doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.12.025

基于时空耦合补偿的处方图式稻麦变量施肥系统研究

丁友强[1]　祁　兵[1]　王云霞[1]　邓　越[1]　AMANTAYEV Maxat[1,2]　张文毅[1]
(1.农业农村部南京农业机械化研究所,南京 210014;2.科斯塔奈州立大学,科斯塔奈 110000)

摘要:针对传统施肥方式均一化投入易造成资源浪费、环境污染以及现有变量施肥系统滞后补偿方法适应性不足的问题,本研究设计了一种基于时空耦合补偿的处方图式稻麦变量施肥系统。采用低成本 STM32F407 控制芯片和 CAN 总线控制架构对控制系统和核心中央控制器进行设计,结合 ArcMap 地理信息系统平台提出基于农学专家决策的数字化变量施肥处方图生成方法,开发了支持 GPS 报文接收、解析、处方图加载与高效检索的人机交互软件,提出了施肥量调节位置时空耦合校正模型,通过排肥口动态定位数学建模和滞后时间自学习算法,实现了系统响应时间的现场自动标定与动态补偿。台架试验表明,滞后时间自学习算法在不同作业速度(4~8 km/h)和施肥量梯度(0~450 kg/hm^2、0~750 kg/hm^2、450~750 kg/hm^2)下的计算准确率均在 90.5% 以上;田间试验显示,开启时空耦合校正后,50 m 作业段内平均施肥量精度达 97.4%,较无校正状态提升 8.0 个百分点,且作业速度增至 8 km/h 时精度波动仅 2.5 个百分点。该系统为稻麦变量施肥提供了高精度、低成本的智能化解决方案。

关键词:稻麦变量施肥;处方图;控制系统;ArcMap;时空耦合补偿
中图分类号:S24　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)12-0279-10　　**OSID**:

Research of Prescription Map-based Variable Rate Fertilization System for Rice and Wheat with Spatio-temporal Coupling Compensation Method

DING Youqiang[1]　QI Bing[1]　WANG Yunxia[1]　DENG Yue[1]　AMANTAYEV Maxat[1,2]　ZHANG Wenyi[1]
(1. *Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing* 210014, *China*
2. *Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University, Kostanay* 110000, *Kazakhstan*)

Abstract: Aiming to address the issues of resource waste and environmental pollution caused by uniform fertilization in traditional methods, as well as the inadequate adaptability of existing variable-rate fertilization systems' lag compensation approaches, a prescription map-based variable-rate fertilization system for rice and wheat featuring spatio-temporal coupling compensation function was designed. The system employed an STM32F407 chip and CAN bus architecture for the control unit and central processor. Integrated with ArcMap GIS platform, it proposed a digital prescription map generation method based on agronomic expert decisions. The developed human-machine interface software supported GPS message reception/parsing, prescription map loading, and high-efficiency retrieval. Innovatively, a spatio-temporally coupled calibration model for fertilizer application adjustment was established through dynamic outlet positioning modeling and lag time self-learning algorithm, enabling automatic field calibration and dynamic compensation of system response time. Bench tests demonstrated that the self-learning algorithm achieved over 90.5% accuracy across working speeds (4~8 km/h) and fertilization gradients (0~450 kg/hm^2, 0~750 kg/hm^2, 450~750 kg/hm^2). Field trials showed that with spatio-temporal calibration enabled, the average fertilization accuracy reached 97.4% within 50-meter segments—an 8.0 percentage points improvement over non-calibrated status—while maintaining only 2.5 percentage points accuracy fluctuation at 8 km/h. This system provided a high-precision, low-cost intelligent solution for variable-rate fertilization in rice/wheat cultivation, offering technical support for

收稿日期:2025-06-08　修回日期:2025-07-15
基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD2000402)、江苏省重点研发计划项目(BE2023368)、江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(23)1023)和中国农业科学院科技创新工程项目(跃升计划 2204、CAAS-SAE-202301)
作者简介:丁友强(1994—),男,助理研究员,博士,主要从事农业智能装备研究,E-mail:dyq_cau@163.com
通信作者:张文毅(1966—),男,研究员,主要从事精量播种装备研究,E-mail:zwy-yxkj@163.com

China's national policy of reducing fertilizer use while increasing efficiency.

Key words: variable rate fertilization for rice and wheat; prescription map; control system; ArcMap; spatio-temporal coupling compensation

0 引言

施用化肥是提高稻麦产量的重要举措,而传统施肥方式往往忽视土壤等要素的时空变异性,采用均一化投入模式,不仅造成肥料配置失衡,还易引发水土面源污染问题[1-5]。相比之下,变量施肥可综合多源数据差异化调整肥料投入,既符合"按需供肥"的精准农业理念,又能有效降低肥料投入成本、减少环境污染,可为稻麦产量与施肥效率的协同提升提供技术支撑[6-10]。

当前,变量施肥按照实施方式主要分为实时传感器式和处方图式。尽管实时传感器式能获取即时数据,但其仅能获取时空切片数据,难以整合历史及多维信息;而处方图式能够整合土壤特性、气候变化、历史产量等多维信息,构建更为科学的决策模型,因此已成为当前主流的、更具综合决策优势的变量作业方式[11-16]。处方图式变量作业技术的关键在于处方图生成、变量控制系统以及精准调控算法3个方面,对此国外已形成完整的技术体系。以美国 AgLeader 公司为例,其 SMS 精准农业管理系统集成了土壤分析、产量预测等功能,可生成高精度的变量播种、施肥处方图,同时该公司还研发了 Sure 系列关键部件及变量控制系统,实现了从数据采集、决策分析到变量实施的全流程解决方案[17-18]。此外,德国 Horsch[19],美国 Precision Planting[20]、Kinze[21]等公司也推出了成熟的变量作业解决方案,代表了当前该领域的领先水平。国内学者近年来在处方图生成、滞后补偿等关键技术上取得了一定进展。例如,和贤桃等[22-24]开发了一种基于处方图的变量播种控制系统,采用 RTK 设备获取高精度坐标,利用 Android 平板作为处方加载和检索平台,通过统计系统滞后时间并设计滞后补偿算法,提高了玉米变量播种精度;丁幼春等[25]设计了一种油菜精准变量施肥调控系统,通过栅格化处方指导施肥,采用线性自抗扰算法,基于滞后距离和作业速度获取滞后时间并建立位置补偿模型,实现了油菜变量施肥作业。马旭等[26]、孟志军[27]、戚武振[28]在变量播种施肥方面也进行了大量研究。总体而言,国外产品虽成熟但成本高昂,国内研究虽多但缺乏成熟、可推广的产品,且现有系统所采用的滞后时间统计方法在机具或作业环境发生变化时往往缺乏适应性,导致精度下降。

