doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.004

基于实时肥量获取的玉米播种机施肥可视化系统设计与试验

和贤桃[1,2]　王鑫鹏[1]　文策昂[1]　杨　丽[1,2]　米国华[3]　张东兴[1,2]　崔　涛[1,2]

(1.中国农业大学工学院,北京 100083;2.农业农村部土壤-机器-植物系统技术重点实验室,北京 100083;
3.中国农业大学资源与环境学院,北京 100083)

摘要:为满足玉米精量播种过程中对肥量实时监测与可视化的迫切需求,设计了基于实时肥量获取的施肥可视化系统。该系统利用薄面激光式肥量传感器实时获取施肥量,通过截断平均算法对肥量信号进行滤波和降噪处理,结合构建的施肥单体定位模型与滞后补偿算法,确定各行准确的施肥位置。基于 ArcGIS 平台实现了施肥位置与肥量的空间匹配、施肥图层的实时绘制与可视化显示,以及施肥数据的高效存储和追溯。试验结果表明:该系统能够实时、准确地可视化施肥量及其与目标肥量的偏差情况。在不同施肥量(75 ~ 300 kg/hm^2)条件下,系统的平均肥量检测精度范围为 93.46% ~ 95.91%,平均施肥准确率偏差范围为 3.60% ~ 5.64%;在不同前进速度(6 ~ 15 km/h)条件下,系统的平均肥量检测精度范围为 87.53% ~ 93.77%,平均施肥准确率偏差范围为 5.29% ~ 10.90%。随着施肥量和前进速度的增加,肥量检测精度提高,施肥准确率偏差降低,表明系统在玉米高密度种植和高速作业条件下仍能保持稳定性能。田间试验结果表明,系统生成的肥量分布图与各试验区域的目标施肥量吻合度高,能够准确反映实际施肥情况,并实现历史数据的有效追溯。本研究为玉米播种过程施肥的实时监控与精准管理提供了可行的技术方案。

关键词:精准农业;玉米播种机;施肥监测;肥量可视化;施肥数据管理

中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)09-0052-10　　**OSID**:

Design and Testing of Visualization System for Fertilizer Application in Corn Seeders Based on Real-time Fertilizer Quantity Acquisition

HE Xiantao[1,2]　WANG Xinpeng[1]　WEN Ceang[1]　YANG Li[1,2]　MI Guohua[3]　ZHANG Dongxing[1,2]　CUI Tao[1,2]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Key Laboratory of Soil-Machine-Plant System Technology*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Beijing* 100083, *China*
3. *College of Resources and Environmental Sciences*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Aiming to address the urgent need for real-time monitoring and visualization of fertilizer application rates during corn precision seeding, a fertilizer visualization system based on real-time fertilizer application rate acquisition was designed. The system utilized thin-film laser-based fertilizer sensors to continuously monitor fertilizer application rates in real time. The fertilizer application rate signals were filtered and denoised by using a truncation averaging algorithm. Combined with a fertilizer application unit localization model and a lag compensation algorithm, the system determined the precise fertilizer application positions for each row. Based on the ArcGIS platform, the system achieved spatial matching of fertilizer application positions and fertilizer quantities, real-time drawing and visualization of fertilizer application layers, as well as efficient storage and traceability of fertilizer application data. Experimental results showed that the system can real-time and accurately visualize fertilizer application rates and their deviations from target rates. Under different fertilizer application rates (75 ~ 300 kg/hm^2), the

收稿日期:2025-07-01　修回日期:2025-07-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD2000402、2021YFD2000404)、国家农业科技项目-农业智慧施肥项目(20221805)和财政部和农业农村部:国家玉米产业技术体系项目(CARS-02)

作者简介:和贤桃(1990—),男,副教授,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail:hxt@cau.edu.cn

通信作者:杨丽(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事农业机械装备及其智能化研究,E-mail:yangli@cau.edu.cn

system's average fertilizer application rate detection accuracy ranged from 93.46% to 95.91%, with an average fertilizer application accuracy deviation range of 3.60% to 5.64%. Under different forward speeds (6 ~ 15 km/h), the system's average fertilizer application accuracy ranged from 87.53% to 93.77%, with an average deviation in fertilizer application accuracy ranged from 5.29% to 10.90%. As fertilizer application rates and forward speeds were increased, the fertilizer application accuracy was improved, and deviations in fertilizer application accuracy were decreased, indicating that the system maintained stable performance under high-density planting and high-speed corn cultivation conditions. Field trial results showed that the fertilizer distribution maps generated by the system closely matched the target fertilizer application rates in each experimental area, accurately reflecting actual fertilizer application conditions and enabling effective traceability of historical data. The research result can provide a feasible technical solution for real-time monitoring and precise management of fertilizer application during corn sowing.

Key words: precision agriculture; corn seeders; fertilizer application monitoring; fertilization visualization; fertilizer data management

0　引言

玉米是我国主要粮食作物之一,其高产稳产对保障国家粮食安全具有重要意义[1-2]。施肥作为玉米种植的关键环节,对玉米产量以及土壤的可持续利用具有显著影响[3-5]。在播种过程中,实现施肥信息的实时监测与可视化,能够有效监控施肥装置的作业状态,及时发现并处理施肥过程中的异常情况,从而避免局部区域施肥过量或不足的问题[6-7]。同时,监测的肥量数据可帮助优化施肥策略,降低化肥资源投入,并保障玉米产量[8]。

目前,国内外学者在施肥量监测与可视化技术领域开展了广泛的研究,并取得了诸多进展。在颗粒肥流量检测方面,国内外学者提出了光电检测法[9-10]、电容法[11]、图像法[12]等多种肥量检测手段[13-14]。在施肥量可视化技术方面,孟志军等[15-16]通过机载 GIS 组件实现施肥处方图的可视化呈现与实时定位匹配,处方图平均识别时间小于 100 ms;杨程等[17-18]设计的上位机基于 Android 平台开发,实现施肥作业参数设定与系统状态监测;张季琴等[19]构建了基于 Visual Studio 平台的 C#上位机控制系统,实现施肥数据存储与控制指令下发等功能;ZHANG 等[20]设计的上位机平台实现了施肥数据的采集、显示、存储、决策和预警显示等功能。目前已出现商用系统,如 AGCO 公司的变量技术系统[21-22]和 Precision Planting 公司的 20|20 系统[23],能实现将实时调控的施肥量和施肥位置结果显示在主控终端中,并提供包含施肥在内的作业过程即时反馈。由此可知,国外在施肥可视化方面的研究起步较早,部分成果已形成产品并投入市场,但主要应用于液态肥,并对中国技术封锁,限制了其在国内的广泛应用。国内现有研究多集中在肥量传感器及作业过程中缺肥报警的研究,在肥量信息的实时动态可视化以及历史数据追溯方面,相关研究较少。这导致难以获取各个地块位置的详细施肥情况,无法全面评估施肥故障并及时预警,也无法系统统计施肥数据以支持精准生产决策。这些问题严重制约了肥料利用率和玉米产量的进一步提升。

