

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.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.02.020

## 玉米机械化播种关键技术与装备研究进展

花登峰<sup>1,2</sup>, 姜鹏<sup>1</sup>, 高进<sup>1</sup>, 施洋<sup>1</sup>, 孙健雄<sup>1</sup>, 陆镇威<sup>1</sup>, 王海洋<sup>1</sup>, 程芳梅<sup>1</sup>,  
杨华<sup>1</sup>, 王为<sup>1</sup>

(1.江苏沿海地区农业科学研究所/省部共建现代作物生产协同创新中心, 江苏盐城 224000; 2.农业农村部农业机械化总站, 北京 100122)

**摘要:** 玉米机械化播种是玉米产业提质增效的关键环节,也是促进现代农业转型升级、推进新型农机产品技术创新型研发的重要途径。根据玉米机械化播种技术的实施应用情况,本文从玉米种植模式、玉米机械化播种配套装备、玉米机械化播种关键技术及智能化技术在玉米机械化播种中的应用4个方面进行综述,阐述了当前中国玉米的种植概况及种植模式,重点介绍了玉米直播和移栽2种播种技术与装备的研究动态,结合精准农业背景,分析了智能化现代测控技术在玉米播种机械上的应用研究情况,涵盖播量监测、变量播种、自动导航等技术。在此基础上,提出了当前玉米播种机械化的发展难点,并对其发展趋势进行展望,以期对玉米播种机械化技术研究与应用提供参考。

**关键词:** 玉米; 播种; 直播; 移栽; 机械化; 精准农业

**中图分类号:** S352.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)02-0393-11

## Research progress on key technologies and equipment for mechanized maize sowing

HUA Dengfeng<sup>1,2</sup>, JIANG Peng<sup>1</sup>, GAO Jin<sup>1</sup>, SHI Yang<sup>1</sup>, SUN Jianxiong<sup>1</sup>, LU Zhenwei<sup>1</sup>,  
WANG Haiyang<sup>1</sup>, CHENG Fangmei<sup>1</sup>, YANG Hua<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>

(1. *Institute of Agricultural Sciences in the Coastal District of Jiangsu Province/Collaborative Innovation Center for Modern Crop Production Co-sponsored by Province and Ministry, Yancheng 224000, China*; 2. *China Agricultural Mechanization Center, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100122, China*)

**Abstract:** Mechanized sowing of maize is not only a key link to improve the quality and efficiency of maize industry, but also an important way to promote the transformation and upgrading of modern agriculture and promote the technological

收稿日期: 2024-03-16

基金项目: 江苏省亚夫科技服务专项[KF(23)1211]; 盐城市重点研发计划项目(YCBE202414); 中央粮油生产保障专项——响水县玉米单产提升项目(320921-2024-ZY-004); 江苏沿海地区农业科学研究所科研基金项目(YHS202209、YHS202203)

作者简介: 花登峰(1982-), 女, 江苏南通人, 硕士, 高级农艺师, 主要从事农业机械化研究。(E-mail) account06@163.com。姜鹏为共同第一作者。

通讯作者: 王为, (E-mail) ww462@126.com。杨华, (E-mail) ycyanghuayh@163.com

innovation and research and development of new agricultural machinery products. According to the implementation and application of maize mechanization sowing technology, this paper summarizes the maize planting mode, maize mechanization sowing equipment, maize mechanization sowing key technology and the application of intelligent technology in maize mechanization sowing. This paper expounds the current planting situation and planting mode of maize in China, and focuses on the research trends of two kinds of sowing technology and equipment of maize direct seeding and transplanting. Combined with the

background of precision agriculture, this paper analyzes the application of intelligent modern measurement and control technology in maize sowing machinery, including sowing quantity monitoring, variable sowing, automatic navigation and so on. On this basis, this paper puts forward the difficulties in the development of maize sowing mechanization, and looks forward to its development trend, in order to provide reference for the research of maize sowing mechanization technology and the creation and application of equipment.

**Key words:** maize; sowing; direct seeding; transplanting; mechanization; precision agriculture

玉米是重要的粮食作物,也被广泛应用于食品、青贮饲料、工业原料中,对于保障粮食生产安全具有举足轻重的作用<sup>[1-4]</sup>。2024年,中央一号文件指出实施粮食单产提升工程,集成推广良田良种良机良法,为玉米种植业的高质量发展提供了重要支撑。

使用优良品种是提高玉米产量的根本,而栽培技术则是提升玉米生产效率的重要手段。当前,在全国玉米总种植面积无法大规模持续增加的背景下,需要通过有效提高玉米单产的手段来推动玉米产业的稳步发展<sup>[5]</sup>。在大面积连片种植规模下,提高玉米机械化种植质量是影响玉米生产过程的重要因素之一<sup>[6-8]</sup>。中国玉米种植区域分布广泛,并结合不同地域衍生出了多种种植技术模式。因此,研发玉米机械化种植配套技术装备,有助于促进主粮作物高质、高效生产。

玉米机械化播种包括直播和移栽。直播主要将种子群形成单粒有序的单粒化状态并播至土壤的预定位置,作业效率高,适合大田种植。玉米育苗移栽属于典型的旱田作物移栽范畴,长势合格的幼苗可直接进行裸苗移栽,具有较高的光热资源利用率和存活率。随着研究手段的不断丰富,基于装备优化设计、模拟仿真、性能试验等方法的播种装备及关键部件得到了重大改进<sup>[9-11]</sup>。基于此,本文结合玉米种植概况与农艺要求,概述国内典型玉米机械化播种机具的发展现状,并总结玉米播种机械化技术成果,为行业发展提出相应的建议,以期对玉米播种机械化技术研究与装备创新设计提供参考。

## 1 玉米种植概况与机械化种植程度

按照区域气候条件,中国玉米种植主要分为北方玉米区、黄淮海夏玉米区、西南山地丘陵玉米区、西北灌溉玉米区<sup>[12]</sup>。如图1所示,截至2022年年底,中国当年玉米种植面积达 $4.307 0 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ,年产量的增长趋势明显。