针对上述研究现状,尤其是国内处方图式变量施肥系统在产品化、滞后补偿适应性方面的不足,本文聚焦处方图式稻麦变量施肥系统,提出低成本中央控制器硬件设计方案,采用 CAN 总线分布式控制架构,构建变量施肥控制系统;利用 ArcMap 地理信息平台,提出基于农学专家决策的数字处方生成方法,开发可实现 GPS 报文解析与处方加载、检索功能的人机交互软件,实现农艺处方和农机控制系统的高效融合;提出施肥量调整位置时空耦合校正模型以及滞后时间自学习算法,减小滞后误差,提升响应性能。集成上述研究方案,创制基于时空耦合补偿的处方图式稻麦变量施肥系统并开展试验,为稻麦施肥实现"减量增效"目标提供智能化解决方案。

1 控制系统硬件设计

1.1 控制系统总体结构和工作流程

控制系统硬件结构如图 1 所示,主要由实时动态差分定位系统(RTK,定位精度 ± 2.5 cm)、Windows 工控机(Windows 7 或以上系统)、中央控制器、排肥伺服电机及配套行星减速机、12 V 稳压器以及 12 – 24 V 升压变压器等组成。

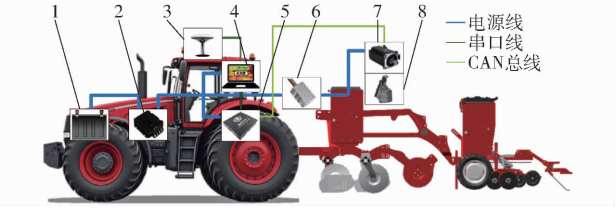


图 1 基于时空耦合补偿的处方图式稻麦变量施肥控制系统结构图

Fig. 1 Structural diagram of prescription map-based variable rate fertilization control system for rice and wheat with spatio-temporal coupling compensation

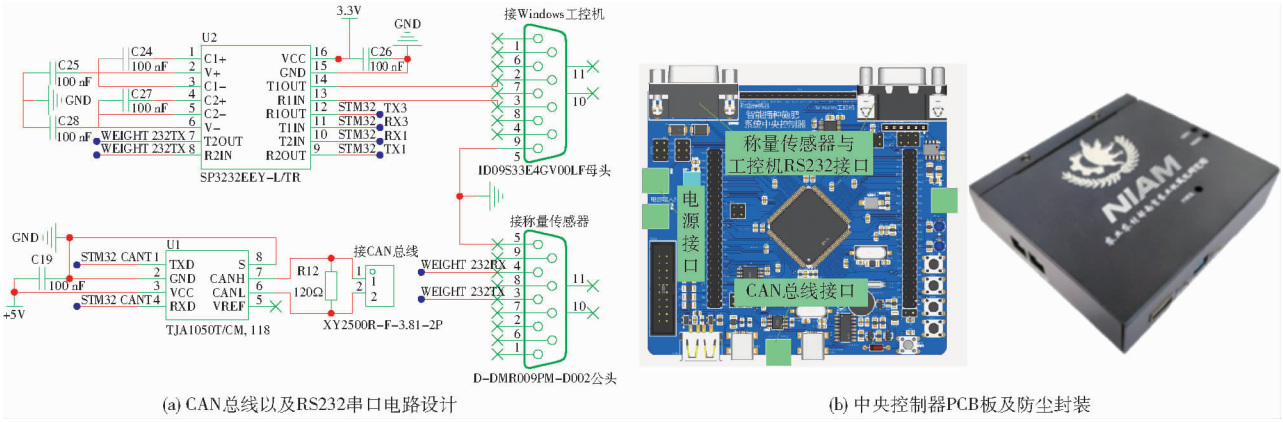
1. 12 V 蓄电池 2. 12 V 稳压器 3. RTK 接收机 4. Windows 工控机 5. 中央控制器 6. 12 – 24 V 升压变压器 7. 伺服电机 8. 排肥器

作业时,RTK 接收器通过 RS232 串口将卫星报文(遵循 NMEA – 0183 协议)传输至 Windows 工控机,Windows 工控机上的变量施肥人机交互软件解析出经纬度坐标和拖拉机行进速度,并据此在预存的处方文件中分别检索出当前位置施肥量,该数据随后通过 RS232 串口传输至中央控制器,中央控制器综合拖拉机行进速度,基于施肥量–电机转速转换模型以及施肥量调整位置时空耦合校正模型计算出

排肥伺服电机的目标转速，并通过 CAN 总线将转速控制指令发送至排肥伺服驱动器。伺服电机（配备旋转编码器）在闭环控制算法作用下精确执行转速指令，通过行星减速机增扭后驱动排肥轴，实现施肥量精准调控。系统电源由拖拉机 12 V 电池经稳压后供给，升压至 24 V 后为伺服电机提供稳定动力。

1.2　低成本中央控制器硬件及通讯协议设计

中央控制器是整个控制系统的核心单元，除用于接收 Windows 工控机下发的施肥量数据（需 RS232 接口）、发送排肥伺服电机调速指令外（需 CAN 接口），为实现本研究提出的滞后时间自学习功能，还需要具备外接称量传感器的功能（需 RS232 接口），同时要求有较高的计算速度，以提升施肥量调整位置时空耦合校正算法执行效率。基于上述功能需求，选定意法半导体高性能处理器 STM32F407（主频达 168 MHz）为核心处理器，分别对伺服电机通讯用 CAN 总线电路、称量传感器及 Windows 工控机通讯用双通道 RS232 串口电路等功能电路进行设计（图 2a），CAN 总线电路选用美国恩智浦高速 CAN 总线收发器 TJA1050T/CM，118，具备良好的抗温度冲击和高频振动性能，可适应田间复杂作业环境；RS232 串口电路选用美国迈凌双通道 RS232 收发器芯片 SP3232EEY－L/TR，可同时转换两路独立串口信号，分别实现 STM32 TTL 电平到 Windows 工控机以及称量传感器的 RS232 电平转换。为提高通讯效率，参照 NMEA－0183 协议分别定义中央控制器和 Windows 工控机、称量传感器间的通讯协议，而中央控制器和伺服电机间使用现有成熟的 CANopen 通讯协议（表 1）。此外，为提高防尘性能，设计铝外壳对中央控制器 PCB 进行封装（图 2b）。以上设计均针对控制系统功能需求进行，相比于市场通用控制器去除了冗余电路，成本节省 50% 以上且体积更小（表 2），更易满足对成本敏感的国内需求。



