

变量施肥滞后时间检测与位置修正方法研究

刘 刚^{1,2} 胡 号^{1,2} 黄家运^{1,2} 张季琴^{1,2}

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;
2. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对变量施肥位置滞后问题,在已有研究的基础上,以提高变量施肥机作业精度为目标,利用压力传感器、ArduinoUNO 等设备搭建了滞后时间检测系统,并建立了落肥时间及其影响因素之间的关系模型,以该模型为数据基础提出了基于滞后距离的施肥位置修正方法。该方法利用滞后时间和作业速度计算滞后距离,当机具与网格边界距离与滞后距离相等时改变施肥状态,实现施肥位置的修正。田间试验结果表明:本文提出的滞后时间检测方法的检测精度为 84.1%;建立的转速-滞后时间模型能够准确计算滞后时间,基于滞后距离的施肥位置修正方法能够有效提高施肥位置精度,施肥位置滞后距离减小了 61.8%。

关键词: 变量施肥; 滞后时间; 位置滞后; 滞后修正

中图分类号: S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)S0-0074-07

Lag Time Detection and Position Correction Method of Variable Rate Fertilization

LIU Gang^{1,2} HU Hao^{1,2} HUANG Jiayun^{1,2} ZHANG Jiqin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The accuracy of fertilization position is an important aspect affecting the performance of variable rate of fertilization (VRF) applicator. Aiming at the problem of position lag in VRF, on the basis of existing research, with the goal of improving the operation accuracy of VRF, a lag time detection system was built by using pressure sensor, ArduinoUNO and other equipment which could detect, show and save the lag time date, and the relationship model between fertilizer dropping time and its influence factors was established. Based on the relationship model between factors, a method of fertilizing position correction based on lag distance was proposed based on the data. This method used the lag time and the operating speed to calculate the lag distance. When the distance between the machine and the grid boundary was equal to the lag distance, the fertilization state was changed to realize the correction of the fertilization position. Based on the lag time measured in the field experiment, the lag time detected under different states (static and dynamic) and different rotating speeds of the variable rate fertilizer applicator was analyzed, and the field lag correction experiment of the variable rate fertilizer applicator was carried out. Field experiment results showed that the detection accuracy of the lag time detection method proposed was not less than 84.1%; The established speed-lag time model can accurately calculate the lag time, and using the fertilization position correction method based on the model, the fertilization position correction experiment was carried out at the same vehicle speed (4.25 km/h) and different motor speeds, and the fertilization position lag distance was reduced by at least 61.8%. The method proposed can effectively improve the lag of fertilization position of VRF applicator and meet the requirements of field work.

Key words: variable rate of fertilization; lag time; position lag; lag correction

0 引言

变量施肥技术是精细农业的重要手段之一,可以实现根据每一操作单元上土壤养分、作物预计产量等因素的差异,相应调整施肥量,有效控制物质循环中养分的输入和输出^[1-2],降低农作物品质变差及化肥对环境的污染和破坏,大大提高肥料的利用率^[3-5],增加农民收入和保护农业资源^[6]。基于处方图的变量施肥技术需要根据 GNSS 设备采集的位置、车速等信息,按照处方图要求将肥料施到相应位置^[7-9]。然而,变量施肥技术普遍存在滞后时间,从而导致实际落肥点与预期落肥点之间存在滞后距离^[10-11]。滞后时间越长,滞后距离越大,因此准确检测变量施肥滞后时间,修正施肥位置,是提高变量施肥作业精度的关键之一^[12]。

国内外学者对变量施肥滞后问题做了大量研究^[13-15],其中对滞后时间的检测方式主要有通过肥料收集盒矩阵检测施肥量变化情况^[16-18]、建立简易施肥位置滞后模型及田间试验标定施肥位置滞后距离^[19-21]。通过肥料收集盒矩阵及田间试验的方式能准确计算出相应工作条件下的变量施肥滞后时间,但这种方法步骤繁琐,费时费力;通过建立简易施肥位置滞后模型的方式能便捷地计算变量施肥滞后时间,由于忽略了施肥量变化对滞后时间的影响,导致准确性较差。

