

引用本文格式 陈壮. 精密播种机关键技术研究进展[J]. 农业工程, 2025, 15(8): 18-22. DOI: 10.19998/j.cnki.2095-1795.202508304. CHEN Zhuang. Research progress on key technologies of precision planter[J]. Agricultural Engineering, 2025, 15(8): 18-22.

精密播种机关键技术研究进展

陈 壮

(山西省农业机械发展中心, 山西 太原 030027)

摘要: 根据精密播种机特点, 从排种器驱动技术、播种监控技术、播深控制技术和变量播种技术4个方面, 分析归纳精密播种机关键技术优缺点、现状与发展趋势, 针对播种机关键技术目前存在的问题提出建议, 以便为精密播种机的研究和相关政策的制定提供一定参考。

关键词: 播种机; 高性能; 关键技术; 排种器; 传感器

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 2095-1795(2025)08-0018-05

DOI: 10.19998/j.cnki.2095-1795.202508304

Research progress on key technologies of precision planter

CHEN Zhuang

(Shanxi Agricultural Machinery Development Center, Taiyuan Shanxi 030027, China)

Abstract: Based on precision planter characteristics, key technologies of precision planter were analyzed and summarized from four aspects: seed metering device driving technology, seeding monitoring technology, sowing depth control technology, and variable-rate seeding technology. Advantages and disadvantages, current status, and development trends of these key technologies were discussed. Several recommendations were proposed to address existing challenges in key technologies for planters, to provide references for research advancement on precision planter and formulation of related policies.

Keywords: planter, high-performance, key technologies, seed metering device, sensor

0 引言

精密播种技术通过精准控制种子粒数、间距和深度, 实现单粒播种, 优化植株密度和空间分布, 增强光合作用效率, 从而提高产量。《2024—2026年全国通用类农业机械中央财政资金最高补贴额一览表》中, 对高性能播种机提出的要求包括排种器形式、作业速度、仿形方式和镇压机构等。本研究对精密播种机关键技术进行归纳总结, 针对存在的问题提出建议, 为确定播种机的发展方向 and 制定发展策略提供参考。

1 排种器驱动技术

排种器是播种机的核心部件, 而排种器驱动方式直接影响排种质量。排种器驱动方式分为地轮驱动、液压驱动、电动机驱动^[1]。国内播种机驱动方式主要采用地轮驱动, 国外一些知名企业则可以实现驱动方式的选配。地轮驱动成本低、工作可靠; 缺点是传统

地轮传动依赖机械链条/胶带联动, 易因地轮打滑导致漏播, 需频繁手动调节链轮, 不方便调节株距, 播种精度不高, 难以实现高速播种。液压驱动系统与电动机驱动系统在结构特性及控制性能方面存在显著差异。液压驱动系统凭借紧凑的结构设计和较小的运动惯性, 展现出快速的动态响应能力, 配合大驱动扭矩特性可实现宽范围无级调速, 在重型机械领域具有应用优势。但液压驱动系统需配置比例流量控制装置导致成本较高, 存在最低稳定转速限制, 并且能量损耗较大、故障排查难度较高。相对而言, 电动机驱动系统在控制方面更具技术优势, 其简洁的机械结构配合数字化控制技术, 不仅能实现更高精度的速度、方向与启停控制, 还具备更优的高速适应性和模块化控制能力, 特别在需多单元独立控制的播种作业场景中表现突出。