玉米直播模式分为直接播种、覆膜播种及免耕播种。直接播种工序简单,播前精细整地,施足基肥后可直接开沟播种,适合玉米等中耕作物,但是后续

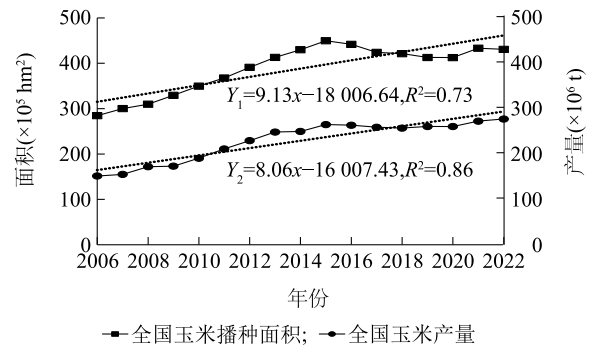


图1 2006-2022年中国玉米播种面积及产量

Fig.1 The planting area and yield of maize in China from 2006 to 2022

环境等因素会影响出苗情况;覆膜播种具有保湿保墒、抑制杂草的作用,被广泛应用于中国北方玉米种植区及西北灌溉玉米区;免耕播种模式在前茬作物收获后将秸秆均匀覆盖于地表,在次年春季对地表秸秆进行预处理后采用免耕播种机进行播种作业,具有改善土壤环境、节本增效等特点,有利于提高产量,被广泛应用于中国北方玉米区。

玉米移栽模式以夏季麦茬后免耕移栽为主,有利于抢抓农时,缓解玉米与前茬作物的接茬矛盾,保障玉米生长的有效生育期,适用于中国北方及黄淮海夏玉米区等<sup>[13]</sup>。常见的玉米直接播种方法包括等距播种、大垄双行播种和宽窄行播种。大垄双行、宽窄行播种(图2)改变了常规垄距、行距,具有满足密植、提高通风透光效果的特点。此外,宽窄行播种也可套作其他农作物,从而提高综合效益<sup>[14-17]</sup>。

资料显示,目前中国玉米生产机械化程度逐年上升,其中平均机耕率达97.7%,机播率超过80.0%,机收率为79.0%左右。中国玉米机械化播种已经达到一定水平,但仍以小型机械播种机具为主,精量播种水平仍低于部分发达国家。

## 2 玉米机械化播种技术与装备

### 2.1 玉米播种装备

#### 2.1.1 点(穴)播种装备 点(穴)播种装备的应用

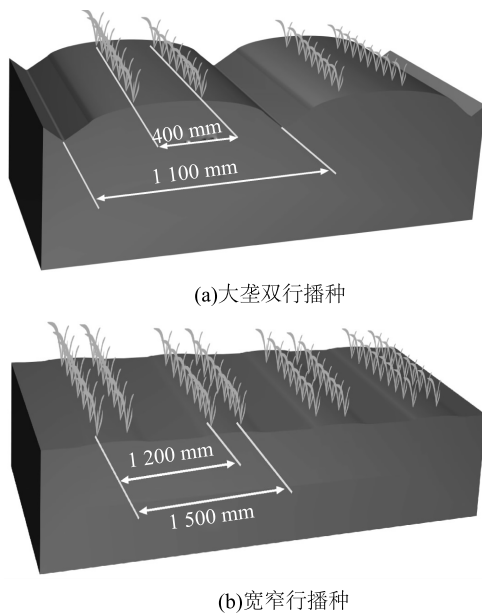
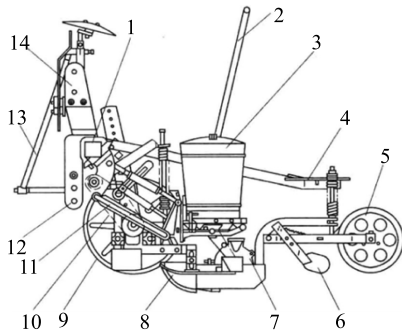


图2 玉米播种方法

Fig.2 Maize planting methods

较为广泛,其结构如图3所示。该装备为国内较早的典型玉米点播式播种机,作业时可一次完成松土、碎土、播种、覆土镇压等作业,播种单元上的排种器由地轮驱动,种子经由导种管及其末端开沟器播至特定位置后由镇压轮压实。



1:主横梁;2:扶手;3:种子筒及排种器;4:踏板;5:镇压轮;6:覆土板;7:成穴器;8:开沟器;9:行走轮;10:传动链;11:四杆机构;12:下悬挂;13:划行器;14:上悬挂。

图3 2BZ-6型玉米播种机

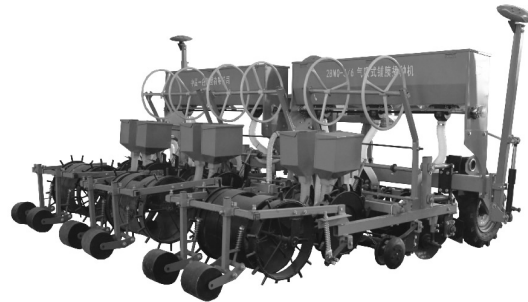
Fig.3 2BZ-6 maize planter

**2.1.2 覆膜播种装备** 覆膜播种装备(图4)由覆膜装置、播种装置组成,且以膜上打孔播种为主<sup>[18]</sup>。作业时,覆膜装置将地膜张紧铺至种床后由覆土圆盘在膜边覆土压膜,随后种子落入排种器鸭嘴端部,当鸭嘴完成膜上打孔动作时,鸭嘴打开并使种子落入种沟,最后覆土,推送器将碎土覆盖在种沟上,实

现覆膜播种作业。



(a)2MBJ-2/8铺膜播种机



(b)2BMQ-1/2覆膜播种机

图4 部分覆膜播种装备

Fig.4 Film planter

**2.1.3 免耕播种装备** 免耕播种装备(图5)由破茬装置、播种装置组成。工作时,先由破茬开沟装置破碎残茬、疏松种沟土壤,随后播种装置将种子播至由开沟器开出的种沟内,最后由镇压轮完成覆土镇压,实现在未耕整的土地上进行直播作业。

## 2.2 玉米移栽装备

**2.2.1 半自动移栽装备** 目前,玉米移栽装备以半自动装备为主,包括2Z-2型、2Z-4型、2ZY-2型及2Z-Y型等<sup>[19]</sup>,其结构如图6、图7所示。张茫茫等<sup>[20-22]</sup>为提高玉米移栽质量、移栽效率,分别对玉米移栽机的送苗装置、分苗装置和取苗栽植机构进行设计,并达到了预期要求。周福君等<sup>[23]</sup>以玉米钵苗移栽机为研究对象,通过试验研究获取了移栽机构的最优工作参数。