针对上述问题,本文提出一种适用于玉米播种机的肥量可视化系统。将肥量信号处理、施肥单体定位模型与滞后补偿方法等融合,基于 Android 平台和 Jetpack Compose 框架开发显控终端 APP,实现施肥作业过程中肥量的实时动态监测与可视化,将空间化作业数据以标准化格式进行追溯存储,并开展不同施肥量、不同前进速度以及实际田间施肥环境下的性能试验,为玉米播种过程施肥的实时监控与精准管理提供一套创新性的技术方案。

1　总体结构与工作原理

智能肥量可视化系统总体结构如图 1 所示,主要由肥量传感器、单体控制器、主控器及 GNSS 定位装置组成。其中,肥量传感器采用中国农业大学玉米豆类机械化团队研发的薄面激光式肥量传感器[24],其在肥料通道中形成薄面感知区,肥料通过时因遮挡激光产生不同电压信号,从而实现肥量的精确检测。肥量传感器安装于电驱式排肥器的下部,可实时检测从排肥器中下落的肥料。信号处理器接收肥量传感器的信号,处理后得到肥量值,随后通过 CAN 总线传输至主控制器。主控制器结合 GNSS 定位装置发送的位置和航向等信息,对各行的肥量信息进行可视化处理,通过不同颜色预警当前施肥质量,并实时生成肥量分布图。GNSS 定位装置采用差分定位方式,能够为系统提供精确的位置、航向和前进速度信息[25-26]。主控制器基于 Android 操作系统并根据可视化系统的应用场景需求,配备定制的 CAN 通讯和 RS232 通讯功能。系统

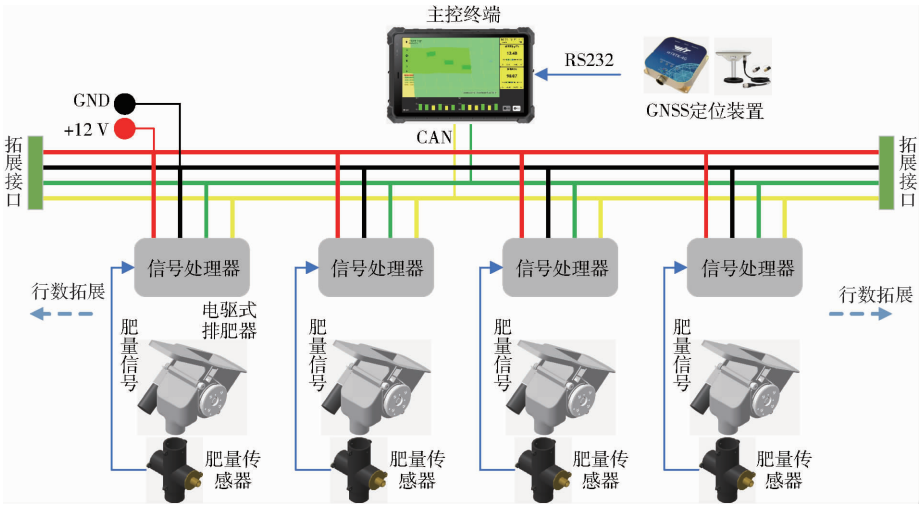


图 1 肥量可视化系统总体结构图

Fig. 1 Overall structure diagram of fertilizer visualization system

由拖拉机车载 12 V 电源供电,采用 CAN 总线通讯方式,能够灵活拓展肥量监测单元的行数,以适配不同数量施肥单体的玉米播种机,满足多样化的作业需求。

2 肥量可视化系统程序流程

系统的程序流程如图 2 所示。信号处理器通过模数转换(ADC)模块采集肥量传感器信号,经滤波算法降噪处理后,将信号封装成标准化 CAN 协议数据帧,通过 CAN 总线传输至主控制器。主控制器通过 RS232 通讯以频率 5 Hz 接收 GNSS 定位装置发送的 NEMA-0183 格式数据流,解析 GPRMC 语句并利用校验和验证机制确保数据完整性,提取关键导航参数:经纬度、航向角和前进速度。基于 GNSS 定位装置提供的经纬度和航向角,结合各施肥单体与主天线的几何位置关系,计算得到每个施肥单体在大地坐标系中的位置坐标。系统引入动态滞后补偿算法,根据实时前进速度和标定的系统响应延迟计算位置补偿量,得到所有单体实际施肥位置。主控制器将肥量数据与施肥位置信息进行空间匹配,绘制施肥量图层,并以地理数据库格式(.gdb)存储肥量信息,完成肥量可视化流程。

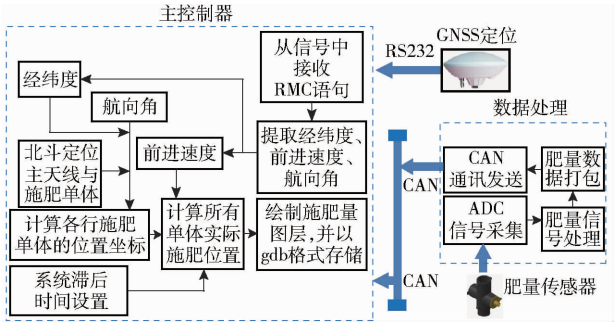


图 2 肥量可视化系统控制流程图

Fig. 2 Control flowchart of fertilizer visualization system

3 肥量可视化方法

3.1 肥量信号处理

为提高施肥信号的稳定性和准确性,对肥量信号进行滤波和降噪处理。采用 STM32F103C8T6 作为核心处理器,基于内置 12 位 ADC 模块实现对传感器电压信号的准确采集。ADC 配置为 DMA 连续转换模式,采样时间为 239.5 个时钟周期,采样频率达 47 kHz,确保信号采集的实时性。定义长度为 100 的 16 位数组作为数据缓冲区,利用 DMA 传输完成中断触发数据处理,因为排序数量不大,故采用计算复杂度低的冒泡排序算法对采样值进行升序排列。

为降低噪声与异常值的影响,采用截断平均算法对排序后的数据进行处理[27]。具体方法为去除首尾各 10% 的极值(即保留中间 80 个数据点),并计算其算术平均值

$$T=\frac{1}{n-2k}\sum_{i=k+1}^{n-k}x(q) \tag{1}$$

式中 n——原始数据集的样本数

k——去除的每一端数据的数量

$x(q)$——排序后的数据集中的第 q 个数据

该算法使数据更新频率稳定在 470 Hz,有效抑制了脉冲干扰的影响。为进一步提高数据稳定性,采用滑动窗口法对截断平均结果进行平滑处理,窗口宽度设为 80 个数据点,计算移动平均值

$$S(t)=\frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1}x(t-q) \tag{2}$$

式中 $S(t)$——时刻 t 的移动平均值

N——计算平均值的数据点数量

$x(t-q)$——时刻 $t-q$ 的原始数据样本

将处理结果存储至环形缓冲队列,信号处理完

毕后，通过预先标定的电压-流量拟合模型得到实际肥量值，从而完成肥量的实时获取。

3.2　施肥单体位置定位

为实现各行单体施肥作业的可视化，基于 HE 等[28-29]建立的播种单体定位模型和 GNSS 定位主天线位置，改进并建立施肥单体定位模型，由此得到作业时每个施肥单体的实时位置。该方法采用 NMEA-0183 协议中的 RMC 语句作为数据源，通过 RS232 串口接收 GNSS 数据后，首先筛选以“$GPRMC”开头的有效语句，经逗号分隔处理后提取经纬度、速度及航向角等关键参数并存储至结构化数据类。为简化计算并防止位置数据换算过程中的精度损失，采用基于西安 80 的高斯-克吕格投影坐标系（EPSG:2363）进行空间运算，利用 ArcGIS Runtime SDK for Android 实现从 WGS84 地理坐标系（EPSG:4326）到投影坐标系的实时转换。