针对以上问题,本文针对基于处方图的变量施肥技术,设计一套滞后时间检测系统,利用该系统能够快速、准确地获得变量施肥的滞后时间,并以某基于处方图的变量施肥机为例,检测该机滞后时间,提出基于滞后距离的施肥位置修正方法,旨在通过预发指令的方式实现对施肥位置的修正,以达到提高变量施肥位置精度的目的。

1 材料与方法

1.1 滞后时间组成

基于处方图的变量施肥机在田间工作时,首先车载计算机对 GPS 语句进行解析,获取机具的位置、速度等信息,然后车载计算机根据经纬度信息计算得到对应的处方图中的坐标,获取对应网格的信息,将对应的施肥信息转换为控制序列,车载计算机再将控制序列信息下发给其他单元,改变排肥器的转速和开度,肥料沿肥管排出,完成施肥。将这个过程中消耗的时间定义为变量施肥机的滞后时间 T_{lag} ^[12]。滞后时间组成如下^[22]:

(1)系统响应时间。主要是指从变量施肥控制系统开始工作到驱动电机达到预期转速的时间。其

中包括 GPS 设备采集信息的时间;车载计算机处理信息的时间;电机响应时间。系统响应时间主要受硬件设备性能的影响。

(2)落肥时间。落肥时间主要是指肥料从肥箱落沿肥管落到地面所经历的时间。

1.2 滞后时间检测系统

通过对变量施肥过程进行分析并开展 EDEM 仿真和室内试验,确定了排肥轮转速为变量施肥滞后时间的影响因素之一,通过建立转速-滞后时间关系模型实时计算变量施肥机的滞后时间,为计算变量施肥机的滞后距离提供有效信息。建立转速-滞后时间关系模型的前提是准确测量变量施肥滞后时间,因此,本文利用压力传感器、增量式编码器、ArduinoUNO 等设备搭建了滞后时间检测系统。滞后时间检测系统原理和实物如图 1、2 所示。滞后时间检测系统与变量施肥控制系统之间使用进程间通信方式进行信息交换,该系统利用增量式编码器监测排肥轮转速,利用压力传感器监测落肥。数据经处理之后由 ArduinoUNO 上传到车载计算机,系统根据数据判断工作状态并记录对应的系统时间,计算得到的相应时间差为变量施肥滞后时间。

1.3 基于滞后距离的施肥位置修正方法

基于滞后距离的施肥位置修正方法包含田间位置识别、滞后距离计算、处方图信息查询和机具与边界距离计算,其流程图如图 3 所示。为了减小施肥位置的滞后距离,一般是将计算出的滞后距离作为补偿对变量施肥控制系统进行修正。滞后距离计算公式为

$$L = \frac{vT_{lag}}{3.6} \quad (1)$$

式中 L ——滞后距离, m

v ——施肥机行驶速度, km/h

通过采样、化学分析等过程生成施肥处方图,处方图中不同网格包含了对应位置的施肥量、位置等信息^[23-25],变量施肥控制系统通过对处方图进行解析,将其信息保存到系统中方便查询。实际作业时,变量施肥机通过田间位置识别准确判断出机具所在位置对应的网格坐标,计算公式为

$$C = \begin{cases} \lceil (D-h)/(2h) \rceil & (D \geq h) \\ \lfloor |D-h|/(2h) \rfloor & (h > D > -h) \end{cases} \quad (2)$$

