

小麦种行肥行精准拟合变量施肥控制系统研究

安晓飞^{1,2} 付卫强^{1,2} 王 培^{1,2} 魏学礼¹ 李立伟¹ 孟志军¹

(1. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097; 2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 针对黄淮海地区化肥施用过量 and 肥料利用率低的问题, 基于 GNSS 拖拉机自动导航技术和液压控制技术, 提出一种小麦种行、肥行精准拟合的新模式, 设计了一种小麦种肥精准拟合变量施肥控制系统。通过安装在拖拉机上的自动导航系统进行施肥作业, 记录导航线和施肥作业轨迹, 根据机具幅宽和肥(种)管位置分布, 对施肥导航线进行平移, 从而完成导航播种作业, 同时记录播种导航线和播种作业轨迹, 实现种行、肥行精准对行作业。小麦种行、肥行精准拟合变量施肥控制系统可以根据用户设置的目标施肥量, 实时计算液压电动机目标转速, 同步将目标转速指令发送给施肥控制器, 控制器根据光电编码器反馈的电动机转速信号, 调节电液比例阀开度, 进而驱动液压电动机带动排肥执行机构进行排肥, 实现液压电动机转速的闭环控制, 一次完成带施、旋耕、深层条施的同步变量施用。田间试验结果表明, 种、肥精准对行误差最大为 6 cm, 误差在 3 cm 以内占 90% 以上, 完全满足黄淮海地区宽窄行种植模式下的作业需求; 浅层排肥量最大误差为 2.70%, 变异系数最大为 0.05; 深层排肥量最大误差为 7.95%, 变异系数最大为 0.08, 完全满足田间试验需要。田间试验设置常规施量、减量 12% 施肥二水平三重复, 测产结果表明, 与常规施肥 3 900 kg/hm² 的产量相比, 减量 12% 施肥的产量达到 3 945 kg/hm²。

关键词: 小麦; 种肥拟合; 变量施肥; 控制系统

中图分类号: S224.2; S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)S0-0096-06

Development of Variable Rate Fertilization Control System Based on Matching Fertilizer Line and Seed Line of Wheat

AN Xiaofei^{1,2} FU Weiqiang^{1,2} WANG Pei^{1,2} WEI Xueli¹ LI Liwei¹ MENG Zhijun¹

(1. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China
2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: In order to improve the situation of excessive use of fertilizer and low utilization of fertilizer, a variable rate fertilization control system based on matching fertilizer line and seed line was designed. The system was composed of four modules, including electric control module, hydraulic module, mechanical module and vehicle terminal. Firstly, automatic navigation system installed on the tractor was used for navigation fertilization and navigation sowing. According to the width of the mechanism and the location of the fertilizer (seed) tube, the navigation line was shifted to match seed fertilizer line, accurately. Subsequently, according to the target value, the actual rotation speed would be determined automatically by the corresponding strategy. The experiment results showed that the field matching error was within 6 cm and more than 90% of the data points were within 3 cm. The results of field experiment showed that the errors of the fertilizer value were less than 2.70% and the variation coefficient was less than 0.05 at the shallow layer. The errors of the fertilizer value were less than 7.95% and the variation coefficient was less than 0.08 at the deep layer. In the field experiment, traditional fertilizer application zone and reduction of 12% zone were set. The corresponding yield were 3 900 kg/hm² and 3 945 kg/hm² in 2018. Compared with the traditional fertilizer application, the yield of reduction of 12% zone had no significant difference. The variable rate fertilization control system based on matching fertilizer line and seed line provided a new method to reduce the excessive uses of fertilizer for wheat growth.