(a) CAN总线以及RS232串口电路设计　　(b) 中央控制器PCB板及防尘封装

图 2　中央控制器设计

Fig. 2　Design of central controller

表 1　中央控制器与各单元间的通讯协议

Tab. 1　Communication protocol between central controller and each unit

通讯单元	通讯类型与通讯协议	测试数据	测试数据解析
Windows 工控机－中央控制器	RS232；自拟协议：$AGRC_FERT,〈目标施肥量〉,〈单位〉,〈校验和〉*〈CR〉〈LF〉（参照 NMEA－0183 设计）	$AGRC_FERT,150.5,kg/hm2*43\r\n	查询当前施肥量为 150.5 kg/hm^2
称量传感器－中央控制器	RS232；自拟协议：$AGRCW,〈质量值〉,〈单位〉,〈UTC 时间〉,〈校验和〉*〈CR〉〈LF〉（参照 NMEA－0183 设计）	$AGRCW,10.500,kg,112035.50*1D\r\n	11 时 20 分 35.50 秒，称量传感器上报质量为 10.5 kg
中央控制器－伺服电机	CAN；CANopen 协议	ID：0x601 Data：23 FF 60 00 E8 03 00 00	设置 ID 号为 1 的伺服电机转速为 100 r/min（E8 03，小端传输，对应十进制为 1 000，单位 0.1 r/min）

2　控制系统软件及算法设计

2.1　基于专家决策的处方图生成方法

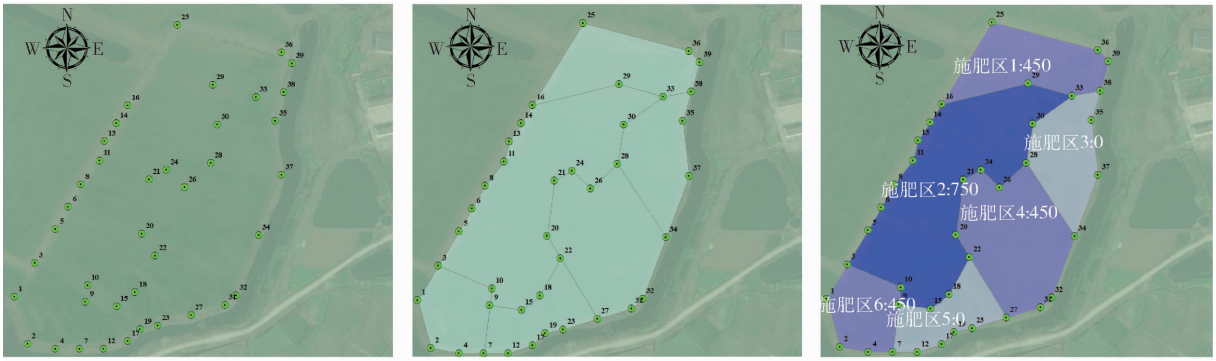
农学施肥决策需转换为电子处方图才可供控制系统读取、执行，对此本研究提出一种基于专家决策的处方图生成方法，具体步骤如图 3 所示，首先以农学专家根据土壤、肥力等要素时空异质性划分的施肥栅格管理单元为基础，采用 RTK 设备采集各栅格

表 2 自研中央控制器与市场通用控制器对比

Tab. 2 Comparison between self-developed central controller and market common controller

型号	规格/(mm×mm)	主要功能接口	成本/元
野火 STM32 开发板	176×125	双 RS232、双 CAN、485、USB 等	436
正点原子探索者	160×121	双 RS232、CAN、485、USB 等	402
本研究中央控制器	100×100	双 RS232、CAN、USB	190

边界点坐标(WGS84 地理坐标系),构建目标地块的地理空间数据集(图 3a),随后通过 ArcMap 平台最小边界几何工具(Minimum bounding geometry)生成田块整体轮廓面要素,并依据内部栅格边界点和决策施肥量将其划分为若干栅格管理单元面要素(图 3b);为提升空间数据的几何精度,进一步运用空间校正工具(Spatial adjustment)对其进行投影转换和拓扑纠偏(WGS84 至 WGS84_UTM_Zone_50N),在此基础上,通过字段计算器(Field calculator)将各栅格对应的决策施肥量参数批量写入面要素属性表,建立标准化处方属性字段(图 3c,表 3),最后为实现 WGS84 坐标系下的经纬度坐标直接检索,再将其转回地理坐标系(WGS84),生成施肥处方图文件(.mxd 格式),实现农艺决策数据向农机智能终端的空间化映射。



(a) 栅格边界特征点坐标 (b) 栅格管理单元面要素 (c) 施肥量写入面要素属性表

图 3 基于专家决策的处方图层生成步骤(此处方图仅为展示生成步骤的示例,田间试验所用非此处方图)

Fig. 3 Prescription map generation procedure based on agronomic expert decisions

表 3 边界点坐标及面要素属性表

Tab. 3 Attribute of polygon feature layer

边界点序号	经度坐标/(°)	纬度坐标/(°)	施肥区及对应施肥量/(kg·hm^{-2})
1	118.369757	32.044373	施肥区 1(450)
2	118.369856	32.044020	施肥区 2(750)
3	118.369912	32.044625	施肥区 3(0)
⋮	⋮	⋮	⋮
38	118.371778	32.045903	施肥区 5(0)
39	118.371840	32.046119	施肥区 6(450)

2.2 人机交互软件开发

基于 Visual Studio 开发环境和 ArcEngine 组件库,采用 C#语言开发变量施肥系统人机交互软件(图 4)。软件具备 GPS 报文接收解析、处方图加载、展示、检索等功能。其中处方检索通过 Timer1_Tick 定时器触发处方图检索机制,在每次 GPS 坐标更新时,首先调用 axMapControl1.get_Layer 方法获取施肥图层,随后通过 pFeature.Fields.FindField 方法定位施肥量字段索引,最终采用 pFeature.get_Value 方法同步提取字段属性值(即施肥量)。为实现高效检索,建立了基于空间索引的优化查询流程:①基于当前坐标构建点状查询几何体。②采用 ISpatialFilter 接口设置空间关系为 esriSpatialRelWithin。③通过 IFeature.Search 方法执行空间查询。④采用字段缓存机制避免重复调用 FindField 方法。测试表明,在处方图栅格单元数量不超过 1 024 个时,从 GPS 坐标获取到处方检索完成得到施肥量平均耗时不超过 92.56 ms。

2.3 排肥口动态定位数学模型

获取到排肥口的坐标位置是查询处方图、获取施肥量的前提。条播机排肥器由通轴驱动,在机具幅宽范围内施肥量一致,基于此对模型进行简化,如图 5 所示,将机具垂直对称线 l_1 和各排肥口所在水平直线 l_2 的交点 $B(x_B, y_B)$ 作为等效排肥口坐标,RTK 接收机获取的经纬度坐标基于 WGS84 地理坐标系,难以进行长度计算,因此先采用动态投影变换方法,通过 ArcEngine ISpatialReferenceFactory 接口将其转换为 WGS84_UTM_Zone_50N 投影坐标系下的长度坐标,然后基于平面坐标系(xOy)对排肥口的坐标位置及 RTK 接收机坐标进行数学建模,其量化关系可通过求解直角三角形 $\triangle ABC$ 得到



图 4　变量施肥系统人机交互软件

Fig. 4　Human-machine interface software for variable-rate fertilizer application control system

$$\begin{cases} x_B = x - l_{AB}\sin\theta \\ y_B = y - l_{AB}\cos\theta \end{cases} \tag{1}$$