基于投影坐标系建立了施肥单体定位模型，如图 3 所示。该模型以拖拉机机头上方安装的 GNSS 主天线为基准，将各施肥单体的施肥口位置作为参考点。通过测量行距 R_S（m）、主天线与单体的垂直距离 L_1（m）、主天线与施肥机中轴线的垂直距离 L_2（m）、航向角 θ（°）和行数 R_N 等参数，结合实时获取的主天线所在的位置（x，y），计算得到各施肥单体位置（x_i，y_i）

$$\begin{cases} x_i = x - L_2\cos\theta - L_1\sin\theta - \dfrac{R_N - 2i + 1}{2}R_S\cos\theta \\ y_i = y - L_2\sin\theta - L_1\cos\theta - \dfrac{R_N - 2i + 1}{2}R_S\sin\theta \end{cases} \tag{3}$$

式中　i——施肥单体序号

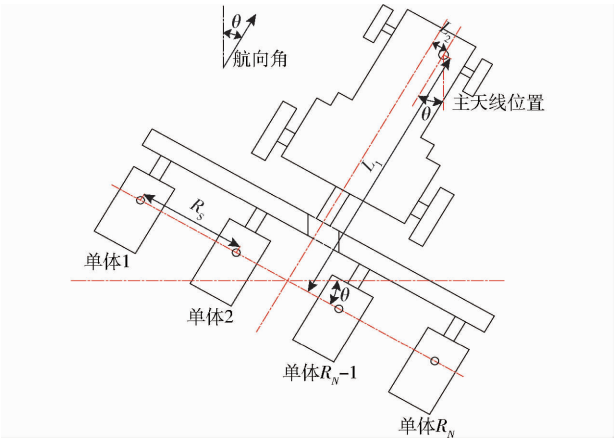


图 3　施肥单体定位模型

Fig. 3　Fertilization unit positioning model

航向角 θ 通过实时解析北斗数据动态获取，其他几何参数可通过可视化界面配置并持久化存储。该模型适应任意 GNSS 天线安装位置，且不受施肥单体数量奇偶性的限制，具有较好的通用性和实用性。

3.3　实际施肥位置计算

由于可视化系统从获取施肥量到肥料实际施用于田间存在一定的时间滞后，若直接将施肥单体的定位坐标与检测的肥量关联，会导致可视化系统显示的施肥位置与实际落肥位置存在偏差[30]。为提高施肥位置的可视化精度，需基于各施肥单体的实时定位坐标，对实际施肥位置进行补偿计算。试验使用的肥料为颗粒氮肥，粒度 0.85 ~ 2.80 mm，含水率小于等于 0.5%。具体方法是：将当前施肥单体的位置沿作业方向平移一段补偿距离，以此作为实际的施肥位置。该补偿距离由以下两个关键参数决定：系统滞后时间和播种机前进速度。补偿距离通过将这两个参数相乘得到。其中，前进速度通过 GNSS 定位装置实时检测，而滞后时间由 3 部分组成：①GNSS 定位频率产生的滞后时间，计算公式为 $1/(2f)$，其中 f 为 GNSS 定位频率（Hz）。以 5 Hz 计算，得到该时间为 0.1 s。②控制系统程序执行产生的滞后时间，使用 measureTimeMillis( ) 函数对该时间进行测量，该函数能够提供毫秒级的时间精度。通过 30 次实际测量，得到本程序的平均执行时间为 0.035 8 s。③肥料被检测到至下落到地面所产生的滞后时间，通过 240 帧高速摄像机对落肥过程的拍摄，通过测量排肥轮转速 10 ~ 50 r/min 的下落时间，得出肥料下落时间与排肥量并无明显关系，其各转速下测得的下落时间偏差不超过 10%，故取平均值计算得该时间为 0.964 s。

将以上 3 部分时间相加得到系统总滞后时间。结合播种机前进速度，计算得到各行实际的施肥位置（x_i'，y_i'）为

$$\begin{cases} x_i' = x_i + \dfrac{vT_{\text{lag}}\sin\theta}{3.6} \\ y_i' = y_i + \dfrac{vT_{\text{lag}}\cos\theta}{3.6} \end{cases} \tag{4}$$

式中　v——播种机前进速度，km/h

T_{lag}——控制系统滞后时间，s

3.4　肥量图层绘制与存储

为实现施肥作业过程的肥量可视化，基于 ArcGIS Runtime SDK for Android 进行已施肥区域的肥量图层绘制与存储。采用 GraphicsOverlay 图层容器动态渲染图形元素，通过创建 Point 对象和异步加载标记图像生成 PictureMarkerSymbol 符号，并基于航向角与视图旋转值之差计算标记旋转角度，实现施肥单体位置的实时动态标记。每次更新前自动清除旧标记，确保显示内容的时效性。

在施肥区域绘制方面，根据相邻 3 次定位数据计算各单体施肥范围的 4 个角点

$$\begin{cases} x_j' = x + \dfrac{vT_{\text{lag}}\sin\theta}{3.6} - L_2\cos\theta - L_1\sin\theta - \dfrac{N-2j}{2}R_S\cos\theta \\ y_j' = y + \dfrac{vT_{\text{lag}}\cos\theta}{3.6} - L_2\sin\theta - L_1\cos\theta - \dfrac{N-2j}{2}R_S\sin\theta \end{cases} \tag{5}$$

式中 j——绘制点的序号,取 0,1,2,…

使用 PolygonBuilder 构建多边形几何体并添加 SimpleFillSymbol 渲染样式生成 Graphic 对象。每个图形对象均附带完整的属性数据,包括前进速度、应施肥量、检测肥量以及地理位置信息等。采用数组存储各单体施肥范围的 4 个角点数据,通过末端两点回传机制确保图形绘制的连续性。

将相邻 3 次获得的绘制点称为 PrePoint、LastPoint 与 Point,其图层绘制流程如图 4 所示。

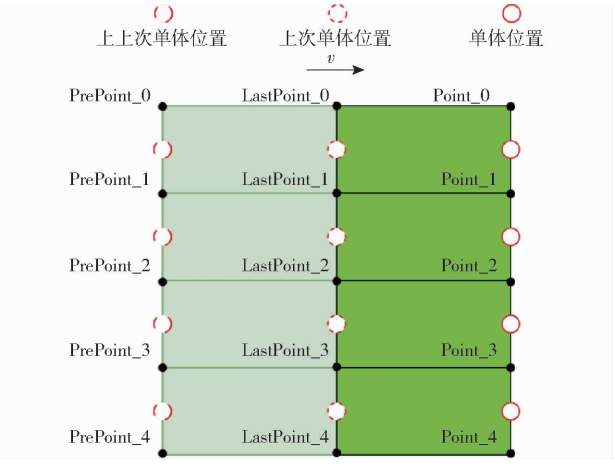


图 4 肥量图层绘制示意图

Fig. 4 Fertilization layer drawing process

在肥量图层绘制的同时,采用 geodatabase 标准化格式存储作业数据。该格式基于关系数据库技术,将绘制图层的空间地理信息(点、线、面要素)与属性数据存储在表结构中,可通过数据库浏览器直接查看文本数据,也可转换为 gdb 格式供专业 GIS 软件进行空间分析[31]。其打开后的文本数据界面如图 5 所示,实现了历史作业数据的完整保存,确保了数据的可移植性和可分析性,为精准农业管理提供数据基础。