电驱电控技术作为机电一体化核心方向, 已成为全球农业装备升级的重要趋势, 也是实现高速精密播种的重要技术。电驱国际头部企业已推出成熟产品线,

收稿日期: 2025-04-10 修回日期: 2025-06-11

作者简介: 陈壮, 硕士, 工程师, 主要从事农业机械鉴定研究

E-mail: 1295404817@qq.com

在线投稿
www.d1ae.com

如挪威 Kverneland 公司生产的高速精密播种机，最高播种速度 18 km/h^[2]；John Deere ExactEmerge™ 系统播种速度 20 km/h。国内企业则处于工程化验证阶段，如乌兰浩特市顺源农牧机械制造有限公司制造的 2BGZ-8 型高速智能播种机速度可达 16 km/h。电机驱动排种器的方式分为驱动排种器传动机构、驱动排种器内种盘和驱动排种器主轴 3 种^[3-4]。直接驱动排种器主轴的方式展现出显著优势^[5]：第一，没有复杂的传动机构，系统结构更为简化；第二，各排种单体间独立控制特性不仅避免机械联动干扰，还为农作物套种提供技术可行性，有助于提升单位面积产量和经济效益；第三，有效降低对种盘的机械磨损，增强电驱动播种系统的运行稳定性和设备耐久性，同时其高效能特征更能适应现代农业对高速播种作业的技术需求。SINGH T P 等^[6]设计一种电控装置，将电机与排种器同轴安装连接，采用电机直接驱动排种器主轴旋转的方式实现精准播种作业，其性能参数完全符合设计要求，系统运行稳定可靠。

2 播种监控技术

监控系统主要由传感器、控制器和人机交互界面等组成^[7]。传感器可对播种机作业状态与参数进行测量，并将相关数据传输给控制器。控制器作为系统数据处理中枢，承担数据收发和处理任务。人机交互界面提供可视化操作终端，集成触控显示屏与物理控制面板，支持作业参数实时监控。

2.1 传感器

现代农业高性能播种机配备多传感器集成监控系统，通过实时采集-传输-反馈机制对核心作业参数进行动态监控。传感器主要测量土壤含水率、播种均匀性、播量、播深、下压力、排种轴转速、机器行进速度、种肥箱料位及北斗定位信息等关键数据，并通过人机交互界面显示^[8]。传感器不仅实现播种作业状态的实时感知与异常预警，更为播种深度控制、株距调节等精准作业提供数据支撑，显著提升播种质量与设备智能化管理水平。

根据传感器对种子感知原理，可分为光电式传感器、电容式传感器、压电式传感器等^[9]。

光电式传感器凭借其结构简单、部署便捷的特点，在播种质量监测中具有重要应用价值。针对玉米、花生等大粒径种子，其显著遮光效应可使监测系统达到较高的信号辨识度，监测灵敏度与可靠性好。然而在中小粒径种子监控中，光电式传感器监控技术面临双重挑战。一方面，细微种子遮光量不足导致漏播识别困难，重播现象的检测精度存在明显偏差；另一方面，田间复杂作业环境中的粉尘干扰、光照波动等因素会

削弱光束穿透效率，造成信号衰减与误判率上升。KARIMI H 等^[10]基于光电式传感器，利用红外种子传感器设计播种机监控系统，光电式传感器被单独安装在播种机单体上，能够实现各项播种性能指标如漏播、重播和播种均匀性的实时监控。

电容式传感器监控技术存在显著的粒径适配性局限^[11-13]。在大中粒径种子监测领域，研究已证实其可行性，但受制于电极间寄生电容干扰及环境耦合效应，实际监测精度普遍低于理论值 5~8 个百分点。对于芝麻等介电常数低的微小粒径种子，电容式传感器的有效电容波动信号已接近监测阈值，导致信噪比不足而无法可靠识别。电容式传感器的监控技术突破需聚焦双路径优化：一方面，开发多频传感结构以抑制寄生干扰；另一方面，通过纳米级电极微加工提升微小种子电容响应灵敏度。陈建国^[14]基于电容式传感器，研发精量播种机监控系统，创新性地建立监测分辨率-播种速度-采样频率多参数耦合模型，经验证，该系统在标准试验条件下的监测精度达到 99.57%，具备田间复杂工况下的持续稳定监控能力。

压电式传感器的播种监控技术是基于接触式传感原理，依赖种子与压电式传感单元发生碰撞实现监测^[11-13]。压电式传感器的监控技术在实验室环境下展现出较高的识别准确率，但在实际田间作业中面临双重技术壁垒。其一，排种器机械振动、土壤颠簸等耦合会显著降低信噪比，导致有效信号识别率下降；其二，排种管内嵌式传感器安装会改变种子流场分布，实测数据显示种子下落轨迹偏移量可达±8 mm，直接影响播种均匀性。优化方向需流场仿真建模，找出抑制振动的方法，同时开发柔性压电薄膜等非侵入式传感结构，在保证监测精度的前提下消除对播种过程的干涉。黄东岩等^[15]针对指夹式精量排种器研发播种监控系统，采用 PVDF 压电薄膜作为接触式传感单元，将物理信号转为电信号，通过 STC89C52 单片机处理信息；经田间验证，该系统在 8 km/h 作业速度下对播种量统计误差<1.5%，较传统光电式监控技术功耗降低 40%，漏播识别率≥95%。