Key words: wheat; navigation fertilization; variable rate fertilization; control system

收稿日期: 2019-04-20 修回日期: 2019-05-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200600-2016YFD0200605)

作者简介: 安晓飞(1986—),男,副研究员,主要从事农机智能装备研究,E-mail: anxf@nrcita.org.cn

通信作者: 王培(1983—),男,高级工程师,主要从事农机智能装备研究,E-mail: wangp@nrcita.org.cn

0 引言

目前我国农作物化肥平均用量为 328.5 kg/hm^2 , 远高于世界平均水平 (120 kg/hm^2), 是美国的 2.6 倍, 欧盟的 2.5 倍, 其中黄淮海地区施肥量最高, 达到 383 kg/hm^2 , 远高于发达国家 225 kg/hm^2 的安全上限^[1-3]。过量施用化肥导致资源浪费和环境污染, 耕地有机质含量大幅下降, 土壤日益酸化、板结, 土壤微生物系统遭到破坏, 农产品品质下降^[1-3]。

精准施肥主要分为基于处方图的变量施肥作业和基于实时传感器的变量施肥作业。两种施肥方式都需要实现信息感知、精准决策、智能控制和变量投入, 对此国内外开展了大量精准施肥的研究^[4-23]。自 20 世纪 90 年代以来, 美国 CASE 公司生产的 ST820 型气力输送式变量施肥播种机、John Deere 公司的施肥控制系统等已经在播种、施肥环节实现了自动化和智能化; 日本的 TABATA 公司设计了颗粒肥变量施肥机, 采用直线位移传感器、旋转变换器、增量式编码器检测外槽轮转速, 从而获得实时排肥量数据; 张书慧等^[7]基于卫星定位原理, 以 CPLD 为控制器开发了一种变量施肥控制系统, 在自动和手动模式下可获取机车位置信息; 孟志军等^[4]设计了基于 PC104CPU 模块的车载作业控制终端, 开发了基于处方图的变量作业控制系统, 系统作业精度达到了设计指标; 赵岩等^[9]基于种肥分层深施技术和精准对行技术, 研制了 2FQ-5 型棉花分层施肥机, 基于 GNSS 自动导航系统实现了拖拉机行走轨迹的预设、记录和重复, 保证了种肥精准对行; 冯慧敏等^[21]基于自动导航技术研制了精准对行深施追肥机, 采用搭载自动导航系统的拖拉机牵引, 实现精准对行, 追肥机按指定路线精确作业, 最大直线跟踪偏差为 $\pm 2\text{ cm}$, 保证了对行精度。

以上研究都是基于处方图技术或实时传感器技术实现的精准施肥, 基于小麦种肥定位定量关系开展精准施肥的研究较少, 本文提出一种适用于黄淮海地区小麦宽窄行种植模式下的种行肥行精准拟合变量施肥控制系统, 以期实现小麦种肥精准对行, 同步实现变量施肥和分层施用。

1 材料与方法

1.1 种肥精准拟合工作原理

种肥精准拟合是指小麦播种行和基肥施肥行精准对行, 在实际作业中分为基肥施用、小麦播种、种肥精准对行 3 个方面, 保证小麦种子和肥料均匀分布于同一垂直方向, 其中浅层施肥深度为 $7\sim 10\text{ cm}$, 深层施肥深度为 $12\sim 15\text{ cm}$; 小麦种子播深为

$3\sim 4\text{ cm}$, 播种位置在肥料正上方, 保证播种行与施肥行精准对行。图 1 是种肥精准拟合示意图。

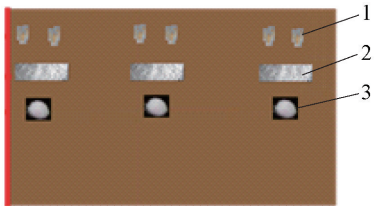


图 1 种肥精准拟合示意图

Fig. 1 Schematic for matching seed line and fertilizer line

1. 小麦种子 2. 浅层肥料 3. 深层肥料

本研究针对黄淮海地区小麦宽窄行种植模式, 宽行行间距 20 cm , 窄行行间距 10 cm , 依靠安装于拖拉机上的自动导航系统进行基肥导航施肥作业, 记录拖拉机导航线和施肥机作业轨迹; 根据机具幅宽和肥(种)管位置分布, 对施肥导航线进行平移, 进行导航播种作业, 同时记录播种导航线和播种作业轨迹, 保证施肥作业轨迹和播种作业轨迹精准对行。