沈阳农业大学研制的玉米免耕移栽机(图7)可在未耕整土地上一次性完成破茬、开沟、栽植等多项操作<sup>[24]</sup>。江苏富来威公司研制的2ZBX-2吊杯膜上移栽机(图8)可在膜上完成玉米移栽作业。

**2.2.2 全自动移栽装备** 目前,国内对于全自动旱地移栽机的研究还处于试验与推广应用阶段,石铁<sup>[25]</sup>研制了1种全自动玉米秧苗移栽机,结果表

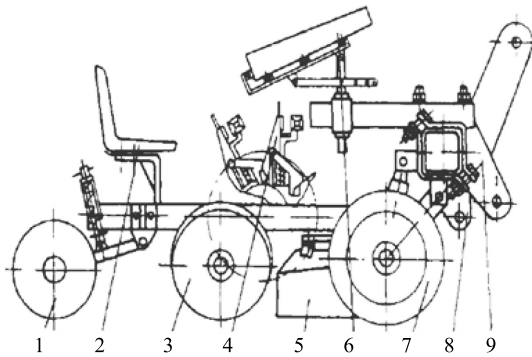


(a)DEBONT 2605免耕播种机



(b)2BQX-6免耕播种机

图 5 部分免耕播种装备  
Fig.5 No-till planter



1:覆土器;2:座位;3:压实轮;4:栽秧器;5:开沟器;6:秧盘;7:运输轮;8:挂接板;9:机架。

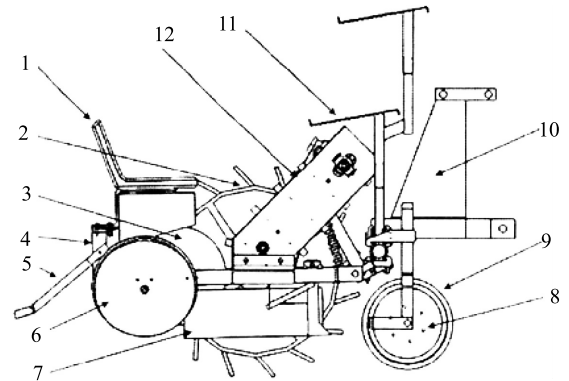
图 6 2YZ 玉米移栽机  
Fig.6 2YZ maize transplanter

明,当前进速度为2.5~3.0 km/h时,其株距合格率为93.2%,立苗合格率为91.2%。黑龙江省农业机械工程科学研究院研制的2ZYS全自动玉米移栽机(图9)具备自动上秧系统,适用于大垄种植,具有较高的移栽效率和质量。

### 3 玉米机械化播种关键技术

#### 3.1 开沟器与成穴器

玉米播种机械装备根据种植模式的不同,需要



1:座椅;2:行走轮;3:挠性圆盘;4:机架;5:覆土爪;6:覆土镇压轮;7:开沟器;8:限深轮;9:破茬刀;10:牵引架;11:秧苗盘;12:送苗机构。

图 7 玉米免耕移栽机  
Fig.7 Maize no-tillage transplanter

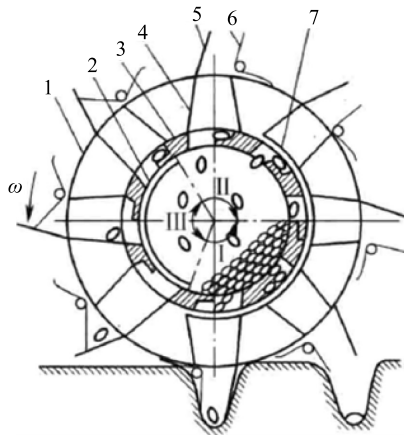


图 8 2ZBX-2 吊杯膜上移栽机  
Fig.8 2ZBX-2 cup film transplanter



图 9 2ZYS 全自动玉米移栽机  
Fig.9 2ZYS automatic maize transplanter

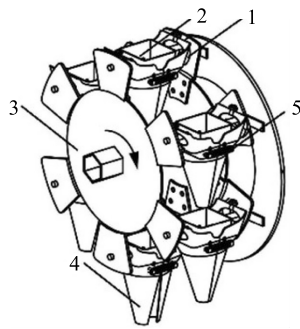
分别采用开沟器、成穴器开出种沟或掘出种穴。鸭嘴式成穴器多用于覆膜播种装备。如图10所示,工作时,利用固定鸭嘴在地面上凿出种穴,活动鸭嘴因地面的压力而旋转一定角度,此时鸭嘴张开,种子随即落入种沟。图11为移栽机鸭嘴式栽植器移栽成穴装置<sup>[26]</sup>,其原理与图10大致类似。



1:滚轮;2:内护种板;3:内充式排种器;4:导种管;5:固定鸭嘴;  
6:活动鸭嘴;7:外护种板。 $\omega$ :角速度。

图10 覆膜播种成穴装置

Fig.10 Mulch seeding cavitation device



1:导轨;2:投苗杯;3:同心圆盘;4:鸭嘴;5:复位弹簧。

图11 覆膜移栽成穴装置

Fig.11 Laminating and transplanting cavitation device

开沟器多用于直播、免耕播种装备,开沟器结构形式多样,分别适应不同的环境条件及种植模式(表1)。为了确保播种深度一致,开沟器多与仿形机构连接以适应地表的不平整。

表1 常用开沟器

Table 1 Commonly used furrow openers

类型	特点
双圆盘开沟器	可切断根茎残茬,不搅乱土层,并用下层湿土覆盖,适用于高速作业
单圆盘开沟器	入土能力强,结构较简单,但会使干湿土层略有混合,适用于墒情较好的地区
锄铲式开沟器	开沟阻力小,入土能力强,容易制造,对地块耕整质量要求高,易缠草壅土
芯铧式开沟器	开沟宽度大、深度深,适用于垄作地区种植,但开沟阻力大,不适合高速作业