式中 C ——网格列号或者行号

D ——机具与(0,0)网格的经度方向距离或者纬度方向距离, m

h ——经度方向或者纬度方向网格尺寸的一半, m

获取对应网格的施肥信息,进而指导变量施肥

$$b = Y_1 - kX_1 \tag{4}$$

其中 $k = \frac{Y_1 - Y_2}{X_1 - X_2} \quad (X_1 \neq X_2)$

式中 k ——斜率 b ——截距

$$X = \begin{cases} X_1 & (X_3 = X_4) \\ \frac{b_2 - b_1}{k_1 - k_2} & (\text{其他}) \end{cases}$$

$$Y = k_1 X_1 + b_1 \tag{5}$$

式中 k_1 ——施肥机作业方向线方程斜率

k_2 ——AB 直线方程斜率

b_1 ——施肥机作业方向线方程截距

b_2 ——AB 直线方程截距

$X_3、X_4$ ——点 A 和点 B 的经度

2 试验

为了验证滞后时间检测方法以及基于滞后距离的施肥位置修正方法的准确性,于 2021 年 3 月 29 日—4 月 4 日在中国农业大学上庄实验站进行验证试验。

2.1 试验设备

试验设备以变量施肥机为主体,包含了由山东大华机械有限公司的大华宝来 2BMYFS-4/4-4 型玉米免耕播种施肥机改装而成的变量施肥机、GPS 设备、车载计算机、滞后时间检测设备、东方红 X754 型拖拉机,如图 5 所示。

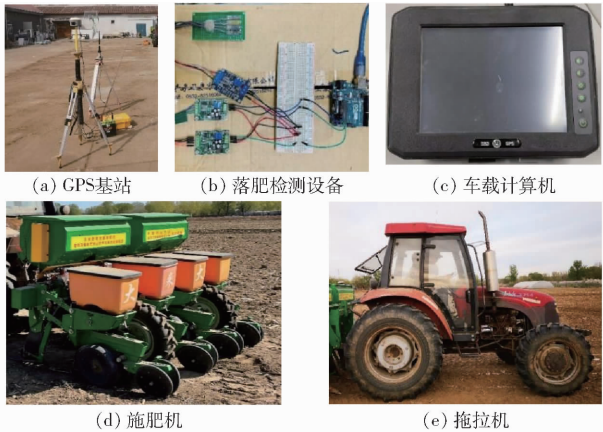


图 5 试验设备

Fig. 5 Experiment equipment

2.2 滞后时间检测试验

本文通过测量不同工作条件下的施肥位置滞后距离来计算变量施肥机的整体滞后时间作为对照组,通过对比两组试验结果,判断滞后时间检测系统的可靠性。

试验选取一块 30 m × 30 m 空地,将其划分为 10 m × 10 m 网格。施肥机以标定速度(4.25 km/h)匀速行驶,检测不同排肥轮转速下的滞后距离,并利用

式(1)计算对应滞后时间。

获取变量施肥机施肥位置滞后距离的试验过程如图 6 所示。



图 6 试验过程

Fig. 6 Experiment process

使用滞后时间检测系统获取施肥机整体滞后时间时,分为系统响应时间检测和落肥时间检测。试验以 10 r/min 为步长,在转速 10 ~ 100 r/min 范围内,改变排肥轮转速并记录相应滞后时间,每一转速条件试验 10 次。试验过程如图 7 所示。



图 7 落肥时间检测试验过程

Fig. 7 Experiment process of fertilizer dropping time

2.3 施肥位置修正试验

输入建立好的转速-滞后时间模型作为数据基础,以 10 r/min 为步长,在 10 ~ 70 r/min 范围内改变排肥轮转速,以标定车速(4.25 km/h)进行试验,测量相应转速下初始落肥点与网格边界的距离,即施肥位置滞后距离。施肥位置修正试验过程如图 8 所示。