1.2 种肥精准拟合变量施肥控制系统设计

1.2.1 总体结构设计

种肥精准拟合变量施肥主要由精准对行和变量施肥 2 个环节组成。精准对行控制依靠自动导航系统实现, 拖拉机顶端安装有 GNSS 天线, 车载终端通过 CAN 总线与下位机控制器通信, 配置施肥机物理参数和作业参数, 同时采集卫星定位数据信息, 设定导航线, 施肥机按照设定的导航线前进施肥; 变量施肥环节由变量施肥控制系统实现, 主要包括电控部分、液压部分、机械部分和车载终端 4 部分。施肥机与拖拉机采用三点悬挂方式连接, 液压传动, 施肥机前后各有 9 个排肥器, 前端浅层撒施旋耕, 后端深层条施。图 2 为种肥精准拟合变量施肥控制系统总体结构图。

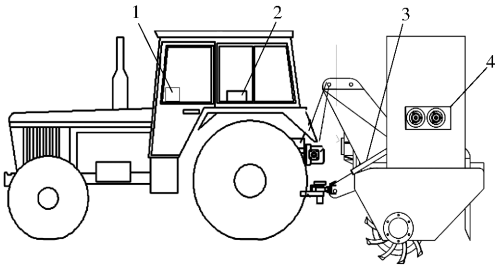


图 2 种肥精准拟合变量施肥控制系统总体结构图

Fig. 2 Overall structure diagram of VRF for matching fertilizer line and seed line

1. 车载终端 2. 变量施肥控制器 3. 施肥机具 4. 液压驱动控制装置

系统可以根据用户设置的目标施肥量, 实时计算液压马达目标转速, 并同步将目标转速指令发送

到施肥控制器,控制器根据光电编码器反馈的马达转速信号,调节比例阀开度,进而驱动液压马达带动排肥执行机构进行排肥,实现液压马达转速的闭环控制,一次完成带施、旋耕、深层条施的同步变量施用。图3为变量施肥控制系统结构图。

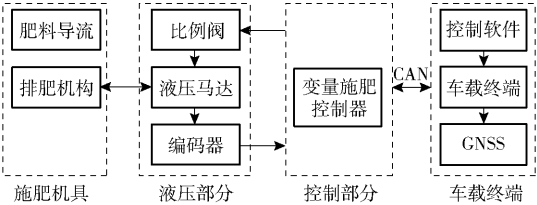


图3 变量施肥控制系统结构图
Fig.3 Structure diagram of VRF

1.2.2 硬件设计

小麦变量施肥控制系统硬件包括车载终端、GNSS接收机、变量施肥控制器、电液比例阀、液压马达、光电编码器和排肥机构。控制系统按功能分为控制环节、驱动环节和执行环节,分别由控制器、液压装置和机械装置组成,各环节协调配合工作,保证机车可以按照上位机软件的控制指令进行变量施肥作业。

车载终端施肥控制系统同步控制42根通讯总线,完成与上位机间的信息通讯,由变量施肥控制器接收上位机发送的目标转速指令,并与H80-S4型编码器实时测定反馈的转速进行比较,通过转速控制算法输出控制量实现PV0830型电子比例阀的流量控制,进而驱动BMPH50型液压马达带动执行机构进行排肥,实现分层深施。

C102-N型控制器同时通过通讯总线将2路液压马达实际转速上报给上位机,完成信息反馈,保证完整的闭环控制。编码器频率为2500Hz,电液比例阀额定排量为5.9cm³/r,额定工作压力10.5MPa,减速比为5.5。单路马达控制系统示意图如图4所示。

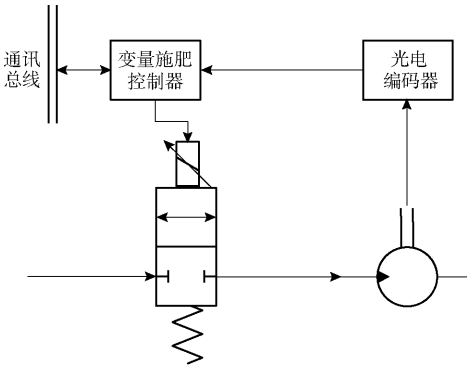


图4 单路马达控制系统示意图
Fig.4 Sketch of single road motor control system

1.2.3 软件设计

车载终端搭载的变量施肥控制软件是整个控制系统的核心,变量施肥控制软件由种肥拟合控制模块、作业信息管理模块、化肥信息管理模块、排肥参数标定模块和通信模块5个模块组成。图5为软件功能结构图。