式中　(x,y)——RTK 接收机安装点 A 的投影坐标系坐标

θ——机具航向角，(°)

l_{AB}——点 A 与点 B 间的距离，m

其中，(x,y)、θ 均由 RTK 接收机动态获取，l_{AB} 可通过测量或查阅机具手册获取。

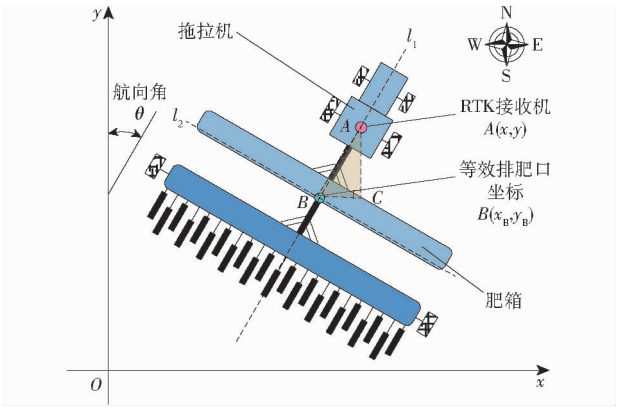


图 5　排肥口动态定位数学模型

Fig. 5　Kinematic model for determining spatial coordinates of precision fertilizer discharge points

2.4　施肥量调节位置时空耦合校正模型

针对变量作业中存在的施肥量调节位置偏移问题，本研究提出一种时空耦合校正模型。如图 6 所示，作业时 RTK 接收机率先跨越处方图栅格边界（Q_1Q_2 边界线），触发处方信息检索机制，由于存在双重时序差异：①机具结构特性，RTK 接收机与排肥口存在固定跨距 l_{AB}。②系统响应滞后，控制系统收到坐标更新经算法执行到最后机具完成施肥量调节耗时 t_{lag}，主要包含：通讯耗时（RS232 和 CAN 通讯）、中央控制器运算耗时、伺服电机的响应耗时（即从接收到目标转速指令到实际转速达到稳定所需时间）以及肥料在导肥管内的运移耗时。施肥量调节完成时，上述因素将导致机具相对处方图位置出现 3 种情形：①超前调节，排肥口尚未跨越边界时完成调节。②理想状态，排肥口与栅格边界空间重合时完成调节。③滞后调节，排肥口已进入新栅格一定距离后完成调节。

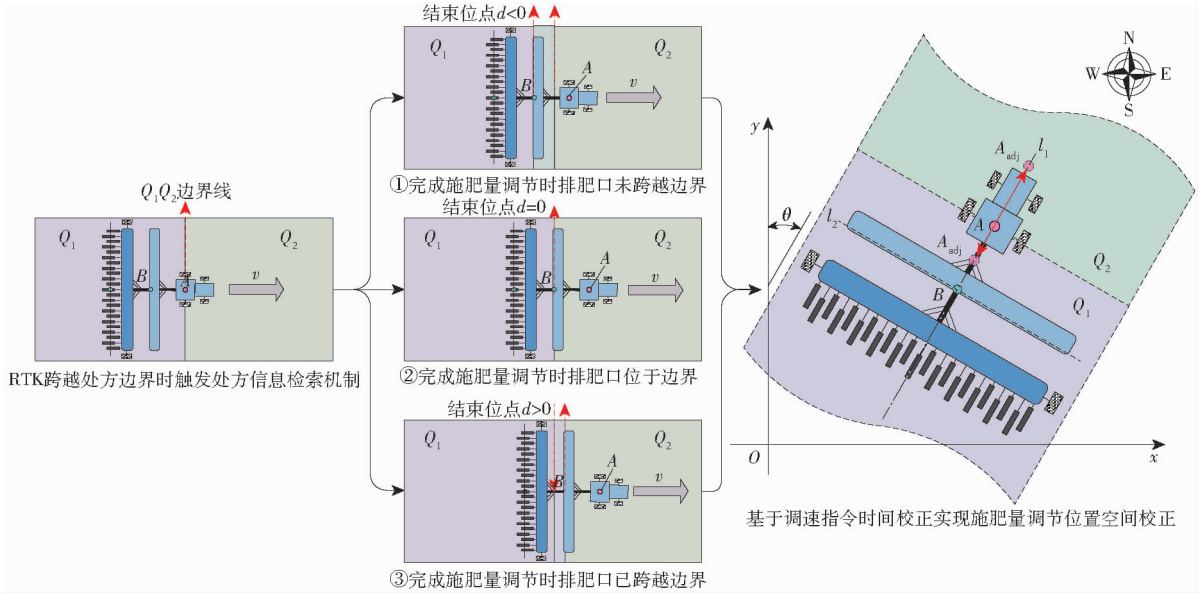


图 6　施肥量调节位置时空耦合校正模型

Fig. 6　Dynamic compensation model for spatial synchronization of fertilizer delivery

为解决情形①和③实际作业效果和处方图不契合的问题，提出基于调速指令时间校正的施肥量调节位置空间校正方法：设施肥量调节完成时排肥口所处位点（结束位点）和边界线的距离为 d，则调速指令校正时间 t_{adj} 求解公式为

$$d = l_{AB} - (t_{adj} + t_{lag})v/3.6 \tag{2}$$

式中 v——机具即时速度，km/h，由 RTK 实时获取

t_{lag}——系统响应滞后时间，s

施肥量调节完成时排肥口与栅格边界重合条件为 $d=0$，故求解 t_{adj} 的关键在于获取 t_{lag}。获取到 t_{adj} 后，即可解算校正后的坐标点 $A_{adj}(x_{adj}, y_{adj})$

$$\begin{cases} x_{adj} = x + \dfrac{v}{3.6} t_{adj} \sin\theta \\ y_{adj} = y + \dfrac{v}{3.6} t_{adj} \cos\theta \end{cases} \tag{3}$$

当 RTK 接收机位于坐标点 $A(x,y)$ 时，对应在处方图中查询校正后的坐标点 $A_{adj}(x_{adj}, y_{adj})$ 对应的施肥量，从而减小超前或滞后距离，实现实际作业效果同处方图的精准契合。

2.5 滞后时间 t_{lag} 自学习算法

现有研究多采用高速摄影、理论分析等方法对滞后时间进行统计[29-30]，但在机具、作业环境变化时往往不再适用。本研究采用称量传感器，通过试验研究不同条件下的累计施肥量，并对其特征进行分析：图 7 分别展示了在作业速度 4 km/h、作业幅宽 0.6 m 条件下，机具由单位面积施肥量为 0 kg/hm² 的栅格分别进入 450 kg/hm² 和 750 kg/hm²（对应的单位时间施肥量分别为 30 g/s 和 50 g/s）栅格时的累计施肥量曲线，可以发现，由于控制系统和执行部件响应滞后，机具进入施肥区域一定时间后累计施肥量才发生变化，且在机具行进到施肥量为 0 kg/hm² 的栅格之前，累计施肥量处于持续变化状态，为寻找可作为达到目标施肥量的稳定判定依据，对累计施肥量曲线进行微分处理，得到单位时间施肥量曲线，其在机具进入施肥区域一定时间后可达到相对稳定状态，而首次达到目标施肥量对应时刻与机具跨越栅格边界对应时刻间的差值即为滞后时间，根据这一思想，提出滞后时间自学习算法。

