw chopping machine for mixed-burying or covering [D]. Beijing: China Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[124] 杨超. 玉米秸秆碎混还田联合整地机关键部件的设计与试验[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2023.
YANG Chao. Design and experiment of key components of corn straw crushing and mixing returning combined soil preparation machine[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[125] 王后升. 旋耕刀-埋指组合式秸秆还田机设计与试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2023.
WANG Housheng. Design and experiment of the rotary blades and burying fingers combined tillage machine for maize stalk being returned to field[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[126] 赵春凯. 苏打盐碱地土壤亚表层秸秆隔层阻盐复式作业机研究[D]. 长春:吉林农业大学,2018.
ZHAO Chunkai. Research on salt alkali soil layer soil layer straw barrier salt resistance compound machine[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[127] 孙妮娜. 东北稻区秸秆粉碎还田整地复式作业机研究[D]. 北京:中国农业大学,2020.
SUN Nina. Study on duplex dtraw drushing returning and soil preparation machine in the northeast rice area[D]. Beijing: China Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[128] 王秀如. 驱动拨盘式秸秆翻埋机的设计与试验研究[D]. 长春:吉林农业大学,2023.
WANG Xiuru. Design and experimental study of driven dial straw dumping machine [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[129] CHEN L, YAO B, PENG Y, et al. Effects of straw return and straw biochar on soil properties and crop growth: a review[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 986763.

[130] 陈桂斌,卢彩云,何进,等. 秸秆条带捡拾粉碎深埋装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(10):16 – 27.
CHEN Guibin, LU Caiyun, HE Jin, et al. Design and experiment of straw pickup-crushed and deep buried device under strip-tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 16 – 27. (in Chinese)
[131] 白雪卫,郝岩,白鑫,等. 自走式秸秆制粒机捡拾装置设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报,2021,52(6):697 – 707.
BAI Xuewei, HAO Yan, BAI Xin, et al. Design and experiment on picking-up device of mobile straw pelleter[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2021, 52(6): 697 – 707. (in Chinese)
[132] 田阳,林静,李宝筏. 气力式秸秆深埋还田机输送装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(12):36 – 44.
TIAN Yang, LIN Jing, LI Baofa. Design and test of conveying device of pneumatic straw deep burying and returning machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 36 – 44. (in Chinese)
[133] GU Fengwei, ZHAO Youqun, WU Feng, et al. Simulation analysis and experimental validation of conveying device in uniform rrushed straw throwing and seed-sowing machines using CFD – DEM coupled approach[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 193: 106720.
[134] 高文英,林静,李宝筏,等. 玉米秸秆深埋还田机螺旋开沟装置参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(9):45 – 54.
GAO Wenying, LIN Jing, LI Baofa, et al. Parameter optimization and experiment for spiral type opener device of maize straw deep bury and returning machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 45 – 54. (in Chinese)
[135] WANG J, XU Y, WANG C, et al. Design and simulation of a trenching device for rice straw burial and trenching based on MBD – DEM[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 207: 107722.
[136] 1JQ – 280S 秸秆切碎还田机[EB/OL]. http://www.shenghenj.com/cpzs/jghtj/323.html.
[137] 1JH 秸秆粉碎还田机[EB/OL]. http://www.hbchungeng.com/products_details/15.html.
[138] 1JHS – 180 秸秆粉碎还田机[EB/OL]. https://www.dhbl.net/product_details/36.html.
[139] 1BJBG – 4.0 高速灭茬缺口圆盘耙[EB/OL]. http://www.yituo.com.cn/cpzx/jjcp/.
[140] L – 1LYFT – 445 液压翻转犁[EB/OL]. http://www.zzlfny.com/products/23041023_productdetail.html.
[141] 孙静. 生物炭和有机肥对白浆土的改良效应及其机制研究[D]. 北京:中国科学院大学,2023.
SUN Jing. The effect of biochar and organic fertilizer on albic soil and its mechanism[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2023. (in Chinese)
[142] 孙冬霞,李明军,吴爱兵,等. 有机肥及其配套机械化技术的研究进展[J]. 中国农机化学报,2019,40(2):72 – 80.
SUN Dongxia, LI Mingjun, WU Aibing, et al. Research progress of organic fertilizer and its supporting mechanization technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(2): 72 – 80. (in Chinese)
[143] 杨伟男. 散粒有机肥定量排肥机构优化与控制系统研究[D]. 北京:中国农业科学院,2020.
YANG Weinan. Research on optimization and control system of quantitative fertilizer discharging mechanism for bulk organic fertilizer[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020. (in Chinese)
[144] 张振. 小麦有机肥沟施施肥机关键部件设计与试验[D]. 郑州:河南农业大学,2024.
ZHANG Zhen. Design and experiment of key components of organic fertilizer ridge fertilizer applicator for wheat[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2024. (in Chinese)
[145] 彭才望,许道军,贺喜,等. 黑水虻处理的猪粪有机肥离散元仿真模型参数标定[J]. 农业工程学报,2020,36(17):212 – 218.
PENG Caiwang, XU Daojun, HE Xi, et al. Parameter calibration of discrete element simulation model for pig manure organic fertilizer treated with *Hermetia illucen*[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(17): 212 – 218. (in Chinese)
[146] 李娟,何晓宁,王东伟,等. 新型农家肥果园自动施肥机的设计与试验[J]. 农机化研究,2020,42(6):46 – 51.
LI Juan, HE Xiaoning, WANG Dongwei, et al. Design and experiment of new farmyard manure orchard automatic fertilizer applicator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(6): 46 – 51. (in Chinese)
[147] 付静,张富贵,曾以明,等. 基于 EDEM 的有机肥排肥性能分析与试验[J]. 农机化研究,2019,41(12):51 – 57.
FU Jing, ZHANG Fugui, ZENG Yiming, et al. Performance analysis and test of organic fertilizer discharge based on EDEM [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(12): 51 – 57. (in Chinese)
[148] 郝延杰,王成,吴爱兵,等. 精准有机肥施肥机的设计与试验[J]. 农机化研究,2021,43(3):87 – 94.
HAO Yanjie, WANG Cheng, WU Aibing, et al. Design and test of precise organic fertilizer applicator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(3): 87 – 94. (in Chinese)
[149] 杨伟男,陈永生,吴爱兵,等. 基于 FPGA 的有机肥撒施机控制系统研究[J]. 中国农机化学报,2020,41(4):158 – 162.
YANG Weinan, CHEN Yongsheng, WU Aibing, et al. Research on control system of organic fertilizer spreading machine based on FPGA[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(4): 158 – 162. (in Chinese)
[150] 2FX – 800 撒肥机[EB/OL]. https://www.nongjitong.com/product/11933.html.
[151] ProTwin Slinger8110 撒肥机[EB/OL]. https://www.nongjitong.com/product/kuhn_protwin_slinger_fertilizing_machine.html.
[152] 2FH – S 型抛撒肥机[EB/OL]. https://www.nongjitong.com/product/sdluzhoujx_99128784.html.
[153] VFW 型液态有机肥撒肥机[EB/OL]. https://www.nongjitong.com/product/fulinge_vfw20000_fertilizing_machine.html.