控制软件根据实时接收的GNSS定位数据得到机器当前行进速度;根据机器的工作状态、复合肥料的N、P、K含量和目标施肥量,实时计算目标马达转速,形成指令发给下位机变量施肥控制器,控制器通过比较目标转速和光电码盘反馈的实际转速,输出控制量到电液比例阀,实时控制马达转速。

施肥机构采用外槽轮排肥器,在开度一定的情况下,排肥量由排肥轴转速决定。排肥机构转速计算公式为

$$n = \frac{Qvw}{qt}$$

(1)

式中 Q ——目标施肥量,kg/hm²
 n ——马达目标转速,r/min
 v ——拖拉机行进速度,m/s
 w ——机器幅宽,m
 q ——排肥器排量,g/r

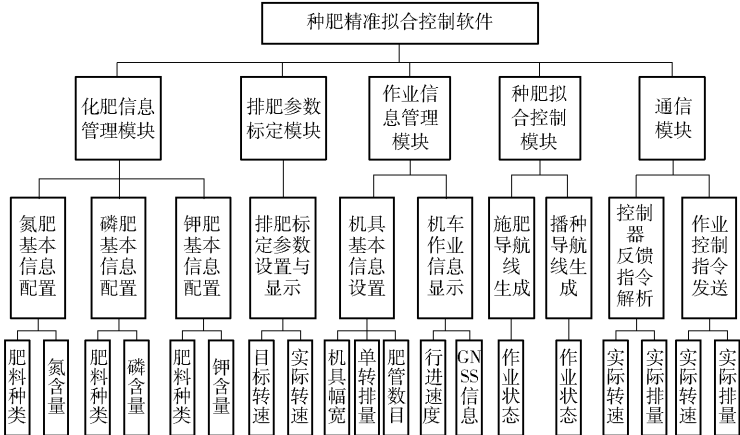


图5 种肥拟合控制软件功能结构图

Fig.5 Function diagram of control software for matching fertilizer line and seed line

t ——肥管数目

种肥拟合控制模块,主要负责施肥作业轨迹和播种作业轨迹记录,完成种肥精准对行作业;作业信息管理模块,主要负责进行机车基本信息设置,包括施肥机、播种机幅宽、肥管数目、种管数目等参数,机车作业时,该模块负责将机车行进速度、马达转速、排肥量等信息在终端界面显示,同时该模块设计包括与下位机通信协议设计;化肥信息管理模块主要负责显示肥料中的氮肥、磷肥、钾肥基本信息,包括N、P、K含量、单转排量等信息;排肥参数标定模块可以控制系统按照指定时间、指定转速进行马达转速控制,标定时在终端显示器上显示排肥轴目标转速和排肥轴实际转速;通信模块主要负责控制器反馈指令的解析和作业控制指令的发送。

1.3 评价方法

种肥精准拟合变量施肥机评价指标包括变量施肥机本身误差的分析、变异系数分析和对行误差分析。变异系数计算式为

$$C_v = \frac{\delta}{\bar{x}}$$

其中
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

式中 $\bar{x}$ ——每次试验的排肥量均值,kg
 x_i ——每次试验的排肥量,kg
 δ ——排肥量标准差,kg
 C_v ——排肥量变异系数

对行误差分析需根据采集的机具经纬度坐标,

通过转换软件 COORD 转换为可使用的大地坐标,利用 Matlab 软件进行线性拟合得到基准导航线的平面坐标公式,根据导航线坐标公式和采集的实际作业点坐标进行对行误差计算。实际作业点坐标 (x_i, y_i) ,对行作业偏差计算式为

$$\mu_i = \left| \frac{ax_i + b - y_i}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right|$$

式中 μ_i ——对行偏差,cm
 $a、b$ ——Matlab 拟合的斜率和截距

2 结果与讨论

2.1 精准对行精度试验

拖拉机搭载 AMG1102 自动导航系统,施肥机和播种机分别加装 RTK - GPS,用于设定、采集、记录不同机具作业轨迹。在平坦水泥路面和田间进行,拖拉机行进速度控制在 3 ~ 6 km/h,在不同速度下进行多组对行试验,行进速度浮动范围在 0.5 km/h 以内,沿作业路线往返行驶 3 组,记录试验数据,不同机具对行偏差结果如图 6 所示。