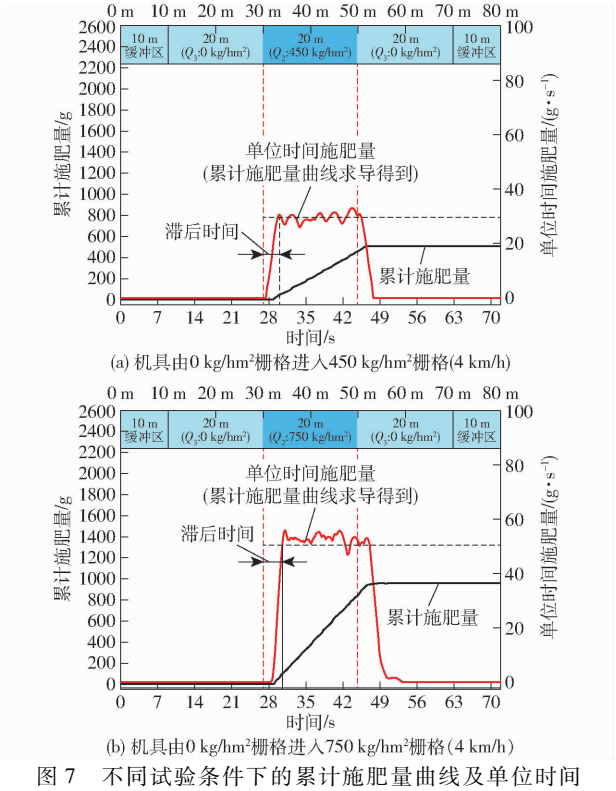


图 7 不同试验条件下的累计施肥量曲线及单位时间施肥量曲线

Fig. 7 Curves of cumulative fertilizer application and real-time application under experiment conditions

图 8 为根据图 7 实际作业特点构建的滞后时间分析示意图，机具由单位面积施肥量为 Q_F（kg/hm²）的栅格进入到单位面积施肥量为 Q_T（kg/hm²）的栅格，设机具累计施肥量为 $q(t)$（g），则单位时间施肥量可用其一阶导函数 $q'(t)$（g/s）表示，$q'(t)$ 与实际单位面积施肥量 Q_A（kg/hm²）的关系为

$$Q_A = \frac{36q'(t)}{vl} \tag{4}$$

式中 l——作业幅宽，m

因称量传感器采集的信号为离散量，$q'(t)$ 可通过中心差分公式求解

$$q'(t) = \frac{q(t+\Delta t) - q(t-\Delta t)}{2\Delta t} \tag{5}$$

式中 Δt——称量传感器采集时间间隔，s

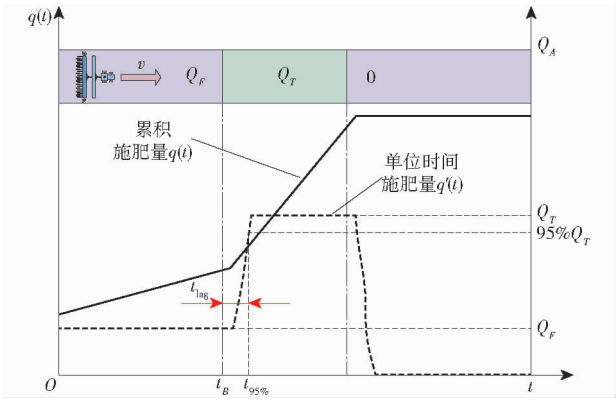


图 8 滞后时间 t_{lag} 示意图

Fig. 8 Schematic of response lag time t_{lag}

参照相关研究[31]，将 Q_A 达到 95% Q_T 的时刻认定为达到目标施肥量的时刻（$t_{95\%}$），同时为避免排肥量变异等噪声干扰，设定达到判定值并持续 100 ms 方为有效，即

$$t_{95\%} = \min\left\{ t \mid \forall t \in [t-0.1, t], \frac{36q'(t)}{vl} \geqslant 95\% Q_T \right\} \tag{6}$$

根据 2.4 节分析，t_{lag}可表示为

$$t_{lag} = t_{95\%} - t_B \tag{7}$$

式中　t_B——控制系统初次判定机具跨过栅格边界的时刻，通过 STM32 中断程序进行标记

获取到 t_B后联立公式(2)、(3)、(7)，即可得到校正后的坐标点 $A_{adj}(x_{adj}, y_{adj})$。

3　试验结果分析

3.1　台架试验

3.1.1　滞后时间自学习算法准确性评估试验

为评估自学习算法的准确性，采用台架试验对不同条件下的实际滞后时间与算法计算值进行对比，并统计其相对误差。如图 9 所示，试验台架主要由直流电源、单行排肥器、排肥管、接料桶等组成。试验时，控制系统伺服电机同单行排肥器通过联轴器连接，称量传感器置于接料桶下方以采集累计施肥量；采用 GPS Simulator 软件发送虚拟 GPS 报文模拟机具前进状态，采用串口数据抓包软件 AccessPort 分别捕获含有时间戳的 GPS 报文和累计施肥量帧数据，据此标记跨越栅格边界 GPS 报文对应的时刻点并计算实际施肥量达到 95% 目标施肥量的时刻点，二者差值即为实际滞后时间，与之对比，自学习算法对应的滞后时间通过中央控制器计算并由上位机显示。选取机具作业速度与施肥量变化梯度作为试验因素，各因素设定 3 个试验水平：作业速度设为 4、6、8 km/h，施肥量变化梯度设为 0 ~ 450 kg/hm^2、0 ~ 750 kg/hm^2、450 ~ 750 kg/hm^2。各因素水平的组合试验重复 3 次。试验效果通过滞后时间计算准确率 δ 进行评价，其计算公式为

$$\delta = \left(1 - \frac{|t_{lag_a} - t_{lag_c}|}{t_{lag_a}}\right) \times 100\% \tag{8}$$