3.5 可视化界面设计

基于 Android Studio 平台,采用 Kotlin 语言结合 Jetpack Compose 框架开发了可视化界面,其扁平化架构避免了复杂界面嵌套导致的性能损耗,降低运行硬件成本[32]。数据层使用 LiveData 封装各行的前进速度、检测肥量、位置数据等动态信息,UI 层通过 observeAsState( ) 函数实现数据订阅,当底层数据变化时,Compose 自动触发界面重组,实现 UI 数据的实时更新。设计的主界面如图 6 所示,集成了三大核心功能模块:空间信息区实时展示 GNSS 定位

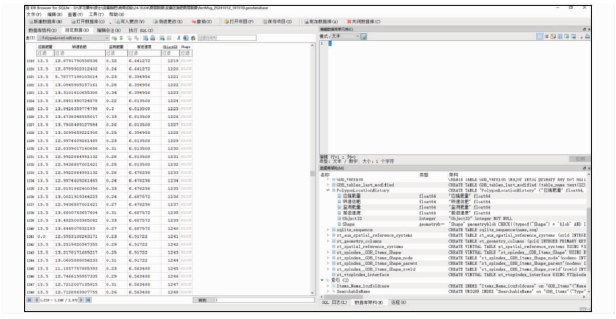


图 5 基于 geodatabase 的肥量信息存储查看界面

Fig. 5 Fertilizer information storage and viewing interface based on geodatabase

信息,通过右上角基站图标动态指示 GNSS 的工作状态(卫星信号不稳定时图标闪烁,稳定后一直显示),并实时更新机具的经纬度位置、航向角及前进速度值;施肥监控区采用颜色编码呈现已作业区域的平均施肥量(深绿色表示不足,绿色表示正常,黄色表示过量),通过渐变条可视化各单体施肥量(黑点表示当前值,蓝点表示均值),采用柱状图详细显示施肥量和施肥准确率情况(检测值与目标值偏差 10% 以内显示为绿色,否则为黄色),并动态标注准确率的极值;图层绘制区使用蓝色光标标记当前机具作业位置,并实时绘制已施肥区域的肥量图层。这种多层次的可视化设计,有效辅助操作人员掌握作业状态并做出及时调整。

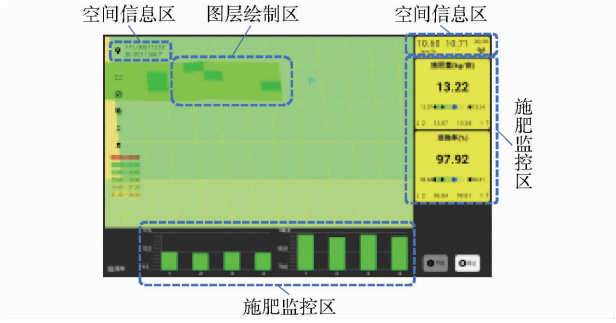


图 6 肥量可视化主界面

Fig. 6 Fertilizer quantity visualization main interface

显控终端根据流量传感器数据和前进速度计算得出的施肥准确率为

$$P_c = \left(1 - \frac{|M_1 - M_2|}{M_2}\right) \times 100\% \tag{6}$$

式中 P_c——施肥准确率,%

M_1——检测施肥量,kg/hm^2

M_2——理论施肥量,kg/hm^2

为衡量可视化界面显示准确率对实际准确率的预测程度,引入检测精度和实际施肥准确率等评价指标

$$P_t = \left(1 - \frac{|M_1 - M_3|}{M_1}\right) \times 100\% \tag{7}$$

式中　P_t——检测精度，%

M_3——实际施肥量，kg/hm^2

$$P_f = \left(1 - \frac{|M_3 - M_2|}{M_2}\right) \times 100\% \tag{8}$$

式中　P_f——实际施肥准确率，%

将施肥准确率与实际施肥准确率相减取绝对值即得出可视化界面的准确率偏差。

4　试验与结果分析

4.1　不同施肥量可视化试验

将可视化系统搭载到河北农哈哈机械集团有限公司生产的 2BYF－4 型四行玉米施肥播种机上进行试验，如图 7 所示。试验使用的肥料是颗粒氮肥。试验前对肥量传感器进行了标定，其拟合系数达 0.99。试验时通过调节排肥单体的电机转速来控制施肥量，每个施肥量下试验时长 60 s，重复 3 次，并对每个肥量下的实际施肥量进行收集并称量（称量精度为 0.002 kg）。试验的前进速度为 6 km/h，施肥量范围为 75 ~ 300 kg/hm^2。试验完成后，将可视化系统统计的施肥量和施肥准确率界面进行保存，同时导出系统记录的详细施肥量数据，以便进一步分析。

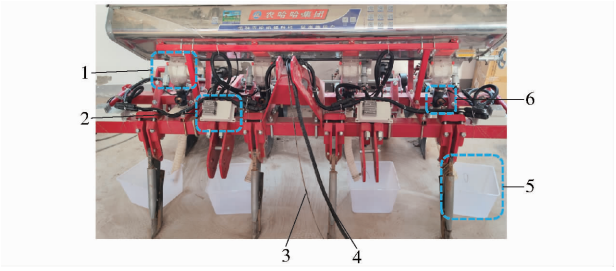


图 7　不同施肥量的可视化试验场景

Fig. 7　Visualization of experimental scenarios with different fertilizer application rates

1. 排肥单体　2. 信号处理器　3. CAN 总线　4. 电源线　5. 肥料盒　6. 肥量检测装置

不同施肥量下可视化系统统计的平均施肥量及施肥准确率界面如图 8 所示，程序设计中，以“亩”为单位，其显示在主界面的右侧，涵盖了各试验水平的平均施肥量和准确率。通过该可视化功能，可以直观了解各区域的施肥量数据，并结合准确率指标评估该施肥数据的可信度。而各行具体的施肥量和准确率数据，可以通过平均施肥量和准确率值下方的渐变条来观察。其中，蓝点表示平均值，黑点表示各行数值的分布，同时在渐变条下方标示出最低值和最高值及其所对应的施肥单体序号。例如，在施肥量 150 kg/hm^{2}的作业条件下，平均施肥量和施肥准确率分别为 141.90 kg/hm^{2}和 93.25%。通过观察渐变条，发现各行的施肥量集中分布在平均施肥量的两侧，施肥量范围为 133.65 ~ 154.05 kg/hm^2，最小施肥量和最大施肥量所在的行分别是第 4 行和第 1 行；施肥准确率范围为 89.14% ~ 97.26%，最小和最大施肥准确率所在的行分别也是第 4 行和第 1 行。此外，还可以通过主界面下方的条形图来查看各行详细的施肥量和准确率数据，如图 9 所示。条形图清晰展示了各行的施肥量和准确率的具体数值及其变化趋势，为进一步了解和分析施肥量情况提供了详实的数据支持。