2.2 控制器

播种机控制器主要分为单片机、PLC、嵌入式组态屏^[16]。单片机数据处理能力强，存储量大；缺点为抗电磁干扰能力弱，易因振动、温湿度变化导致程序崩溃，编程维护困难。PLC 运行平稳可靠，学习门槛低；缺点为各品牌 PLC 模块接口不兼容，扩展需专用配件。嵌入式组态屏学习门槛低，功能简洁；缺点为界面控件与图标风格固化，自定义开发灵活性不足，固件升级依赖厂商支持，新功能适配周期长。高精度作业场景优先选用单片机，需加强屏蔽防护；稳定性优先场

景推荐 PLC, 需统一品牌硬件体系; 快速部署需求, 嵌入式组态屏更适合中小型农场标准化作业。

2.3 人机交互界面

人机交互界面 (human-machine interface, HMI) 是人与计算机系统之间实现信息交换的媒介, 负责将机器内部数据转化为人类可感知的形式 (如视觉、触控等), 同时接收并执行人类操作指令。本质是通过双向通信平台, 降低人机协作的复杂性, 提升交互效率与体验。人机交互界面分为传统交互界面、现代交互界面及智能交互界面。传统交互界面: 一是字符显示型, 基于 LCD 屏与物理按键, 以文字/数字展示设备状态 (如温度、质量), 支持基础参数调整; 二是物理控制面板, 由按钮、指示灯等硬件构成, 适用于高振动、粉尘环境的工业设备控制。现代交互界面: 一是图形用户界面 (GUI), 通过高分辨率触控屏实现图标化操作, 支持动态图表显示 (如农机作业进度、故障代码); 二是触摸屏界面, 集成手势操作 (缩放、滑动), 适配复杂场景 (如农机导航地图、多设备协同控制)。智能交互界面: 一是语音/手势交互, 支持方言指令识别与非接触式操作, 降低驾驶员分心风险; 二是增强现实 (AR) 界面, 叠加虚拟作业边界或障碍物预警, 提升操作安全性 (如农机避障导航); 三是物联网融合界面, 通过 API 调用第三方 AI 服务, 实现远程监控与数据互通, 如多农机协同调度。

3 播深控制技术

播深控制技术分为被动控制技术和主动控制技术^[17-18]。传统播深控制技术采用平行四杆机构配合镇压轮/限深轮实现地面仿形, 通过机械弹簧减振保持播深一致性^[19-20]。传统播深控制技术全程无主动调节能力, 无法适应土壤条件动态变化。拖拉机悬挂系统早期通过调节三点悬挂机构角度控制作业深度, 现已发展为单体仿形技术, 显著提升播种深度均匀性, 但仍属于被动控制范畴。

目前, 国外先进播深控制技术通过机电液一体化系统来调节播深, 如德国 Horsch 公司, 通过集力传感器实时监测地表压力, 液压系统动态调节下压力, 从而实现播深调节; 美国 Precision Planting 公司, 采用双气囊气力装置, 通过气压增减实现开沟器升降控制。ZHUO L M 等^[21] 结合电液控制和 PID 控制算法, 实现下压力动态调节, 从而实现播种深度控制。国外通过综合运用角度传感器、位移传感器、压力传感器和超声波传感器等, 采用物理量协同测量实现精准播深计算与控制。国内目前已开展大量播深主动控制技术研究, 但实际应用仍以机械弹簧+平行四杆被动仿形为主。白慧娟等^[22] 通过控制镇压力、下压力来控制播种深度,