## 3.2 播种技术与装置

3.2.1 精量排种技术 排种器是播种机械的核心部件(表2),其工作性能直接影响播种机械的整体作业质量<sup>[27]</sup>。水平圆盘式排种器的主要工作部件是位于种子筒底部的圆盘,圆盘上方设有清种器、推种器,周边设置型孔,借助种子自身重力和形状尺寸,使种子充入型孔,随后在投种区将种子推出排种口,播入种沟。刘艳芬等<sup>[28]</sup>对水平圆盘排种器的型孔进行重新设计,发现改变型孔后壁结构形状起到代替推种器的作用,在8.6 km/h的前进速度下仍能满足单粒精密播种的农艺要求。

窝眼轮式排种器位于种子箱底部,窝眼轮外缘开有1排整齐的窝。充种时依靠种子自身重力,当旋转至投种区后,种子再次在重力作用下落入种沟。伍皖闽等<sup>[29]</sup>将窝眼轮式排种器应用于玉米播种,结合阶梯型型孔的适应能力,分析型孔参数对玉米充种性能的影响。

勺式排种器的种勺均匀环绕安装在种盘上,勺盘转动时会带动种勺并从种箱中舀出1粒种子,当其转至上方后,勺翻转并在重力作用下使种子进入投种区,在鸭嘴张开后落入种沟。王金武等<sup>[30]</sup>设计了1种动定指勺夹持式玉米精量排种器,与农机企业合作生产系列播种装备,在黑龙江、吉林等地得到了推广应用。

指夹式排种器主要通过取种指夹主动从种子群中攫取籽粒,其结构形状及尺寸参数会直接影响排种器的作业质量。张学军等<sup>[31]</sup>设计了1种摆动夹取式玉米精量排种器,结果表明,排种合格指数为94.11%,漏播指数为2.52%,重播指数为3.37%。王金武等<sup>[32-33]</sup>分析了影响排种器作业性能的主要原因,分析了玉米精量排种器导种投送运移机制。

气吸式排种器主要利用空气真空度产生吸力,在真空室产生负压,并将种子吸附在排种盘上,再用刮种器刮去多余种子,当排种盘转至下方非真空区时,吸力中断,种子靠自身重力落入种沟。石林榕等<sup>[34]</sup>设计了弹性气吸嘴式滚轮排种器。王伟等<sup>[35]</sup>设计了1种气吸双行错置式玉米密植精量排种器,可以满足高速精量密植播种作业。李玉环等<sup>[36-37]</sup>对研制的气吸式排种器取种、清种、投种等环节分别进行了研究,同时为解决播种均匀性差的问题,对投种位置不一致、横向飞种现象进行了分析,确定了末端拨离阻气件的关键参数,改善了高速

作业条件下的排种性能<sup>[38]</sup>。

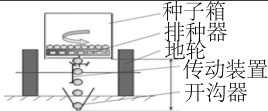
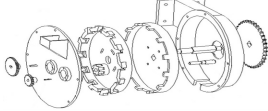
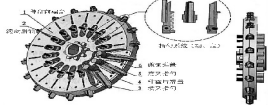
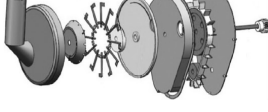

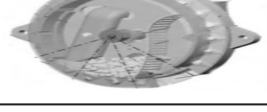
气吹式排种器的工作原理与窝眼轮式排种器基本相似,不同之处在于采用气流清种,当窝眼转到气流喷嘴下方时,会将多余种子从窝眼中吹出并落回至种子室,剩下的 1 粒种子由投种片投入种沟。崔涛等<sup>[39]</sup>设计了 1 种清种-压种组合气嘴的内充气吹式排种器,结果表明,当作业速度在 10 km/h 左右时,大扁粒、小扁粒种子均具有较好的适应性。

机械式排种器结构简单、成本低,被广泛应用于中小型播种机中,需要扰动种子群并使种子进入取种装置内,对种子尺寸要求严格。在高速播种的过

程中,会因夹持多粒种子而导致重播,或因部分种子堆积起拱,从而未能及时充填型孔造成漏播、降低播种精度。因此,一方面需要对种子进行丸粒化、磨光等加工处理,另一方面也需要对型孔、指夹等精量取种机构进行设计研究。气力式排种器对种子的适应性较好,对种子尺寸的要求不高,且不易损伤种子,可在不扰动种子群的情况下进行充种,但是其结构复杂,需要配备风机等设备,被广泛应用于大型播种机中。因此,在高速情况下,需要对其密闭结构的气场分布及气压平衡情况进行分析。

表 2 典型的玉米排种器

Table 2 Typical maize seed metering devices

类型	结构示意图	特点	改进后指标
机械式 圆盘式		结构简单,可根据种子形状、播量、株距等更换排种盘。但是,其线速度许用值较低,对种子形状要求高,需要配有对应播种需求的排种盘	合格率:92.13%;漏播率:4.01%;重播率:3.86% <sup>[28]</sup>
窝眼轮式		结构简单,较圆盘式好,投种高度低,可根据种子形状更换型孔,满足多种作物的点播,对小粒球状种子的效果最好,但是需要对种子进行清选分级,且易损伤种子	合格率:92.53%;漏播率:3.93%;重播率:3.54% <sup>[29]</sup>
勺式		结构简单,不易损伤种子,对种子形状要求不高,无需清种或投种装置,可调节传动比改变株距,广泛应用于中小型播种机,但是高速运转时易出现充种不及时的现象	合格率:87.11% <sup>[30]</sup>
指夹式		作业性能稳定,拆装方便,可以通过调节转速改变株距,对扁粒种子的效果较好,作业速度可达 8 km/h,但是结构复杂,指夹易磨损,需要定期更换,夹持力度过大,易损伤种子	合格率:94.11%;漏播率:2.52%;重播率:3.37% <sup>[31]</sup>
气力式 气吸式		通用性好,损伤率低,适用于不同形状的种子,适用于高速播种作业,广泛应用于大型播种机,但是气密要求高,排种器结构复杂,制造与使用要求高,风机能耗较大	合格率:95.54%;漏播率:0.50%;重播率:3.96% <sup>[34]</sup>
气吹式		充种型孔较大且有气流辅助充种,对种子的形状要求不高,排种性能较好,易实现单粒精播,但是清种依赖气流	合格率:>95.00% <sup>[39]</sup>

3.2.2 种子轨迹控制技术 在种子从机具到土壤的这一过程中,由于受到机械振动等因素的影响,种子速度会发生多次不确定的变化。因此,均匀有序的单粒种子能否通过轨迹控制技术实现精准着床也是影响精量播种的关键。