式中　t_{lag_a}——滞后时间实测值

t_{lag_c}——滞后时间计算值

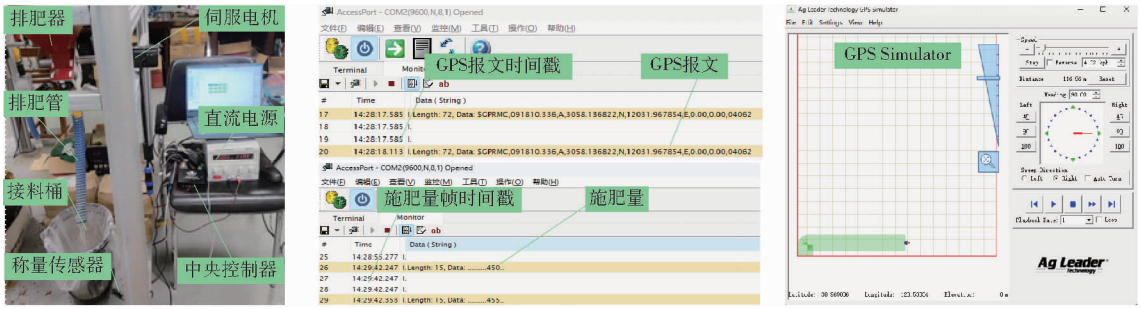


图 9　试验台架及测量方法

Fig. 9　Test bench and measurement instrumentation

试验结果如表 4 所示，可以发现，作业速度因素和准确率总体呈负相关关系，随着作业速度从 4 km/h 增至 8 km/h，0 ~ 450 kg/hm^{2}施肥量梯度的准确率降幅为 2.4 个百分点，0 ~ 750 kg/hm^{2}施肥量梯度准确率降幅为 4.5 个百分点，450 ~ 750 kg/hm^{2}施肥量梯度准确率降幅为 1.7 个百分点，3 个施肥量梯度对应的准确率均呈下降趋势，速度每提升 2 km/h，平均准确率降低约 2.9 个百分点，但仍保持在 90.5% 以上；施肥量梯度对准确率的影响呈非线性特征，在相同速度下(如 8 km/h)，0 ~ 450 kg/hm^{2}与 450 ~ 750 kg/hm^{2}的准确率差异不超过 1 个百分点，验证了自学习算法对施肥量变化的较强的鲁棒性。综合而言，本研究提出的自学习算法在滞后时间预测中表现优异，不同试验条件下，计算值与实测值的平均相对偏差均控制在 5.0% ~9.5% 之内，现有理论计算、高速摄影统计滞后时间的方法多将特定条件下得到的滞后时间作为实际滞后时间，并应用于不同的试验条件，难以保证准确性，本研究所提方法可快速获取不同试验条件下的滞后时间，具有高效准确的特点，在典型农艺参数下具有更高可靠性。

表 4　不同试验条件下的 t_{lag_a}、t_{lag_c}和 δ 对比

Tab. 4　Comparison of t_{lag_a}, t_{lag_c} and δ under different test conditions

作业速度/(km·h^{-1})	施肥量 0 ~ 450 kg/hm^2			施肥量 0 ~ 750 kg/hm^2			施肥量 450 ~ 750 kg/hm^2		
	t_{lag_a}/s	t_{lag_c}/s	δ/%	t_{lag_a}/s	t_{lag_c}/s	δ/%	t_{lag_a}/s	t_{lag_c}/s	δ/%
4	2.45	2.30	93.9	2.33	2.45	95.0	1.60	1.70	93.8
6	2.05	2.20	92.7	2.32	2.48	92.9	1.38	1.28	92.5
8	1.57	1.70	91.5	1.52	1.66	90.5	1.43	1.32	92.1

3.1.2　伺服电机动态响应特性测试

根据 2.4 节所述，伺服电机动态响应特性是影响整体滞后时间的关键之一，为评估伺服电机动态响应特性对滞后时间的影响，在台架上进行了空载

条件下的转速阶跃响应测试。本研究所用伺服电机为沈阳广成科技有限公司生产的 ISM－262CABN－N－M 型伺服电机(额定转速 3 000 r/min,额定功率 200 W),目标转速设置 5 个水平:500、1 000、1 500、2 000、2 500、3 000 r/min。通过 CAN 总线分析仪向伺服电机发送阶跃转速指令,并基于 CANopen 协议采集反馈的实时转速数据,标记达到目标转速 95% 时刻点,即为电机空载阶跃响应时间,结果如图 10 所示。

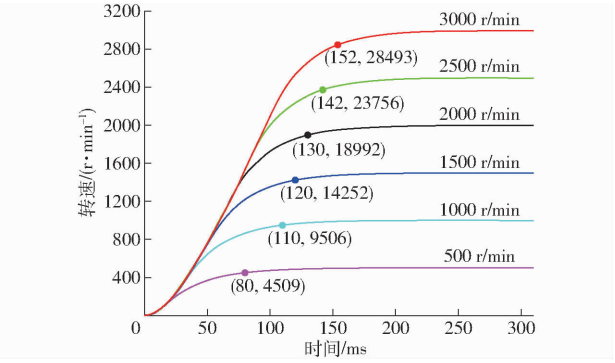


图 10 伺服电机阶跃响应特性曲线

Fig. 10 Step response characteristic curves of servo motor

由图 10 可以发现,在阶跃转速指令下,电机实际转速呈现典型的指数上升规律,且响应时间总体和目标转速呈正相关关系,但最大不超过 0.154 s(0～3 000 r/min),显著小于 3.1.1 节台架实测的系统总滞后时间(6 km/h,450～750 kg/hm^2 条件下为 1.38 s),表明本研究中伺服电机响应滞后并非系统滞后的主要来源,降低系统滞后效应可从优化中央控制器算法以及提高肥料在导肥管内的运移速度两方面加以解决。

3.2 田间试验

3.2.1 试验方法

为评估位置时空耦合校正模型的田间适用性,将研发的变量控制系统搭载于优尼亚 2BFGYT－16 型复式条播机上(施肥幅宽 2.95 m,l_{AB} = 2.5 m),在农业农村部南京农业机械化研究所白马试验基地(119.181 1°E,31.625 1°N)进行田间试验(图 11)。试验前,利用 ArcMap 平台和 2.1 节所述方法制作处方图,设置 3 个施肥量梯度(0～450 kg/hm^2、450～750 kg/hm^2、0～750 kg/hm^2)、3 个作业速度(4、6、8 km/h)、2 个校正状态(有/无校正)。施肥区为 50 m 直线作业段,两端另设置 10 m 缓冲带。试验时,先通过模拟方法使控制系统获取滞后时间,然后机具依据设置的试验因素和水平分别通过处方图,利用接料袋收集实际排肥量,各因素水平的组合试验重复 3 次。试验效果通过施肥量精度 η 进行评价,其计算公式为