将图 9 中各行施肥量和准确率的数据导出进行分析，其导出后的具体数值分别为表 1 和表 2 的第 1 行数据。将其与实际的施肥量数据（表中第 1 行之后的数据）进行对比分析可知：在各个施肥量下，检测的施肥量与实际的施肥量差异不大，最大在 300 kg/hm^{2}时相差 16.20 kg/hm^2，最小在 75 kg/hm^{2}时相差 1.95 kg/hm^2，检测的最小精度为 88.26%，最大为 98.44%。总体来看，施肥量越大，实际准确率和可视化系统显示的施肥准确率越高，在 300 kg/hm^{2}的条件下，各行准确率 90% 以上，平均准确率为 95.66%。分析其原因是，试验所用的肥料是氮肥，其亩施肥量较小，对传感器信号的敏感度要

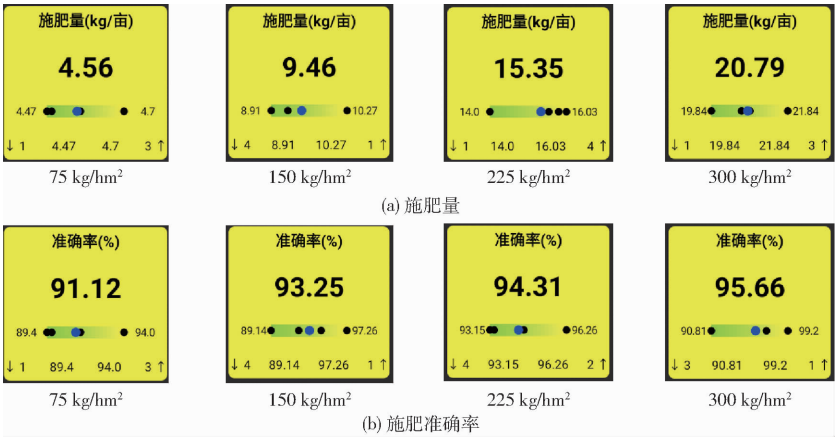


图 8　不同施肥量下平均施肥量及准确率可视化结果

Fig. 8　Visualization of average fertilizer application rate and application accuracy under different application rates

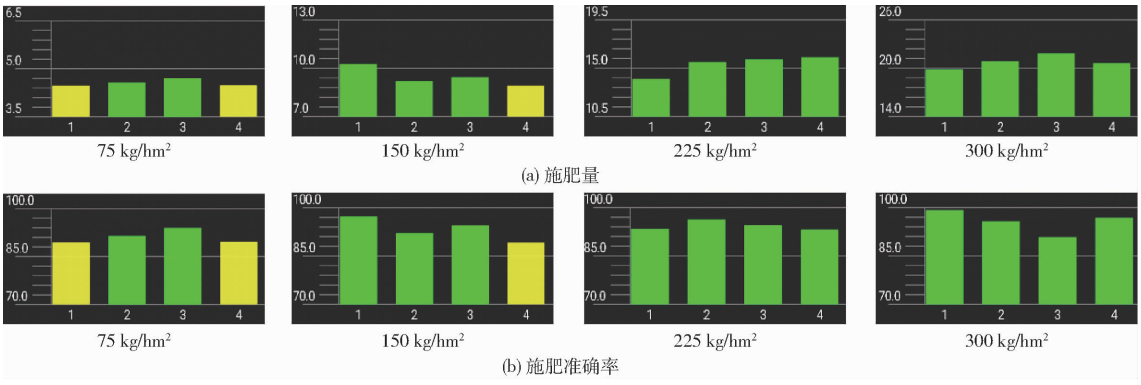


图 9 不同施肥量下各行施肥量及准确率可视化结果

Fig. 9 Visualization of fertilizer application rates and accuracy in each row under different fertilizer application rates

表 1 不同施肥量下可视化系统肥量检测精度结果

Tab. 1 Fertilizer application accuracy results of visualization system under different fertilizer application rates

施肥量/(kg·hm⁻²)	行序号	检测施肥量/(kg·hm⁻²)	实际施肥量/(kg·hm⁻²)	检测精度/%	平均精度/%
75	1	67.05	71.85	93.30	93.46
	2	68.55	72.15	94.92	
	3	70.50	72.45	97.36	
	4	67.20	76.20	88.26	
150	1	154.05	147.60	95.57	94.20
	2	138.15	151.35	91.22	
	3	141.75	144.75	97.92	
	4	133.65	145.20	92.09	
225	1	210.00	222.45	94.39	95.84
	2	233.40	237.15	98.44	
	3	237.30	229.20	96.49	
	4	240.45	226.95	94.04	
300	1	297.60	281.40	94.23	95.91
	2	312.75	297.30	94.83	
	3	327.60	316.35	96.47	
	4	309.45	303.75	98.11	

表 2 不同施肥量下可视化系统施肥准确率结果

Tab. 2 Fertilization accuracy results of visualization system under different fertilization rates

施肥量/(kg·hm⁻²)	行序号	施肥准确率/%	实际施肥量/(kg·hm⁻²)	实际施肥准确率/%	准确率偏差/%	平均准确率偏差/%
75	1	89.40	71.85	95.82	6.42	5.64
	2	91.38	72.15	96.27	4.89	
	3	94.07	72.45	96.62	2.56	
	4	89.69	76.20	98.38	8.69	
150	1	97.26	147.60	98.39	1.13	4.45
	2	92.07	151.35	99.07	7.00	
	3	94.49	144.75	96.50	2.01	
	4	89.14	145.20	96.80	7.66	
225	1	93.32	222.45	98.87	5.55	4.20
	2	96.26	237.15	94.61	1.64	
	3	94.53	229.20	98.10	3.58	
	4	93.15	226.95	99.16	6.01	
300	1	99.21	281.40	93.79	5.41	3.60
	2	95.76	297.30	99.12	3.37	
	3	90.81	316.35	94.53	3.72	
	4	96.86	303.75	98.77	1.91	

求相比大施肥量的肥料更高。尤其是在最小施肥量 75 kg/hm² 的条件下,轻微的下肥量变化会对检测精度的计算产生明显影响,但该条件下的平均检测精度仍达到 93.46%。由此可见,可视化系统的肥量检测精度能够准确反映施肥的情况。

可视化系统的施肥准确率结果如表 2 所示。由此可知,在各个施肥量水平下,系统显示的施肥准确率与实际施肥准确率的偏差不大,各施肥量下的平均准确率偏差范围为 3.60% ~ 5.64%,平均为 4.47%。总体而言,随着施肥量的增加,实际施肥准确率越高,准确率偏差越小。这主要是因为在大施肥量下,肥料排放更为稳定,使得实际施肥量与目标施肥量更加接近。而可视化系统通过显示的施肥准确率指标,准确地反映了这一情况,达到了试验的预期效果。