为了规范种子的运动轨迹,常用导种管约束并规划种子的运动路径,通过优化导种管基本参数可部分抵消种子的水平分速度。例如,赵淑红等<sup>[40]</sup>设计了

“V”形凹槽导种管,导管材料为高压聚乙烯树脂,提高了导种的均匀性和稳定性;董建鑫等<sup>[41]</sup>设计了导向投种机构,通过约束玉米种子的自由度来约束种子的运移路径;Liu 等<sup>[42]</sup>提出了主动式种子运动轨迹控制方法,相较于传统导种管具有明显优势。此外,也有研究者采用气流裹挟的形式对导种管中的种子自由度进行辅助性约束。刘瑞等<sup>[43]</sup>利用正压气流设计了辅助导种装置,结果表明,在气流场均匀稳定的情况下,作业速

度越高,该装置的作业性能越好。

另外,在播种末端常采用压种装置,快速将种子压入种沟,有利于减少种子的随机惯性运动,改善播种一致性。王云霞等<sup>[44]</sup>通过研究种子落地点相对压种轮的位置情况,分析了压种轮能够有效压种的理论条件,设计了适合于气流辅助投种的精量播种机压种装置,有效提高了株距一致性。吉林省农业机械研究院公开了1种空腔式压种轮射种机构,压种轮为开口空腔式,材质为中等硬度塑胶,有效防止了种粒弹跳散落现象。马斯奇奥(青岛)农业机械有限公司公开了1种双材质压种轮,其一方面具有较好的耐磨性,另一方面也具有一定的弹性。

综上所述,创制种子轨迹控制装置,实现了玉米种

子轨迹的主动干预,也是实现玉米精量播种的关键。

### 3.3 移栽技术与装置

移栽机构是移栽机械的核心部件,其工作性能会直接影响移栽机械的整体作业质量。玉米移栽分为裸苗移栽、钵苗移栽2种方式,但是目前相关基础研究及配套的玉米移栽机具均较少。如表3所示,现有的移栽机聚焦于移栽机构的创新设计,相关学者也同步开展了研究<sup>[45-46]</sup>。

目前,适用于玉米的专用移栽装置较少,与玉米种植模式的适配性较低。其原因在于,不同地区的整地要求、种植模式各不相同,配套育苗缺乏统一的技术标准,限制了大田移栽机械的使用。

表3 典型的移栽机械

Table 3 Typical planting machinery

装置类型	工作原理	特点
钳夹式	钳夹夹持秧苗随栽植盘旋转,随后将秧苗送至开沟器开出的移栽沟内	结构简单、作业效率较低、易伤苗、不适合膜上移栽种植 <sup>[47-48]</sup>
挠性圆盘式	输送带把秧苗送至2个挠性圆盘中间后,秧苗被圆盘夹持并栽到土壤中	适用于长茎裸苗作物,结构简单,株距、栽深不稳定,不适合膜上移栽种植 <sup>[47-48]</sup>
导苗管式	采用非强制性导苗方式,在重力作用下将秧苗导入移栽沟内	伤苗率低,株距调节灵活,不适合膜上移栽种植 <sup>[49]</sup>
吊杯式	吊杯随栽植圆盘到达最低点时打开底部,秧苗直接落入苗穴	适用于长茎幼苗及易碎钵体幼苗移栽,适合铺膜移栽种植 <sup>[50-51]</sup>
鸭嘴式	投苗杯将秧苗送至鸭嘴栽植器上方后打开底部,将秧苗投至鸭嘴栽植器中	满足多株距移栽要求,适合大株距移栽作物,适合垄作移栽种植 <sup>[52]</sup>

## 4 智能化技术在玉米机械化播种中的应用

玉米机械化播种配套技术装备成熟,满足包括覆膜播种、免耕播种等模式的农艺需要。为了满足玉米机械化播种的高质量发展,需要提高相关装备的智能化水平。

### 4.1 播种质量的在线监测技术

均匀种子流状态检测可对播种机各播种单元进行故障诊断,同时也可对播种质量进行评价。纪超等<sup>[53]</sup>设计了基于反射式红外光电感应的播种监测系统,在黏附尘土的情况下,其监测精度达98.1%。解春季等<sup>[54-55]</sup>设计了1种基于激光传感器的播种参数监测系统,在抗灰尘模拟试验中对合格率、漏播率等参数进行监控,结果表明,该系统在穿透透明壳体状态下的检测准确度达到95.4%。投种前的充种状态也是评价播种机出现漏播或重播状况的监测指标,贾洪雷等<sup>[56]</sup>采用光电传感器和旋转编码器相结合的方法,获取了排种

器内各个型孔的充种量,试验结果表明,系统对漏播、重播检测值与实际值的相对误差平均值分别为3.87%、8.42%。此外,电容监测<sup>[57]</sup>、压电监测<sup>[58]</sup>、机器视觉<sup>[59]</sup>等也可对播种质量进行在线监测。

播种深度也是评价播种质量的一个指标,保持相对一定的播种深度是影响出苗、长势的重要因素<sup>[60]</sup>。由于地表地貌环境、土壤坚实度等差异较大,对播种深度一致性的控制主要分为以弹簧、平行四杆仿形机构为主的被动式调节技术和以压电传感器、液压控制为主的力反馈主动调节技术<sup>[61-62]</sup>。白慧娟等<sup>[63]</sup>通过控制下压力、镇压力间接控制播种深度、压实度的效果,结果表明,该系统播种深度合格率均值为91.33%,变异系数为8.98%。Zhou等<sup>[64]</sup>在电液控制的基础上结合PID(比例、积分、微分控制器)控制算法,实现下压力的动态调节,实现了播种深度和土壤压实度的综合控制。