结果表明, 播种深度合格率均值 91.33%, 变异系数 8.98%。

4 变量播种技术

变量播种技术 (variable rate seeding, VRS) 是精准农业的核心技术之一, 是基于田间环境差异动态调整播种密度与深度的智能化种植方法^[23]。变量播种技术实施需集成土壤肥力监测、播量决策与播量精准调控 3 大技术体系^[24]。首先, 通过近地传感器网络与无人机多光谱遥感技术融合, 实时获取土壤氮磷钾含量及有机质空间分布, 基于 GIS 技术构建 200 m×200 m 网格化土壤数据库, 实现 0~40 cm 土层三维肥力建模, 精准识别田块肥力梯度差异^[25]。其次, 依托物联网平台集成历史产量、品种需肥特性和气象预测数据, 运用 DSSAT 作物生长模拟系统建立土壤-品种-气候耦合模型, 通过 4.5 万~7.5 万株/hm² 密度梯度模拟确定最优播种阈值, 并借助北斗卫星定位生成包含三维坐标的数字化播种指令集。最后, 通过配备 GPS 定位系统的变量播种机实现 10 cm 级定位精度, 采用 CAN 总线协议控制液压马达完成毫秒级播量调节, 同步建立 PID 算法动态修正机制, 使单位面积落种误差率稳定控制在 3% 以内。实际应用表明, 变量播种技术体系可使玉米播种密度优化 15%~30%, 较传统均播增产 8%~12%, 实施过程中需确保土壤检测网格密度≥0.33 hm²/点且播种机行进速度≤8 km/h, 以保障调控精度。周鹏等^[25] 设计一种车载式土壤全氮检测仪, 作业速度 3.2 km/h 时, 检测的土壤全氮值与实际值相关系数 0.9182, 检测精度符合变量播种作业的需要。美国 Climate 公司收集 82 万个试验地点的相关数据建立玉米最佳播种量决策模型, 并以此为根据研发 FieldView 处方图决策平台^[26]。

5 发展瓶颈与应对策略

目前, 在精准农业、智慧农业的背景下, 高速、高精度、智能化是精密播种机的发展趋势, 同时对变量播种也提出新的要求。

(1) 地轮驱动已不能满足高性能播种机的发展要求, 但电驱动排种器因制造成本和技术问题尚未在我国大规模应用^[27]。电驱动排种器性能指标 (如播种精度、能耗效率) 缺乏统一评判标准, 不同厂商采用差异化的测试方法, 导致产品兼容性差、质量参差不齐。未来, 可以参考电动汽车充电设备标准化经验 (如统一充电桩接口协议), 建立电驱动排种器测试认证平台, 覆盖田间作业稳定性、极端环境适应性等场景。通过产业集群建设, 推动标杆企业主导标准制定, 加速技术成果转化。

(2) 国外高性能传感器成本较高, 我国缺乏国产化高性能传感器, 制约播种机监控技术发展。具体表现: 一是在高速、精准播种趋势下, 传感器在漏播、重播、播种均匀性和播深控制等方面有待提高; 二是在田间作业情况下, 受尘土等恶劣环境影响, 传感器监测精度和稳定性下降严重。未来, 面向土壤养分监测、播深控制、种子定位等差异化需求, 重点开发多场景适配的高精度传感器。如采用抗电磁干扰的激光测距模块(精度 ± 0.2 cm)和耐候性压电薄膜传感技术(湿度耐受 10%~95%RH), 攻克复杂工况下信号稳定性难题。

(3) 我国播种机普遍采用机械弹簧与平行四杆机构实现被动仿形, 导致播深精度波动范围超过 ± 1.5 cm, 并且地形适应性不足。发达国家已规模化应用基于压力传感器与电液伺服系统的主动控制技术, 在玉米、棉花等作物播种中实现 ± 0.5 cm 级动态调节能力^[28]。未来, 提升国内播深控制水平需突破多模态传感融合(如集成激光测距与北斗定位)、智能液压执行机构研发等关键技术, 同时推动传感器接口标准化与模块化设计, 以适配大田、丘陵及水田等复杂场景的精准作业需求^[29]。

(4) 变量播种技术方面, 国外已研制多种结构的变量播种机, 取得一定规模的应用; 国内尚未有成熟的变量播种核心技术。未来, 一是研发高精度土壤墒情快速检测装备, 为变量作业提供实时数据; 二是搭建变量播种智能决策模型, 依托数据平台优化播量调控; 三是突破电驱动排种关键技术, 开发基于无刷电机精密控制的高效电驱排种器, 提升播种精度与响应速度, 支撑精准变量播种。

6 结束语

本研究梳理精密播种机的 4 大关键技术。排种器驱动技术, 对比分析地轮、液压和电动 3 种驱动方式的特性, 指出电驱动技术是突破高速精密播种的关键; 播种监控技术, 重点探讨光电、电容和压电 3 类传感器的田间适用性差异; 播深控制技术, 揭示现有液压/电动调节系统的精度瓶颈; 变量播种技术, 强调监测数据与实时控制融合的重要性。提出未来建议: 一是加快电驱动系统国产化进程, 建立标准化测试体系; 二是突破传感器融合技术; 三是开发适应环境的控制系统。

参考文献

[1] 苑严伟, 白慧娟, 方宪法, 等. 玉米播种与测控技术研究进展[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(9): 1-18.