4.2 不同前进速度可视化试验

不同前进速度的可视化试验场景如图 10 所示。试验在一条长 90 m、宽 2.4 m 的水泥路上进行,其中前后各 20 m 为拖拉机加速和减速的缓冲区,中间 50 m 为试验区。试验区目标排肥量为 150 kg/hm²,试验速度分别为 6、9、12、15 km/h。试验时,在排肥口下方悬挂塑料盒收集排出的颗粒肥,试验完成后对每个盒子称量并去皮,得到实际排肥量。



图 10 不同前进速度的可视化试验场景

Fig. 10 Visualization of test scenarios at different forward speeds

显控终端显示的平均施肥量和施肥准确率如图 11 所示(以“亩”为面积单位)，而各单体的施肥量和施肥准确率如图 12 所示。从结果可以看出，在不同前进速度下，检测到的施肥量均低于目标施肥量，且随着前进速度的提高，施肥量逐渐接近目标值。各速度水平下平均施肥准确率为 86.4% ~94.65%，且在高速下施肥准确率更高。分析原因，高速条件下排肥过程更连续、更稳定，从而提高了施肥准确率。

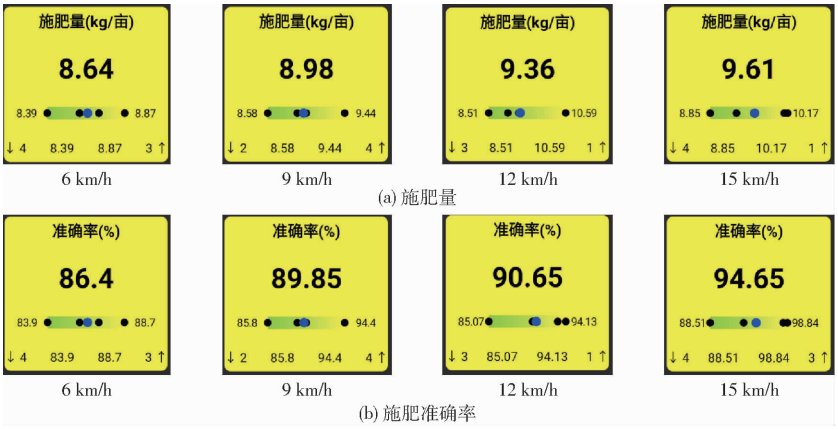


图 11　不同前进速度下平均施肥量及施肥准确率可视化结果

Fig. 11　Visualization of average fertilizer application rate and accuracy at different forward speeds

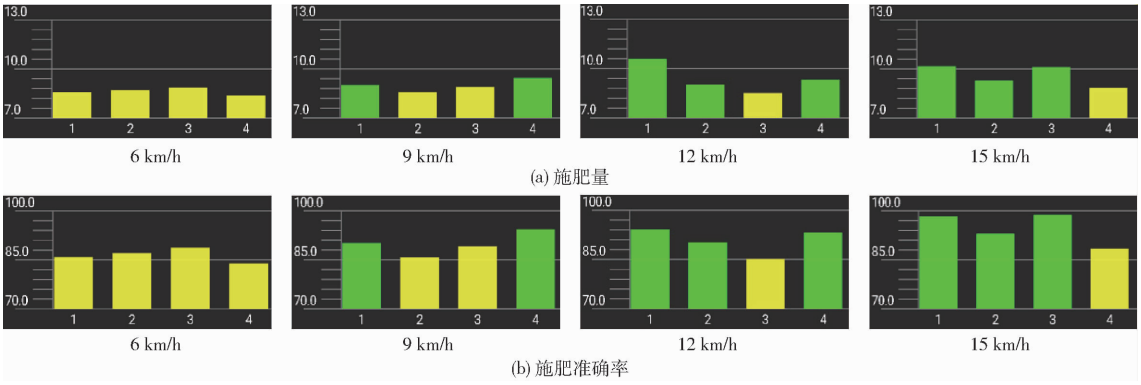


图 12　不同前进速度下各行施肥量及施肥准确率可视化结果

Fig. 12　Visualization of fertilizer application rates and accuracy at different forward speeds

详细的肥量检测精度和施肥准确率结果分别如表 3 和表 4 所示。分析可知，相比不同肥量水平下的试验结果，不同前进速度下的肥量检测精度和施肥准确率总体偏低。原因主要有：尿素肥在低速、小施肥量下对信号的敏感度较高；强太阳光对传感器输出的电信号产生干扰。尽管施肥传感器壳体已做避光处理，但试验中使用的排肥器壳体为透明塑料，太阳光会从透明壳体折射进入传感器壳体，干扰传感器输出的电压值，且在排肥管中颗粒肥数量越少时，这种干扰越明显。该问题后续可以通过选用非透光的排肥器来解决。总体来看，在低速 6 km/h 下，可视化系统的平均肥量检测精度最低，平均施肥准确率偏差最大，分别为 87.53% 和 10.90%。在 9 ~15 km/h 前进速度下，平均肥量检测精度达到 90% 以上，平均施肥准确率偏差低于 10%。这表明，可视化系统在不同作业速度下能够较好地预测和可视化实际的施肥情况。

表 3　不同前进速度下可视化系统的肥量检测精度结果

Tab. 3　Accuracy of fertilizer detection results in visualization system at different forward speeds

前进速度/(km·h^{-1})	行序号	检测施肥量/(kg·hm^{-2})	实际施肥量/(kg·hm^{-2})	检测精度/%	平均精度/%
6	1	128.85	154.35	83.48	87.53
	2	130.65	145.05	90.09	
	3	133.05	147.90	89.89	
	4	125.85	145.20	86.66	
9	1	135.30	152.40	88.74	91.99
	2	128.70	141.30	90.99	
	3	133.65	143.55	93.08	
	4	141.60	148.95	95.14	
12	1	158.85	153.45	96.55	92.96
	2	135.30	148.80	90.91	
	3	127.65	146.40	87.20	
	4	139.80	143.85	97.17	
15	1	152.55	153.75	99.22	93.77
	2	139.50	150.90	92.44	
	3	151.80	143.25	94.11	
	4	132.75	148.65	89.28	

表 4 不同前进速度下可视化系统的施肥准确率结果

Tab. 4 Fertilization accuracy results of visualization system at different forward speeds

前进速度/(km·h⁻¹)	行序号	施肥准确率/%	实际施肥量/(kg·hm⁻²)	实际施肥准确率/%	准确率偏差/%	平均准确率偏差/%
6	1	85.93	154.35	97.07	11.13	10.90
	2	87.11	145.05	96.69	9.58	
	3	88.67	147.90	98.64	9.98	
	4	83.87	145.20	96.78	12.91	
9	1	90.16	152.40	98.40	8.24	7.04
	2	85.76	141.30	94.24	8.49	
	3	89.09	143.55	95.71	6.62	
	4	94.44	148.95	99.27	4.82	
12	1	94.13	153.45	97.67	3.53	6.94
	2	90.22	148.80	99.24	9.02	
	3	85.07	146.40	97.56	12.49	
	4	93.18	143.85	95.89	2.71	
15	1	98.27	153.75	97.47	0.80	5.29
	2	92.98	150.90	99.42	6.44	
	3	98.84	143.25	95.53	3.31	
	4	88.51	148.65	99.13	10.62	