根据图 6c、6d 可以看出,机具精准对行偏差精度在 6 cm 以内,其中大田作业偏差 3 cm 以内占比超过 90%,在拖拉机行驶速度 3 ~ 6 km/h 时,相对于常规作业 10 ~ 20 cm 的作业偏差,本系统精准对行作业效果良好。

2.2 变量施肥控制系统标定试验

施肥控制系统采用 CAN 总线通信技术,基于 VS2008 平台开发的施肥量控制系统,主要包括系统设置、启动作业、暂停作业和退出系统 4 个功能模块。施肥机排肥标定是在已知排量的情况下,设定

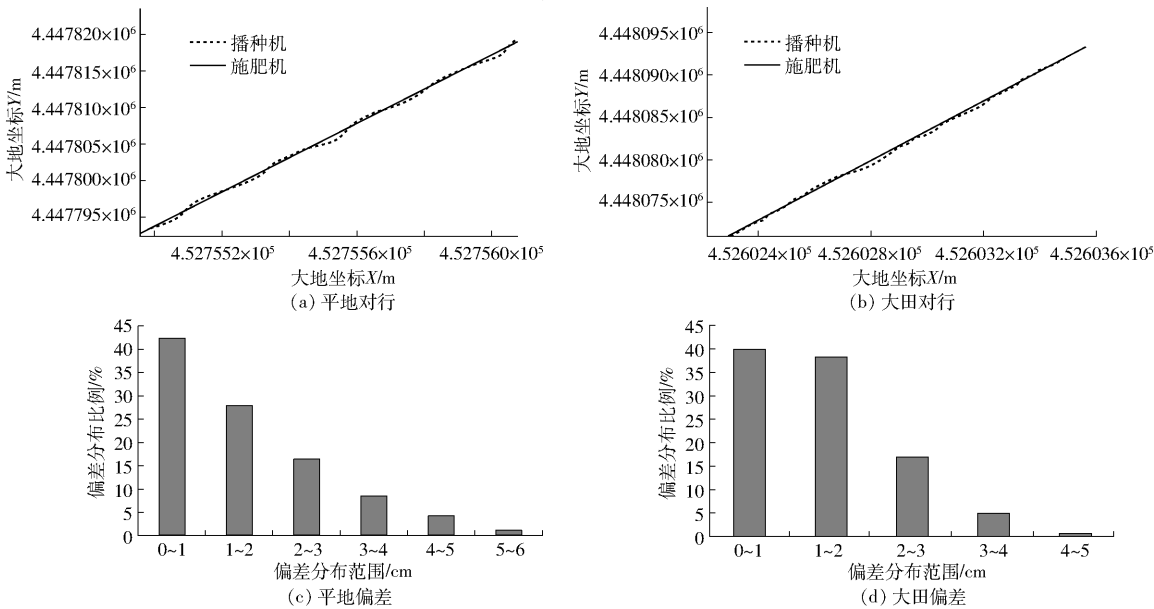


图 6 种肥精准对行试验结果

Fig. 6 Experiment results of matching fertilizer line and seed line

目标施用量、预设作业速度、运行时间等参数,实现排肥控制,通过称量计算实际排肥量并与理论施肥量进行比较,从而得出施肥机本身误差和变异系数,得到最优化肥排量的拟合参数。

在车载终端显示器上进行参数设定,分别输入设备信息、机车信息和施肥参数,点击系统设置中施肥标定,可以控制系统按照指定时间、指定转速进行马达转速控制,并通过编码器返回转速。施肥量则在开度一定的条件下,与马达转速成正比。

针对不同肥管,转速 10、20、30、40、50 r/min 条件开展实际测试。肥料选用磷酸二铵,进行了浅层和深层各肥管施肥误差和变异系数计算,统计结果如表 1、2 所示。