YUAN Yanwei, BAI Huijuan, FANG Xianfa, et al. Research progress on maize seeding and its measurement and control technology[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(9): 1-18.

[2] 周长安, 郑来臣, 张树明, 等. 高速精密播种机结构原理及先进机型[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2025, 56(2): 293-301.

ZHOU Changan, ZHENG Laichen, ZHANG Shuming, et al. High-speed precision planter structure principle and advanced models[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2025, 56(2): 293-301.

[3] 戈天剑. 气吸式播种机播种智能电控系统[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2018.

[4] 张惠, 潘峰, 纪超, 等. 我国精量播种机自动化关键技术研究进展[J]. *现代农业装备*, 2022, 43(6): 2-9, 37.

ZHANG Hui, PAN Feng, JI Chao, et al. Research progress on automation key technology of precision seeder in China[J]. *Modern Agricultural Equipment*, 2022, 43(6): 2-9, 37.

[5] 杨柳, 衣淑娟. 基于 TRIZ 理论的电驱动排种器高效电机设计[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2023, 35(3): 95-100, 127.

YANG Liu, YI Shujuan. Innovative design of high efficiency motor for electric seed metering device based on TRIZ theory[J]. *Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University*, 2023, 35(3): 95-100, 127.

[6] SINGH T P, MANE D M. Development and laboratory performance of an electronically controlled metering mechanism for okra seed[J]. *AMA-Agricultural Mechanization in Asia Africa and Latin America*, 2011, 42(2): 63-69.

[7] 王海礁, 王晨平, 谢洪昌. 玉米精量播种机监控系统的研制[J]. *农机使用与维修*, 2023(3): 6-9.

WANG Haijiao, WANG Chenping, XIE Hongchang, et al. Development of a monitoring system for precision corn seeders[J]. *Agricultural Machinery Using & Maintenance*, 2023(3): 6-9.

[8] 刘家亮, 王文博, 张凡, 等. 基于堆叠式传感器的胡萝卜播种机监控系统[J]. *工程机械*, 2025, 56(1): 16-20, 210.

LIU Jialiang, WANG Wenbo, ZHANG Fan, et al. Monitoring system for carrot seeder based on stacked sensors[J]. *Construction Machinery and Equipment*, 2025, 56(1): 16-20, 210.

[9] 刘洋. 小颗粒气吸式排种器性能监测系统[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.

LIU Yang. Small particle air suction type meter performance monitoring system[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2019.

[10] KARIMI H, NAVID H, BESHARATI B, et al. Assessing an infrared-based seed drill monitoring system under field operating conditions[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 162: 543-551.

[11] 张莉莉, 牛巧萍, 韩方玲. 国内外播种监测技术研究现状及未来发展方向[J]. *南方农业*, 2024, 18(5): 196-200.

[12] 侯玉强, 李俊伟, 徐洛川, 等. 智能播种监测装置的研究进展[J]. *新疆农机化*, 2023(3): 21-23, 41.

HOU Yuqiang, LI Junwei, XU Luochuan, et al. Research progress of intelligent seeding monitoring device[J]. *Xinjiang Agricultural Mechanization*, 2023(3): 21-23, 41.