$$\eta = \left(1 - \frac{|Q_A - Q_T|}{Q_T}\right) \times 100\% \tag{9}$$



(a) 田间试验处方 (b)条播机及滞后时间获取 (c) 机具田间作业轨迹

图 11 田间试验

Fig. 11 Field trials

3.2.2 试验结果

通过表 5、6 可以看出,校正状态对施肥量精度影响极显著(p < 0.001),不同施肥量梯度条件下,有校正状态平均施肥量均优于无校正状态,校正开启后整体平均施肥量精度达 97.4%,相比无校正状态的 89.4%,提升 8.0 个百分点,表明所提出的位置时空耦合校正模型可显著提升变量施肥精度;作业速度对施肥量精度的影响不显著(p = 0.085),但作业速度与施肥量精度总体呈负相关关系:当作业速度从 4 km/h 升至 8 km/h,有校正状态的施肥量精度最大降幅 2.5 个百分点(450～750 kg/hm^2),而无校正状态最大降幅则达 7.3 个百分点(0～750 kg/hm^2),体现了校正模型对速度变化的稳健性;施肥量梯度对施肥量精度影响显著(p = 0.049),零状态响应条件下,有无校正状态下的平均施肥量精度均有所下降;对于同一目标施肥量(750 kg/hm^2),无校正状态下的零状态响应(0～750 kg/hm^2)的施肥量精度整体要低于全响应(450～750 kg/hm^2),这可能是由于全响应条件下机具由 450 kg/hm^2 施肥量区域进入 750 kg/hm^2 时,驱动电机转速可以更快地达到目标施肥量对应转速,且相较于零状态响应,这一过程的排肥动作可以减小实际施肥量和目标施肥量的相对误差,而有校正状态下,零状态响应和全响应对应的施肥量精度无显著性差异,从侧面证明了位置时空耦合校正模型的校正效果(表 7)。与文献[25]基于实测滞后距离和机具作业速度求解滞后时间进行

表 5　施肥量精度 η 方差分析

Tab. 5　Analysis of variance for fertilization rate precision η

变异来源	平方和	自由度	均方	F	p	显著性
校正状态(A)	1 074.41	1	1 074.41	121.36	<0.001	**
施肥量梯度(B)	68.72	2	34.36	3.88	0.049	*
速度(C)	53.18	2	26.59	3.00	0.085	ns
$A\times B$	94.65	2	47.33	5.34	0.021	*
误差	159.14	10	15.91			

注：** 表示极显著($p<0.001$)，* 表示显著($p<0.05$)，ns 表示不显著。

表 6　不同校正状态及施肥量梯度下平均施肥量精度

Tab. 6　Average η under different calibration statuses and fertilization rates

校正状态	施肥量梯度/(kg·hm^{-2})	平均施肥量精度 η/%	精度总体均值/%
有校正	0～450	97.9±1.0	97.4
	0～750	97.0±1.5	
	450～750	97.2±1.3	
无校正	0～450	90.4±1.3	89.4
	0～750	87.8±3.7	
	450～750	90.1±2.1	

施肥量补偿的方法(所得施肥精度不低于 95.21%)相比，本研究校正状态下各试验水平的平均施肥精度均不低于 95.8%，二者精度相当，但本研究采用的校正模型可快速获得不同速度、施肥量等条件下的校正参数，操作更为简便高效。

4　结论

(1)设计了一种基于时空耦合补偿的处方图式稻麦变量施肥系统。采用低成本中央控制器设计方案，提出基于专家决策的数字处方图层生成方法，实现了农艺决策数据向农机智能终端的空间化映射，开发了具备 GPS 报文接收解析、处方图加载、检索等功能的变量施肥人机交互软件，实现了不同施肥管理单元差异化施肥调控。

表 7　不同试验条件下实际施肥量 Q_A 以及施肥量精度 η 的对比(50 m 作业长度)

Tab. 7　Comparison of actual fertilizer rates Q_A and η under different test conditions (50 m working length)

作业速度/(km·h^{-1})	校正状态	施肥量 0～450 kg/hm^2		施肥量 0～750 kg/hm^2		施肥量 450～750 kg/hm^2	
		Q_A/(kg·m^{-2})	η/%	Q_A/(kg·m^{-2})	η/%	Q_A/(kg·m^{-2})	η/%
4	有校正	443.6	98.6	740.1	98.7	762.8	98.3
6		457.2	98.4	780.6	98.9	730.3	97.4
8		464.7	96.7	723.5	96.5	781.6	95.8
4	无校正	413.2	91.8	685.7	91.4	690.0	92.0
6		403.9	89.8	660.0	88.0	678.3	90.4
8		402.9	89.5	630.5	84.1	658.5	87.8

(2)提出了施肥量调节位置时空耦合校正模型以及滞后时间自学习算法。通过实时排肥量求导建立单位时间施肥量与时间的函数关系，结合机具跨越栅格边界的程序标记时刻点，实现了滞后时间的现场自动标定。基于 RTK 安装位置与排肥口的空间关系，结合滞后时间和机具速度提前或延迟发送施肥量调节指令，显著提高了变量施肥精度。

(3)通过台架试验和田间试验验证了控制系统性能。台架试验结果表明，不同作业速度条件下，滞后时间自学习算法计算准确率均超过 90.5%，且对施肥量变化保持较强的鲁棒性；50 m 田间作业长度测试结果显示，不同施肥量梯度条件下，启动位置时空耦合校正后整体平均施肥量精度达 97.4%，较无校正状态(89.4%)提升 8.0 个百分点；作业速度从 4 km/h 升至 8 km/h，校正状态下的施肥精度最大降幅仅为 2.5 个百分点，显著优于无校正状态的 7.3 个百分点，充分验证了所提校正模型的有效性和控制系统的精确性。

参　考　文　献

[1] 王玲玲. 化肥和农药施用量对我国粮食产量影响的研究[D]. 大连：大连海洋大学，2024.
WANG Lingling. A study on the impact of chemical fertiliser and pesticide application on grain yield in China[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2024. (in Chinese)

[2] 王玉姝. 化肥施用对粮食产量和环境的影响[D]. 郑州：河南农业大学，2021.
WANG Yushu. Effects of chemical fertilizer application on grain yield and environment[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2021. (in Chinese)

[3] 刘芳，刘帅. 化肥施用量对中国粮食产量的影响分析[J]. 中国农机化学报，2021，8(42)：92－100.
LIU Fang, LIU Shuai. Analysis of the effect of chemical fertilizer application on grain yield in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 8(42): 92－100. (in Chinese)

[4] 程方平，赵帮泰，梅林森，等. 玉米变量播种技术研究现状及趋势[J]. 中国农机化学报，2024，45(12)：41－46.
CHENG Fangping, ZHAO Bangtai, MEI Linsen, et al. Current status and trends of research on variable seeding technology for corn[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(12): 41－46. (in Chinese)

[5] 王梦沛. 典型黑土区田块尺度精准施肥对策研究[D]. 哈尔滨：东北农业大学，2021.