表 1 变量施肥机浅层各路排肥数据

Tab. 1 Experiment of low fertilizer data					
序号	排肥轮转速/ (r·min ⁻¹)	实际排肥 量/kg	系统排肥 量/kg	误差/ %	变异系数
1	10	0.470	0.462	1.70	0.05
2	10	1.000	0.986	1.40	0.01
3	20	1.760	1.737	1.31	0.05
4	20	0.720	0.735	-2.08	0.02
5	30	2.390	2.414	-1.00	0.03
6	30	0.970	0.954	1.65	0.01
7	40	1.190	1.212	-1.85	0.02
8	40	1.200	1.220	-1.67	0.02
9	50	1.480	1.440	2.70	0.05
10	50	1.441	1.465	-1.67	0.02

表 2 变量施肥机深层各路排肥数据

Tab. 2 Experiment of deep fertilizer data					
序号	排肥轮转速/ (r·min ⁻¹)	实际排肥 量/kg	系统排肥 量/kg	误差/ %	变异系数
1	10	0.62	0.644	3.87	0.08
2	10	0.62	0.645	4.03	0.08
3	20	1.01	1.071	6.04	0.06
4	20	1.00	1.067	6.70	0.06
5	30	1.39	1.486	6.91	0.07
6	30	1.39	1.487	6.98	0.07
7	40	1.78	1.914	7.53	0.08
8	40	1.83	1.902	3.93	0.08
9	50	2.15	2.321	7.95	0.08
10	50	2.16	2.321	7.45	0.08

试验结果表明,在排肥轮转速为 10、20、30、40、

50 r/min 条件下,浅层排肥最大误差为 2.70%,变异系数最大为 0.05;深层排肥最大误差为 7.95%,变异系数最大为 0.08,完全满足田间试验需要。

2.3 田间验证试验

为了测试验证种肥拟合减施效果,设计了 2 种施肥方式对比小区,即常规施肥 450 kg/hm²和减量 12% 施肥 396 kg/hm²,每个小区 3 个重复,同时预留了追肥所需的试验小区。图 7a、7b 分别为导航施肥和导航播种试验现场。



图 7 种肥精准拟合试验

Fig. 7 Experiment of matching fertilizer line and seed line

试验结果分别在 2 个小区以面积 1 m²小麦为一个采集单元,采集 3 组小麦穗作为测定样本,分别进行脱粒处理,分别称量每组样本千粒质量和样本总质量,并求取平均值。试验结果表明,常规施肥平均产量为 3 900 kg/hm²,减量 12% 施肥产量平均为 3 945 kg/hm²,产量基本持平,因此该系统在保证减量施肥的前提下保证了小麦不减产,基本实现了预期目标。

3 结论

(1) 设计了种行肥行精准拟合变量施肥控制系统。系统基于 GNSS 自动导航技术实现了种行肥行精准拟合与判断,试验结果表明,系统的对行误差范围在 6 cm 以内;在排肥轮转速为 10、20、30、40、50 r/min 条件下,浅层排肥最大误差为 2.70%,变异系数最大为 0.05;深层排肥最大误差为 7.95%,变异系数最大为 0.08,完全满足田间试验需要。

(2) 田间试验结果表明,在 10~20 cm 宽窄行小麦种植模式下,常规施肥 450 kg/hm²,减量 12% 施肥 396 kg/hm²,常规施肥平均产量为 3 900 kg/hm²,减量 12% 施肥平均产量为 3 945 kg/hm²,产量基本持平,实现了种肥拟合减施的预期效果。

参 考 文 献

[1] 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)

[2] 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.
YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38-48. (in Chinese)