### 4.2 变量播种技术

变量播种技术的实施需要满足土壤肥力监测、

播量决策和播量精准调控 3 个条件。首先,基于近地传感、遥感等技术获取土壤信息指标,同时依据包括播量、土壤肥力、产量等在内的大量农业数据之间的影响机制,构建播种处方图;其次,在播种过程中,基于卫星定位信息、播种处方图确定当前播种位置及对应位置的播量;最后,采用控制器局域网(CAN)总线将播量决策传递至播量调控控制器,从而完成变量播种。开展此类研究的例子如下:Du 等<sup>[65]</sup>结合土壤肥力、天气、管理等农业大数据,建立了基于梯度提升决策树算法的玉米产量预测模型,制定了播量决策规则,为播量调控奠定了基础;He 等<sup>[66-67]</sup>设计了 1 种基于 CAN 通信和 Android 处方图的变量播种系统,该系统包括全球定位系统(GPS)、通信控制器、计算机、排种器单元控制器、播种驱动电机等,依据地理信息和当前定位,对各个排种单元进行独立控制并完成变量播种作业;Munnaf 等<sup>[68]</sup>设计了 1 种基于传感器的变量播种控制系统,在播种过程中利用拖拉机前部的传感器对土壤肥力指标进行实时采集,并通过车载计算机结合肥力播量决策系统计算当前位置的播种量,最后通过通信系统控制拖拉机后部的播种机,实现变量播种。

### 4.3 自动定位导航技术

近年来,研究者利用全球卫星定位导航系统、惯性导航系统、视觉导航等多传感器融合的方法实时感知农田的空间位置信息,同时将其与预设轨迹进行比对,并补偿随机误差,从而实现了农业机械的自动导航。在定位导航技术的支持下,机械化播种的种植精度可达厘米级,土地利用率提高了 0.5%~1.0%<sup>[69-70]</sup>。

张振国等<sup>[71]</sup>针对玉米免耕播种机播种过程易碰触根茬的不足,采用定位导航技术、神经网络、PID 控制算法相结合的方法纠正播种机当前位置与目标路径的偏差,从而实现避茬自动调偏功能。Sun 等<sup>[72]</sup>基于全球卫星定位导航系统、惯性导航系统,设计了针对曲线播种的玉米精密播种补偿定位算法,通过计算模型预测下一次播种位置,从而达到曲线区均匀播种的目的。Wang 等<sup>[73]</sup>设计了基于北斗导航的高速精密玉米播种控制系统,提高了机组在 8 km/h 高速下播种的均匀性、准确性。丁友强等<sup>[74]</sup>采用全球定位系统建立相关统计模型,并获取了播种机的包括当前速度、位置、作业参数、已作业面积等在内的状态信息,使用该模型测量已作业面积的

相对误差为 0.81%。颜丙新等<sup>[75]</sup>基于卫星定位、播种机结构特点构建了播种机组与播种单体相对位置模型,通过位置滞后补偿实现着床种子的位置定位。地轮驱动播种与智能化田间播种对比示意图 12。智能化田间播种技术是未来大田玉米机械化播种的发展趋势,在高密度、高速、高效的种植农艺措施背景下,将传感器技术、自动化控制技术、定位导航技术等应用于播种装备有助于提高玉米增收潜力<sup>[76]</sup>。

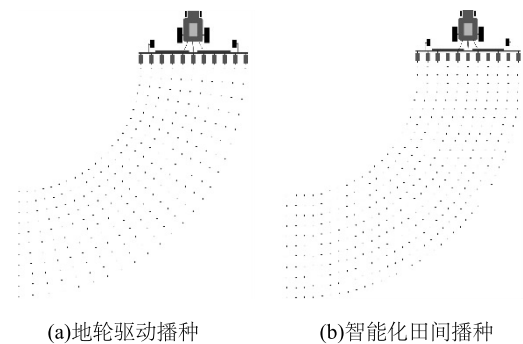


图 12 地轮驱动播种与智能化田间播种对比示意

Fig.12 Contrast diagram between ground wheel drive seeding and intelligent field seeding

## 5 结论与展望

### 5.1 结论

在推动精准农业、智慧农业发展的背景下,玉米机械化播种技术正得以快速发展。为了适应优质高效的种植模式,实现高质量、高效率、高标准的目标,国内外开展了大量研究,其特点如下:

(1) 中国玉米农艺种植模式较为多样化。根据区域划分,农艺模式可分为常规播种、免耕播种及覆膜播种,其目的皆在于保证植株能获得充足的阳光、营养和水分。在农艺种植模式方面,东北地区主要推广保护性耕作模式,可有效增强土壤蓄水、保墒能力;西北地区干旱少雨,多采用覆膜播种模式,具有保温保墒、改善品质效应等特点。近年来,中国西南及黄淮海地区大面积推广应用玉米大豆带状复合种植模式。总体而言,玉米播种机械化仍存在农机农艺融合不够的问题,距离高标准农田建设仍有较大差距。

(2) 玉米机械相关研究较多。例如,研究者采用理论分析、离散元仿真、试验验证等方法获取了影响播种质量的因素,探究了播种机理,为新型机具的研发提供了理论依据和技术参考。但是目前仍存在高速作业下

玉米种子以何种形式形成均匀单粒种子流、田间作业状况复杂、种子从机具到土壤这一过程中的运动状态并未完全可控等诸多难题亟需解决。

(3)国内旱地移栽装备仍然以人工辅助喂苗的半自动移栽方式为主。当前存在劳动强度大、综合效率较低等问题。虽然目前全自动移栽机械得到了广泛关注,但目前仍处于试验阶段。另外,中国地域差异大,育苗标准不统一,为了适应不同区域的玉米种植模式,结构简单的小型移栽机、自动化程度高的大型移栽机均具有较大应用需求。

(4)智能化田间播种技术应用已成为玉米播种机械化研究的热点。对于大田玉米直播而言,主要问题是如何推动播种装备的二次创新,以及研发工况参数、作业质量等可快速信息化获取的智能化播种装备;对于玉米移栽而言,主要问题是如何加快多元化移栽装备的创制,探索集自主导航、栽深控制、自动补苗等智能感知与自主决策于一体的未来移栽机器人。

## 5.2 展望

今后应进一步优化玉米产业布局,依靠各区位优势,探索适合当前地区的农艺种植模式,发展高效、高质、高产的种植体系,研究配套精量播种机具设备,结合节水、化肥农药减量施用、促进秸秆回收利用等措施,提高玉米生产管理水平和促进玉米种植区的均衡发展。针对覆膜种植不仅需要开展耐候地膜、可降解地膜的研究,还要兼顾残膜回收机具的研发。此外,还应加强玉米大豆带状复合种植农艺农机的相互结合,创制新型智能化玉米大豆一体化带状复合种植播种机械。