[13] 王淞, 衣淑娟, 李衣菲, 等. 精量播种机排种监测技术研究现状

- 与展望[J]. 中国农机装备, 2025(6): 120-122.
- WANG Song, YI Shujuan, LI Yifei, et al. Status and prospects of research on seeding monitoring technology for precision seeder[J]. *China Agricultural Machinery Equipment*, 2025(6): 120-122.
- [14] 陈建国. 小麦精量播种与精准控制智能决策系统研究与设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- CHEN Jianguo. Research and design of wheat precision seeding and precision control and intelligent designed system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.
- [15] 黄东岩, 贾洪雷, 祁悦, 等. 基于聚偏二氟乙烯压电薄膜的播种机排种监测系统[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(23): 15-22.
- HUANG Dongyan, JIA Honglei, QI Yue, et al. Seeding monitor system for planter based on polyvinylidene fluoride piezoelectric film[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(23): 15-22.
- [16] 郭玮, 牛彦明, 宋海燕. 精密播种机实时监测系统的设计[J]. *农业技术与装备*, 2024(7): 19-21, 24.
- GUO Wei, NIU Yanming, SONG Haiyan. Design of real-time monitoring system for precision seeder[J]. *Agricultural Technology & Equipment*, 2024(7): 19-21, 24.
- [17] 王泉玉, 徐琪蒙, 卢彩云, 等. 免耕播种智能化关键技术研究现状与发展[J]. *华南农业大学学报*, 2021, 42(6): 27-35.
- WANG Quanyu, XU Qimeng, LU Caiyun, et al. Research status and development of key technologies for no-tillage seeding intellectualization[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2021, 42(6): 27-35.
- [18] 丁启朔, 尤勇, 邢全道, 等. 基于精确播深控制目标的播种单体田间台架试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(11): 100-107.
- DING Qishuo, YOU Yong, XING Quandao, et al. Field bench test of seeding unit based on precise seeding depth control objective[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(11): 100-107.
- [19] 翟长远, 杨硕, 王秀, 等. 农机装备智能测控技术研究现状与展望[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(4): 1-20.
- ZHAI Changyuan, YANG Shuo, WANG Xiu, et al. Status and prospect of intelligent measurement and control technology for agricultural equipment[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(4): 1-20.
- [20] 刘福玉. 免耕播种智能化关键技术研究现状与发展[J]. *农业工程技术*, 2023, 43(20): 20-21, 32.
- [21] ZHOU L M, MA Y H, ZHOU H Y, et al. Design and test of sowing depth measurement and control system for No-till corn seeder based on integrated electro-hydraulic drive[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(10): 5823.
- [22] 白慧娟, 方宪法, 王德成, 等. 玉米播种机播深和压实度综合控制系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(9): 61-72.
- BAI Huijuan, FANG Xianfa, WANG Decheng, et al. Design and test of control system for seeding depth and compaction of corn precision planter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(9): 61-72.
- [23] 杜兆辉, 和贤桃, 杨丽, 等. 玉米精准变量播种技术与装备研究进展[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(9): 1-16.
- DU Zhaohui, HE Xiantao, YANG Li, et al. Research progress on precision variable-rate seeding technology and equipment for maize[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(9): 1-16.
- [24] 花登峰, 姜鹏, 高进, 等. 玉米机械化播种关键技术与装备研究进展[J]. *江苏农业学报*, 2025, 41(2): 393-403.
- HUA Dengfeng, JIANG Peng, GAO Jin, et al. Research progress on key technologies and equipment for mechanized maize sowing[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2025, 41(2): 393-403.
- [25] 周鹏, 李民赞, 杨玮, 等. 基于近红外漫反射测量的车载式原位土壤参数检测仪开发[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(9): 2856-2861.
- ZHOU Peng, LI Minzan, YANG Wei, et al. Development of vehicle-mounted in-situ soil parameters detector based on NIR diffuse reflection[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(9): 2856-2861.
- [26] Climate Field View. Increase yield with variable rate prescription tools[EB/OL]. (2022-11-12) [2025-03-27]. <https://climate.com/features/variable-rate-seeding/>.
- [27] 侯云涛. 电驱动高速精密播种技术的研究与发展[J]. *中国农业文摘-农业工程*, 2023, 35(4): 7-11.
- [28] 衣淑娟, 李怡凯. 主动仿形技术研究现状与展望[J]. *中国农机装备*, 2023(9): 2-7.
- YI Shujuan, LI Yikai. Research status and prospect of active profiling technology[J]. *China Agricultural Machinery Equipment*, 2023(9): 2-7.
- [29] 郭建. 小麦机械种植中播种深度精准控制技术的研究与应用[J]. *河北农机*, 2025(5): 28-30.