WANG Mengpei. Study on plot scale accurate fertilization strategy in typical black soil area[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021. (in Chinese)

[6] 程修沛. 基于处方图的小区播种精准控制技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2021.
CHENG Xiupei. Research on precision control technology of plot seeding based on prescription map[D]. Beijing: China Agricultural University, 2021. (in Chinese)

[7] 李俊男. 基于栅格处方图的嵌入式精准施肥控制系统研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2023.
LI Junnan. Research on embedded precision fertilization control system based on grid prescription map[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)

[8] 施印炎, 陈满, 汪小旦, 等. 离心匀肥罩式水稻地表变量撒肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 86 - 93, 113.
SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Design and experiment of variable-rate fertilizer spreader with centrifugal distribution cover for rice paddy surface fertilization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 86 - 93, 113. (in Chinese)

[9] 王金峰, 吕振阳, 赵敏义, 等. 基于处方图的水稻侧深变量施肥控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 151 - 162.
WANG Jinfeng, LÜ Zhenyang, ZHAO Minyi, et al. Design and experiment of rice side-deep variable rate fertilization control system based on prescription diagrams[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 151 - 162. (in Chinese)

[10] 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)

[11] 韩英, 贾如, 唐汉. 精准变量施肥机械研究现状与发展建议[J]. 农业工程, 2019, 9(5): 1 - 6.
HAN Ying, JIA Ru, TANG Han. Research status and development suggestions of precision variable-rate fertilization machine [J]. Agricultural Engineering, 2019, 9(5): 1 - 6. (in Chinese)

[12] 李乐. 变量播种施肥控制系统的研究——基于财务会计精细化[J]. 农机化研究, 2024, 46(2): 216 - 220.
LI Le. Study on variable seeding and fertilization control system based on the refinement of financial accounting[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(2): 216 - 220. (in Chinese)

[13] 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)

[14] 唐汉, 王金武, 徐常塑, 等. 化肥减施增效关键技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 1 - 19.
TANG Han, WANG Jinwu, XU Changsu, et al. Research progress analysis on key technology of chemical fertilizer reduction and efficiency increase[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 1 - 19. (in Chinese)

[15] 陈学庚, 温浩军, 张伟荣, 等. 农业机械与信息技术融合发展现状与方向[J]. 智慧农业(中英文), 2020, 2(4): 1 - 16.
CHEN Xuegeng, WEN Haojun, ZHANG Weirong, et al. Advances and progress of agricultural machinery and sensing technology fusion[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(4): 1 - 16. (in Chinese)

[16] 戴雨舒. 小麦无人机变量施肥的经济技术分析与评价[D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
DAI Yushu. Economic and technological analysis and evaluation of variable rate fertilization for wheat drones[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023. (in Chinese)

[17] AgLeader seed command section control[EB/OL]. (2021 - 04 - 15). https://www.agleader.com/blog/ag-leader-section-control/.

[18] SureStop[EB/OL]. (2021 - 04 - 15). https://www.agleader.com/planting/surestop/.

[19] Intelligence[EB/OL]. (2021 - 04 - 14). https://www.horsch.com/en/products/int.

[20] 20|20[EB/OL]. (2021 - 04 - 15). https://www.precisionplanting.com/products/product/2020.

[21] Kinze electronics[EB/OL]. (2024 - 01 - 15). https://www.stjoetractor.com/siteart/pdf/KinzeElectronics.pdf.

[22] 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.

[23] 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.

[24] 和贤桃. 处方图式变量播种控制系统研究与试验[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
HE Xiantao. Research and experiment on map-based control system of variable rate seeding[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)

(下转第 300 页)

ZHANG Xiying. Water use and water-saving irrigation in typical farmlands in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(10):1454 – 1464. (in Chinese)

[31] 宋卓研,徐晓辉,宋涛,等.基于 PSO – BP 优化 PID 模型的水肥控制系统研究[J].中国农机化学报,2021,42(9):83 – 89.
SONG Zhuoyan, XU Xiaohui, SONG Tao, et al. Research on water and fertilizer control system based on PSO – BP optimization PID model[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021,42(9):83 – 89. (in Chinese)

[32] 崔迎港,徐晓辉,宋涛,等.基于 SOA 优化模糊 PID 的水肥控制系统研究[J].中国农机化学报,2022,43(3):60 – 67.
CUI Yinggang, XU Xiaohui, SONG Tao, et al. Study on water and fertilizer control system based on SOA optimized fuzzy PID [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022,43(3):60 – 67. (in Chinese)

[33] 黄凌志,李金怀,赵海鹊,等.随机森林算法在水肥一体化灌溉中的应用[J].自动化应用,2023,64(10):182 – 184,187.
HUANG Lingzhi, LI Jinhuai, ZHAO Haihu, et al. Application of stochastic forest algorithm in integrated irrigation of water and fertilizer[J]. Automation Application, 2023,64(10):182 – 184,187. (in Chinese)

[34] 马富裕,刘扬,崔静,等.水肥一体化研究进展[J].新疆农业科学,2019,56(1):183 – 192.
MA Fuyu, LIU Yang, CUI Jing, et al. Review on the research progress of water and fertilizer integration[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2019, 56(1): 183 – 192. (in Chinese)

[35] VALENZUELA L J, DÍAZ G J, SANJUÁN S C D M. Improvement in productivity and quality of soilless saffron crops by implementing fertigation[J]. Agri. Engineering,2024,6(2):1649 – 1659.

[36] 潘敏睿,马军,王杰,等.水肥一体化技术发展概述[J].中国农机化学报,2020,41(8):204 – 210.
PAN Minrui, MA Jun, WANG Jie, et al. Development of water and fertilizer integration technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(8): 204 – 210. (in Chinese)

(上接第 288 页)

[25] 丁幼春,李浩鹏,董万静,等. 基于处方图的油菜精准变量施肥调控系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(3): 256 – 266.
DING Youchun, LI Haopeng, DONG Wanjing, et al. Design and experiment of precise variable fertilization control system for oilseed rape based on prescription maps[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 256 – 266. (in Chinese)

[26] 马旭,赵旭,刘赛赛,等. 水稻高速插秧机固体颗粒肥料变量施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 99 – 110.
MA Xu, ZHAO Xu, LIU Saisai, et al. Design and experiment of solid particle fertilizer variable rate fertilization device for high-speed rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 99 – 110. (in Chinese)

[27] 孟志军. 基于处方图的变量施肥作业系统关键技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.
MENG Zhijun. Key technology on map-based variable rate granular application system[D]. Beijing: China Agricultural University,2007. (in Chinese)

[28] 戚武振. 智能稻麦播种机变量施肥系统设计与研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
QI Wuzhen. Design and research of variable rate fertilization system for intelligent rice and wheat seeder[D]. Taian: Shandong Agricultural University,2018. (in Chinese)

[29] 宿宁. 精准农业变量施肥控制技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
SU Ning. Research on variable rate fertilization control technology in precision agriculture[D]. Hefei: University of Science and Technology of China,2016. (in Chinese)

[30] 王佰伟. 叶轮式水稻侧深施肥装置设计与试验研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2024.
WANG Baiwei. Design and experimental study of impeller-type side deep fertilization device for rice[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University,2024. (in Chinese)

[31] FULTON J, SHEARER S, HIGGINS S, et al. Method to generate and use as-applied surfaces to evaluate variable-rate fertilizer applications[J]. Precision Agriculture, 2013, 14(2): 184 – 200.