4.3 田间试验

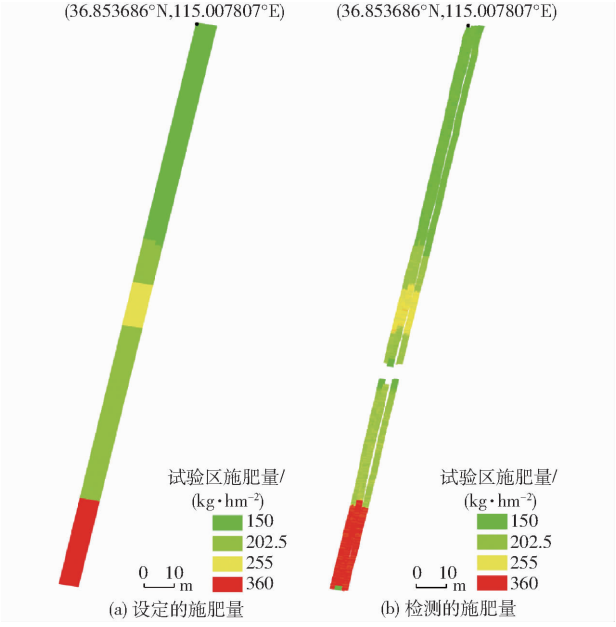
田间试验于 2024 年 10 月在中国农业大学曲周实验站进行(36.853 686° N,115.007 807° E),试验场景如图 13 所示。试验区为一块长 145 m、宽 7.2 m 的区域,由中国农业大学资源与环境学院对土壤氮含量进行测定,并据此制作试验区的测土配方施肥处方图。处方图将施肥量划分为 4 个等级,分别为 150、202.5、255、360 kg/hm^2。试验前将处方图保存为.shp 文件,并导入到变量施肥控制系统中,当地玉米播种农艺常用的前进速度为 6 ~ 8 km/h,本试验的前进速度在其范围内,符合当地农艺条件。试验过程中,由可视化系统实时监测变量施肥过程中的肥量信息,并将实时前进速度、经纬度、肥量值等图层数据进行记录和存储。



图 13 田间试验场景

Fig. 13 Field trial scene

试验完成后,导出可视化系统记录的肥量数据,并采用 ArcGIS 软件对施肥量数据进行可视化处理,结果如图 14 所示。图 14a 为设定的各区域施肥量,图 14b 为可视化系统统计的各区域施肥量情况。不同的施肥量由低到高通过不同的颜色进行可视化表达。从图中可以看出,系统可视化的肥量分布情况与设定的肥量基本一致,各个不同施肥量区域的颜色基本匹配。然而,在施肥量 202.5 kg/hm^{2}的区域,出现了部分肥量未被统计的情况。经分析发现,该区域为灌溉用水沟,施肥过程中需要绕过该区域,因此该区域记录的施肥量为 0。以上结果表明,可视化系统不仅可以实时显示施肥量的情况,还能在施肥完成后对整个施肥区域的肥量施用情况进行可视化呈现,为后续生产环节的决策提供数据支持。



(a) 设定的施肥量 (b) 检测的施肥量

图 14 田间施肥量可视化结果

Fig. 14 Visualization of fertilizer application rates in field

5 结论

(1)设计了一种适用于玉米精量播种机的施肥可视化系统。通过对肥量信号进行滤波和降噪处理,提高了肥量信号的稳定性,有效抑制了脉冲干扰。通过构建施肥单体定位模型及补偿算法,得到了精确施肥位置。基于 ArcGIS 平台,实现了施肥位置与肥量的空间匹配、施肥图层的实时绘制与可视化显示,以及施肥数据的高效存储和追溯。

(2)不同施肥量(75 ~ 300 kg/hm^2)的试验中,系统检测的施肥量与实际施肥量的差异较小,可视化界面上显示的平均准确率在 90% 以上,与实际准确率的平均偏差为 4.47%,检测精度最高达 98.44%,最大误差为 16.20 kg/hm^2。表明系统在不同施肥量条件下均能准确可视化施肥量,满足玉米精量播种的施肥需求。

(3)不同前进速度(6 ~ 15 km/h)的试验中,系统在 9 ~ 15 km/h 的高速条件下表现更为稳定,平均

肥量检测精度达到 90% 以上，施肥准确率偏差低于 10%。这表明系统在高速作业条件下能够更好地适应排肥过程的连续性和稳定性。

(4)田间试验结果表明，系统可视化的肥量分布图与各试验区域的目标施肥量吻合度高，能够准确反映实际施肥情况，并实现历史数据的有效追溯，为后续农田管理和生产决策提供可靠的数据支持。

参 考 文 献

[1] 崔爱民，张久刚，张虎，等. 我国玉米生产现状及发展变革[J]. 中国农业科技导报，2020，22(7)：10－19.
CUI Aimin，ZHANG Jiugang，ZHANG Hu，et al. Preliminary exploration on current situation and development of maize production in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology，2020，22(7)：10－19.(in Chinese)

[2] 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 CSAE，2023，39(9)：1－16.(in Chinese)

[3] 王辉，刘艺豪，周利明，等. 施肥播种机肥料流量分段式 PID 控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(2)：32－40.
WANG Hui，LIU Yihao，ZHOU Liming，et al. Design and test of fertilizer flow piecewise pid control system of fertilizer planter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(2)：32－40.(in Chinese)

[4] 周帅，王熙. 基于 AMESim 的变量施肥机液压驱动系统设计与仿真[J]. 农机化研究，2023，45(8)：46－51.
ZHOU Shuai，WANG Xi. Design and simulation of hydraulic drive system of variable fertiliser applicator based on AMESim [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2023，45(8)：46－51.(in Chinese)

[5] 王玉娜，米国华. 北方春玉米施肥现状及节肥潜力[J]. 玉米科学，2021，29(3)：151－158.
WANG Yu'na，MI Guohua. Fertilizer application in maize production in northern China：current status and fertilization optimal potential[J]. Journal of Maize Sciences，2021，29(3)：151－158.(in Chinese)

[6] 卜浩然，张立新，董万城，等. 基于 RBF－PID 的棉花变量施肥控制系统设计与试验[J]. 农机化研究，2025，47(6)：106－111.
BU Haoran，ZHANG Lixin，DONG Wancheng，et al. Design and test of variable fertilization control system for cotton based on RBF－PID[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2025，47(6)：106－111.(in Chinese)

[7] 巩海亮. 基于 NDVI 的玉米中耕变量施肥实时预测调控系统研究[D]. 大庆：黑龙江八一农垦大学，2021.
GONG Hailiang. Research on the real-time predictive control system of variable fertilization in corn field cultivation based on NDVI[D]. Daqing：Heilongjiang Bayi Agricultural University，2021.(in Chinese)

[8] PATRÍCIO D I，RIEDER R. Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops：a systematic review[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2018，153：69－81.

[9] GRIFT T E. Mass flow measurement of granular materials in aerial application—Part 1：simulation and modeling[J]. Transactions of the ASAE，2001，44(1)：19－26.