此外,应加强基础研究,探究适用于不同玉米种子形状结构且能够满足高速作业、不伤种子的播种机制,在基于现有装备的基础上开展交叉学科领域的探索研究。依据玉米种植农艺要求,集成研发相关播种机械,探索作物-土壤-机具的相互作用关系机制,形成集种子物理机械特性、新型结构创制,同时兼顾成本与可靠性的一体化播种机械。

另外,在发展工厂化育苗设施的基础上,应加强移栽机械各关键部件的理论分析,探究土壤-幼苗-机具的互作机制,采用包括拓扑学、功能函数等在内的现代设计方法,探索移栽机械结构的创新,采用先进制造技术提高移栽机械的喂苗频率,完善栽植性能和可靠性。此外,应结合种植要求开发相关专用、通用类移栽装备,同时应用智能化技术不断促进移

栽装备向自动化、智能化方向发展。

最后,应促进多传感器信息融合,采用现代信息化技术手段对农田土壤信息与环境进行在线监测和记录,采用算法对农业大数据的价值进行深度挖掘。优化智能控制算法,开发基于信息传感与测控的精准播种体系,开展路径规划、路径追踪控制、自主避障与多机协同作业研究,探索基于全球定位导航、惯性导航、视觉导航相互结合的组合导航系统,提高播种机械的智能检测与导航控制水平,使其向智能化、无人化方向发展,从而达到提高作业质量和效率、降低劳动强度、推动玉米产业进一步发展的目的。

## 参考文献:

- [1] 齐彦栋,金诚谦,刘岗微,等.大豆玉米带状复合种植全程机械化关键技术与装备[J].中国农机化学报,2023,44(1):14-24.
- [2] SU Y, CUI T, XIA G Y, et al. Effects of different moisture content and varieties on physico-mechanical properties of maize kernel and pedicel[J]. Journal of Food Process Engineering, 2021, 44(9):e13778.
- [3] 郭海斌,张军刚,王文文,等.深松耕作对夏玉米增密增产的调控机制[J].江苏农业科学,2023,51(9):88-96.
- [4] 傅鹏霄,王珏,李广浩,等.不同栽培模式对江苏省夏玉米产量和氮素利用的影响[J].江苏农业学报,2021,37(5):1151-1159.
- [5] 唐汉.波纹曲面指夹式玉米精量排种器设计及其机理研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2018.
- [6] 张昆,衣淑娟.玉米精量播种装置的研究进展[J].农机化研究,2018,40(7):257-262.
- [7] 廖庆喜,黄海东,吴福通.我国玉米精密播种机械化的现状与发展趋势[J].农业装备技术,2006,32(1):4-7.
- [8] 高振,卢彩云,李洪文,等.基于计算机视觉的种子分布信息检测关键技术研究现状与趋势[J].智能化农业装备学报(中英文),2023(3):50-60.
- [9] 和贤桃,齐浩君,张东兴,等.丘坡地水平圆盘式玉米精量排种器设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(1):151-163.
- [10] 付浩,张学军,史增录,等.抗种侧充槽盘式玉米精量排种器设计与测试[J].华中农业大学学报,2023,42(5):229-239.
- [11] 郑娟,廖宜涛,廖庆喜,等.播种机排种技术研究态势分析与趋势展望[J].农业工程学报,2022,38(24):1-13.
- [12] 仇焕广,李新海,余嘉玲.中国玉米产业:发展趋势与政策建议[J].农业经济问题,2021,42(7):4-16.
- [13] 于磊,石铁,徐涛,等.我国玉米移栽机械化技术发展现状与前景[J].农业科技与装备,2015(9):57-58.
- [14] 王亨泰,田斌,孙伟,等.玉米起垄施肥覆膜及膜际播种联合作业机的设计与试验[J].甘肃农业大学学报,2023,58(2):235-242.
- [15] 惠兆元,张提昌,赵倩倩,等.大垄双行玉米种植技术与机械化