- [3] 赵春江. 对我国未来精准农业发展的思考[J]. 农业网络信息, 2010(4): 5-8.
ZHAO Chunjiang. Strategy thinking on precision agriculture of China[J]. Agriculture Network Information, 2010(4): 5-8. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 付卫强, 孟志军, 黄文倩, 等. 基于 CAN 总线的变量施肥控制系统[J]. 农业工程学报, 2008, 24(增刊 2): 127-132.
FU Weiqiang, MENG Zhijun, HUANG Wenqian, et al. Variable rate fertilizer control system based on CAN bus[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(Supp. 2): 127-132. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 张书慧, 马成林, 吴才聪, 等. 一种精确农业自动变量施肥技术及其实施[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 129-131.
ZHANG Shuhui, MA Chenglin, WU Caicong, et al. Development and application of a variable rate fertilizer applicator for precision agriculture[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(1): 129-131. (in Chinese)
- [8] 余洪锋, 丁永前, 刘海涛, 等. 小田块变量施肥系统优化设计与应用[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 35-41.
YU Hongfeng, DING Yongqian, LIU Haitao, et al. Optimization design and application of variable rate fertilization system for small-scaled fields[J]. Transactions of CSAE, 2018, 34(3): 35-41. (in Chinese)
- [9] 赵岩, 陈学庚, 郑炫, 等. 精准对行分层施肥技术研究[J]. 绿洲农业科学与工程, 2016, 2(3): 25-29.
ZHAO Yan, CHEN Xuegeng, ZHENG Xuan, et al. Research on accuracy layered fertilization technology[J]. Oasis Agriculture Science and Engineering, 2016, 2(3): 25-29. (in Chinese)
- [10] MOLATUDI R L, MARIGA I K. The effect of maize seed size and depth of planting on seedling emergence and seedling vigour[J]. Journal of Applied Sciences Research, 2009, 5(12): 2234-2237.
- [11] 施印炎, 陈满, 汪小昆, 等. 稻麦精准变量施肥机排肥性能分析与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 97-103.
SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Analysis and experiment of fertilizing performance for precision fertilizer applicator in rice and wheat fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 97-103. (in Chinese)
- [12] 陈满, 施印炎, 汪小昆, 等. 基于光谱探测的小麦精准追肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 26-32.
CHEN Man, SHI Yinyan, WANG Xiaochan, et al. Design and experiment of variable rate fertilizer applicator based on crop canopy spectral reflectance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 26-32. (in Chinese)
- [13] 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.
- [14] 梁春英, 吕鹏, 纪建伟, 等. 基于遗传算法的电液变量施肥控制系统 PID 参数优化[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 1): 89-93.
LIANG Chunying, LÜ Peng, JI Jianwei, et al. Optimization of PID parameters for electro-hydraulic variable rate fertilization system based on genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1): 89-93. (in Chinese)
- [15] CHATTHA H S, ZAMAN Q U, CHANG Y K, et al. Variable rate spreader for real-time spot-application of granular fertilizer in wild blueberry[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 100: 70-78.
- [16] MOUAZEN A M, KAROUI R, DE BAERDEMACKER J, et al. Characterization of soil water content using measured visible and near infrared spectra[J]. Soil Science Society of American Journal, 2006, 70(4): 1295-1302.
- [17] TOLA E, KATAOKA T, BUREE M, et al. Granular fertilizer application rate control system with integrated output volume measurement[J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(4): 411-416.
- [18] 张继成. 基于处方图的变量施肥系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.
- [19] 魏学礼. 东北垄作玉米全要素变量施肥控制系统研发[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [20] 陈满, 鲁伟, 汪小昆, 等. 基于模糊 PID 的冬小麦变量追肥优化控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 71-76.
CHEN Man, LU Wei, WANG Xiaochan, et al. Design and experiment of optimization control system for variable fertilization in winter wheat field based on fuzzy PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 71-76. (in Chinese)
- [21] 冯慧敏, 高娜娜, 孟志军, 等. 基于自动导航的小麦精准对行深施追肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 60-67.
FENG Huimin, GAO Na'na, MENG Zhijun, et al. Design and experiment of deep fertilizer applicator based on autonomous navigation for precise row-following[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 60-67. (in Chinese)
- [22] 安晓飞, 付卫强, 魏学礼, 等. 基于处方图的垄作玉米四要素变量施肥机作业效果评价[J]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 66-70.
AN Xiaofei, FU Weiqiang, WEI Xueli, et al. Evaluation of four-element variable rate application of fertilization based on maps[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 66-70. (in Chinese)
- [23] 祝清震, 武广伟, 罗长海, 等. 基于姿态实时监测的多路精准排肥播种控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 155-163.
ZHU Qingzhen, WU Guangwei, LUO Changhai, et al. Design of multipath precision fertilizer and sowing control system based on attitude real time monitoring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 155-163. (in Chinese)