[10] GRIFT T E，WALKER J T，HOFSTEE W J. Materials in aerial application—Part 2：experimental model validation[J]. Transactions of the ASAE，2001，44(1)：27－34.

[11] 周利明，马明，苑严伟，等. 基于电容法的施肥量检测系统设计与试验[J]. 农业工程学报，2017，33(24)：44－51.
ZHOU Liming，MA Ming，YUAN Yanwei，et al. Design and test of fertilizer mass monitoring system based on capacitance method[J]. Transactions of the CSAE，2017，33(24)：44－51.(in Chinese)

[12] BACK S，YU S，KIM Y，et al. An image-based application rate measurement system for a granular fertilizer applicator[J]. Transactions of the ASABE，2014，57(2)：679－687.

[13] 杨立伟，黄家运，张季琴，等. 基于微波多普勒法的施肥质量流量检测系统研究[J]. 农业机械学报，2020，51(增刊 1)：210－217.
YANG Liwei，HUANG Jiayun，ZHANG Jiqin，et al. Mass flow measurement system of granular fertilizer based on microwave doppler method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(Supp. 1)：210－217.(in Chinese)

[14] 贾洪雷，温翔宇，王刚，等. 颗粒肥料质量流量传感器设计与试验[J]. 农业机械学报，2020，51(增刊 1)：130－136.
JIA Honglei，WEN Xiangyu，WANG Gang，et al. Design and experiment of mass flow sensor for granular fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(Supp. 1)：130－136.(in Chinese)

[15] 孟志军，赵春江，付卫强，等. 变量施肥处方图识别与位置滞后修正方法[J]. 农业机械学报，2011，42(7)：204－209.
MENG Zhijun，ZHAO Chunjiang，FU Weiqiang，et al. Prescription map identification and position lag calibration method for variable rate application of fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2011，42(7)：204－209.(in Chinese)

[16] 孟志军，赵春江，刘卉，等. 基于处方图的变量施肥作业系统设计与实现[J]. 江苏大学学报(自然科学版)，2009，30(4)：338－342.
MENG Zhijun，ZHAO Chunjiang，LIU Hui，et al. Development and performance assessment of map-based variable rate granule application system[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition)，2009，30(4)：338－342(in Chinese)

[17] 杨程，臧英，周志艳，等. 基于 PID 算法的气力式施肥机变量施肥控制系统设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报，2017，48(3)：320－327.
YANG Cheng，ZANG Ying，ZHOU Zhiyan，et al. Design and test of pneumatic fertilizer applicator variable ratio fertilization control system based on PID algorithm[J]. Journal of Shenyang Agricultural University，2017，48(3)：320－327.(in Chinese)

(下转第 152 页)

system for corn precision planters[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 206: 107670.
[29] 张学军, 张海涛, 史增录, 等. 棉花精量穴播器取种状态监测系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(5): 9 - 19.
ZHANG Xuejun, ZHANG Haitao, SHI Zenglu, et al. Design and experiments of seed pickup status monitoring system for cotton precision dibblers[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(5): 9 - 19. (in Chinese)
[30] WANG Haoyu, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Comparative investigation and evaluation of electric-drive seed-metering systems across diverse speed ranges for enhanced high-precision seeding applications[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 222: 108976.
[31] 邓伟健, 李志伟, 邱秀丽, 等. 基于交叉导流式种箱的稻种流动性及结拱研究[J]. 农机化研究, 2013, 35(12): 145 - 149, 154.
DENG Weijian, LI Zhiwei, QIU Xiuli, et al. The research of rice liquidity and arching based on crossed diversion seed-box [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(12): 145 - 149, 154. (in Chinese)
[32] QIAN Cheng, QIN Wei, JIANG Youcong, et al. Parameter optimization and experiment of the vacuum seed meter with double holes for direct seeding of rice[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2025, 18(2): 89 - 99.
[33] QIAN Cheng, FAN Zhuorong, YAN Daoqing, et al. Numerical simulation of dry and wet rice seeds in an air-suction seed metering device[J]. Agronomy-Basel, 2025, 15: 1145.
[34] 苏森. 水田轻型动力底盘行走轮与土壤力学测试装置研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2021.
SU Miao. Research on walking wheel and soil mechanics testing device of light power chassis in paddy field[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2021. (in Chinese)

(上接第 61 页)

[18] 杨程. 稻田气力式追肥机变量施肥控制系统的研究[D]. 广州:华南农业大学, 2017.
YANG Cheng, Study on variable rate fertilization control system of pneumatic[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
[19] 张季琴,刘刚,胡号,等. 排肥单体独立控制的双变量施肥控制系统研制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(10): 38 - 45.
ZHANG Jiqin, LIU Gang, HU Hao, et al. Development of bivariate fertilizer control system via independent control of fertilizing unit[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(10): 38 - 45. (in Chinese)
[20] ZHANG Yaohui, ZHANG Kailiang, YU Yang, et al. Design of maize variable fertilization condition and fault warning system [Z]. St. Joseph, MI: ASABE, 20191.
[21] Fendt. Leaders Drive Fendt[EB/OL]. [2025 - 06 - 27]. https://www.agcocorp.com/int/en/home/brands-and-solutions/fendt/.
[22] Fendt. Machine control with FendtONE[EB/OL]. [2025 - 06 - 27]. https://www.fendt.com/int/smart-farming/machine-control.
[23] Precision Planting. 20|20 Display Monitors[EB/OL]. [2025 - 06 - 27]. https://www.precisionplanting.com/products/planters/2020.
[24] 杨帆. 变量施肥肥量检测与调控系统研究与试验[D]. 北京:中国农业大学, 2024.
YANG Fan. Research and experiment on detection and control system of variable fertilization[D]. Beijing: China Agricultural University,2024. (in Chinese)
[25] LI Xiukui, QI Yunchi. Multi-antenna and geometry-based differential GNSS positioning for vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(5): 3389 - 3401.
[26] XIAO Liang, HUANG Zhigang, QIN Honglei. Differential positioning based on the orthogonal transformation algorithm with GNSS multi-system[J]. GPS Solutions, 2018, 22(3): 89.
[27] JIANG Xudong. Ierative truncated arithmetic mean filter and its properties[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(4): 1537 - 1547.
[28] HE Xiantao, DING Youqiang, ZHANG Dongxing, 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.
[29] HE Xiantao, DING Youqiang, ZHANG Dongxing, 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.
[30] 刘刚,胡号,黄家运,等. 变量施肥滞后时间检测与位置修正方法研究[J]. 农业机械学报,2021,52(增刊):74 - 80.
LIU Gang, HU Hao, HUANG Jiayun, et al. Lag time detection and position correction method of variable rate fertilization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(Supp.):74 - 80. (in Chinese)
[31] 兰红,杨玮,李民赞,等. 基于 ArcGIS Engine 的土壤氮肥空间分布成图系统[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 221 - 227.
LAN Hong, YANG Wei, LI Minzan, et al. Soil nitrogen spatial distribution mapping system based on arcgis engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(Supp.):221 - 227. (in Chinese)
[32] 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.
DING Youqiang, LIU Yanwei, YANG Li, et al. Monitoring system of maize precision planter based on android and CAN bus [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(12):33 - 41,62. (in Chinese)