- 收获技术配套发展思路[J]. 农业机械, 2021(9): 86-88.
- [16] 吴家安,李向军,常传义,等. 3ZFD-440 型玉米大垄双行动力中耕追肥机设计与试验[J]. 中国农机化学报,2023,44(1):69-76.
- [17] 陈征,王鑫鑫,刘宏权,等. 玉米宽窄行种植栽培技术研究进展[J]. 中南农业科技,2022,43(4):140-145.
- [18] 李茂强,杨术明,杨树川,等. 玉米起垄施肥覆膜播种一体机的设计[J]. 中国农机化学报,2017,38(10):19-23.
- [19] 何平. 浅谈我国玉米盘育苗移栽机械化技术[J]. 中国农机化,1999,20(2):37-40.
- [20] 张茫茫. 自动化玉米移栽机送苗装置的运作试验研究[J]. 农机化研究,2019,41(3):183-187.
- [21] 宋玉洁,胡军. 玉米移栽机分苗机构的结构设计与参数分析[J]. 农机化研究,2017,39(7):93-97.
- [22] 黄兴华,张旭,董欣,等. 玉米穴盘钵苗取苗栽植机构参数优化与试验[J]. 东北农业大学学报,2021,52(8):69-78.
- [23] 周福君,芦杰,杜佳兴. 玉米钵苗移栽机圆盘式栽植机构参数优化及试验[J]. 农业工程学报,2014,30(1):18-24.
- [24] 田仁广. 玉米免耕移栽机的研制与试验[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2017.
- [25] 石铁. 全自动玉米秧苗移栽机的研制与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(3):23-30.
- [26] 杨涛,张梅,李晓晓,等. 川芎苓种扦插装备关键机构运动分析与试验[J]. 中国农机化学报,2023,44(11):32-37.
- [27] 杨丽,颜丙新,张东兴,等. 玉米精密播种技术研究进展[J]. 农业机械学报,2016,47(11):38-48.
- [28] 刘艳芬,林静,李宝筏,等. 玉米播种机水平圆盘排种器型孔设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(8):37-46.
- [29] 伍皖闽,陈学庚,王士国,等. 组合型孔轮式玉米精量穴播器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(3):60-70.
- [30] 王金武,唐汉,关睿,等. 动定指勺夹持式玉米精量排种器优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(12):48-57.
- [31] 张学军,程金鹏,史增录,等. 摆动夹取式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(4):38-50.
- [32] 王金武,唐汉,王奇,等. 基于 EDEM 软件的指夹式精量排种器排种性能数值模拟与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(21):43-50.
- [33] 王金武,唐汉,王金峰,等. 指夹式玉米精量排种器导种投送运移机理分析与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(1):29-37,46.
- [34] 石林榕,孙步功,赵武云,等. 弹性气吸嘴式玉米滚轮排种器排种性能参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(10):88-95,207.
- [35] 王韦韦,宋岚洲,石文兵,等. 气吸双行错置式玉米密植精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(3):53-63.
- [36] 李玉环,杨丽,张东兴,等. 气吸式玉米精量排种器双侧清种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(7):29-39.
- [37] 李玉环,杨丽,张东兴,等. 气吸式玉米高速精量排种器直线投种过程分析与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(9):26-35.
- [38] 李玉环,杨丽,张东兴,等. 气吸式玉米高速精量排种器投种性能分析与结构优化[J]. 农业工程学报,2022,38(8):1-11.
- [39] 崔涛,韩丹丹,殷小伟,等. 内充气吹式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(1):8-16.
- [40] 赵淑红,陈君执,王加一,等. 精量播种机 V 型凹槽拨轮式导种部件设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(6):146-158.
- [41] 董建鑫,高筱钧,张仕林,等. 高速播种机玉米姿控驱动式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(11):108-119.
- [42] LIU Q W, CUI T, ZHANG D X, et al. Design and experimental study of seed precise delivery mechanism for high-speed maize planter[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(4):61-66.
- [43] 刘瑞,刘云强,刘忠军,等. 玉米高速精量播种机正压气流辅助吹送导种装置研究[J]. 农业机械学报,2023,54(7):156-166.
- [44] 王云霞,张文毅,严伟,等. 气流辅助高速投种精量播种机压种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(10):69-76.
- [45] 胡飞,郭栋,陈彩蓉,等. 复合曲柄摇杆式蔬菜膜上双行栽植装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(9):62-69.
- [46] 胡建平,潘杰,张晨迪,等. 行星轮栽植机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(11):78-86.
- [47] 李林林,邓干然,林卫国,等. 作物移栽机械栽植机构发展现状与趋势[J]. 现代农业装备,2022,43(1):2-7.
- [48] 崔志超,管春松,杨雅婷,等. 蔬菜机械化移栽技术与装备研究现状[J]. 中国农机化学报,2020,41(3):85-92.
- [49] 秦伟,于英杰,赖庆辉,等. 导苗管式三七种苗栽植机构参数优化试验[J]. 浙江农业学报,2022,34(3):614-625.
- [50] 杨启志,朱梦岚,贾翠平,等. 穴盘苗高速移栽机吊杯式栽植器膜上成穴性能仿真与试验[J]. 中国农机化学报,2022,43(7):1-7.
- [51] 刘洋,毛罕平,王涛,等. 吊杯式移栽机构中番茄穴盘苗运动分析优化与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(5):143-151.
- [52] 尹大庆,张诺一,周脉乐,等. 高速变姿态接苗鸭嘴式栽植机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(6):65-72.
- [53] 纪超,陈学庚,陈金成,等. 玉米免耕精量播种机排种质量监测系统[J]. 农业机械学报,2016,47(8):1-6.
- [54] 解春季,杨丽,张东兴,等. 基于激光传感器的播种参数监测方法[J]. 农业工程学报,2021,37(3):140-146.
- [55] XIE C J, ZHANG D X, YANG L, et al. Precision seeding parameter monitoring system based on laser sensor and wireless serial port communication[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 190:106429.
- [56] 贾洪雷,路云,齐江涛,等. 光电传感器结合旋转编码器检测气吸式排种器吸种性能[J]. 农业工程学报,2018,34(19):28-39.
- [57] 徐洛川,胡斌,罗昕,等. 叉指电容式棉花穴播取种状态监测系统研制[J]. 农业工程学报,2022,38(23):50-60.
- [58] 赵博,樊学谦,周利明,等. 气流输送播种机压电式流量传感器设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(8):55-61.
- [59] BAI J Q, HAO F Q, CHENG G H, et al. Machine vision-based supplemental seeding device for plug seedling of sweet corn[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 188:106345.
- [60] 曹慧英,史建国,朱昆仑,等. 播种深度对夏玉米冠层结构及光合特性的影响[J]. 玉米科学,2016,24(1):102-109.

- [61] 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.
- [62] 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.
- [63] 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.
- [64] 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.
- [65] DU Z H, YANG L, ZHANG D X, et al. Corn variable-rate seeding decision based on gradient boosting decision tree model[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2022,198:107025.
- [66] HE X T, DING Y Q, ZHANG D X, et al. Development of a variable-rate seeding control system for corn planters Part I: design and laboratory experiment[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2019,162:318-327.
- [67] HE X T, DING Y Q, ZHANG D X, et al. Development of a variable-rate seeding control system for corn planters Part II: field performance[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2019,162:309-317.
- [68] MUNNAF M A, MOUAZEN A M. An automated system of soil sensor-based site-specific seeding for silage maize:a proof of concept[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2023,209:107872.
- [69] 赵岩,陈学庚,温浩军. 新疆兵团精准农业发展与北斗卫星导航技术的应用[J]. 石河子大学学报(自然科学版),2018,36(4):397-404.
- [70] 程卫东,张国海,阮培英,等. 国内玉米(大豆)精密播种机排种器电驱应用分析[J]. 中国农机化学报,2017,38(8):13-16.
- [71] 张振国,郭全峰,蒋贵菊,等. 玉米免耕播种自动调偏系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(3):40-52.
- [72] SUN J Z, ZHANG Y, ZHANG Y T, et al. Precision seeding compensation and positioning based on multisensors[J]. Sensors, 2022,22(19):7228.
- [73] WANG W W, WU K P, ZHANG Y, et al. The development of an electric-driven control system for a high-speed precision planter based on the double closed-loop fuzzy PID algorithm[J]. Agronomy,2022,12(4):945.
- [74] 丁友强,刘彦伟,杨丽,等. 基于 Android 和 CAN 总线的玉米播种机监控系统研究[J]. 农业机械学报,2019,50(12):33-41,62.
- [75] 颜丙新,付卫强,武广伟,等. 基于卫星定位的玉米高位精播种子着床位置预测方法[J]. 农业机械学报,2021,52(2):44-54.
- [76] 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.

(责任编辑:徐艳)