图 8 施肥位置修正试验过程

Fig. 8 Experiment process of fertilizer position correction

2.4 试验结果分析

2.4.1 施肥位置滞后距离标定

试验以电机转速为自变量,以 10 r/min 为步长,变化范围为 10 ~ 100 r/min,其他条件不变,记录每一转速对应的施肥位置滞后距离,结果如表 1 所示。由表 1 可得 70 r/min 条件下的平均滞后距离相比于 10 r/min 条件下的平均滞后距离减小了 25%,说明了转速对滞后距离存在一定的影响。

表 1 不同转速条件下的施肥位置滞后距离

Tab.1 Lag distance of fertilization position at different rotation speeds											m
序号	转速/(r·min ⁻¹)										
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
1	3.13	2.95	2.88	2.81	2.62	2.57	2.34	2.47	2.57	2.68	
2	3.05	3.05	2.83	2.74	2.65	2.60	2.37	2.51	2.63	2.73	
3	3.18	2.87	2.92	2.77	2.67	2.59	2.29	2.50	2.55	2.71	
平均值	3.12	2.96	2.88	2.77	2.65	2.59	2.33	2.49	2.58	2.71	

表 2 系统响应时间

Tab.2 System response time											s
拖拉机 状态	转速/(r·min ⁻¹)										
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
静态	0.377	0.39	0.383	0.381	0.379	0.381	0.38	0.381	0.383	0.376	
动态	0.382	0.374	0.383	0.386	0.383	0.39	0.382	0.391	0.386	0.387	

取整体的平均值 0.383 s 作为变量施肥控制系统的系统响应时间。

2.4.3 落肥时间检测

落肥时间为电机开始响应($n \geq 2$ r/min)至肥料

2.4.2 系统响应时间检测

由于排肥器开始转动时肥料会立刻被排出,因此定义的系统响应时间为系统开始作业到电机开始响应的时间。为避免信号采集过程中噪声的影响,选择电机转速(n)大于等于 2 r/min 时为计时终点^[26]。在拖拉机静态和动态条件下,对不同电机转速分别进行了系统响应时间检测试验,试验结果如表 2 所示。由表 2 可得,电机转速和拖拉机的运动状态对系统的响应时间无明显影响,选

颗粒落到地面的时间差,试验结果如表 3 所示。由表 3 可得,70 r/min 条件下落肥时间相较于 10 r/min 条件的落肥时间减少了 30%,与田间试验测得的施肥位置滞后距离的变化趋势一致。

表 3 落肥时间

Tab.3 Fertilizer dropping time											s
序号	转速/(r·min ⁻¹)										
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
1	1.861	1.583	1.571	1.535	1.094	1.544	0.659	1.094	1.532	1.313	
2	1.751	1.639	1.531	1.645	1.529	1.469	1.641	1.530	1.639	1.417	
3	1.831	1.576	1.534	1.528	1.202	1.532	1.094	1.536	1.530	1.425	
4	1.641	1.628	1.641	1.532	1.643	1.415	1.196	1.095	1.314	1.638	
5	1.865	1.750	1.312	1.531	1.635	1.210	0.669	1.528	1.532	1.529	
6	1.862	1.634	1.643	1.096	1.420	1.426	1.424	0.983	1.313	1.534	
7	1.752	1.642	1.524	1.312	1.203	1.092	1.641	1.533	1.313	1.425	
8	1.861	1.532	1.612	1.421	1.422	1.464	1.424	1.424	1.420	1.315	
9	1.864	1.625	1.533	1.595	1.533	1.316	1.426	1.641	1.424	1.535	
10	1.643	1.635	1.745	1.640	1.420	1.318	1.202	1.314	1.422	1.426	
平均值	1.793	1.624	1.565	1.484	1.410	1.379	1.238	1.368	1.444	1.456	

为了确定滞后时间检测系统的准确性,根据式(1)和表 1 中的滞后距离数据计算得到变量施肥机田间工作时的整体滞后时间作为参照(实际值),对滞后时间检测系统测得的滞后时间平均值(检测值)进行统计分析,结果如表 4 和图 9 所示,由表 4

可知,检测值与实际值的误差在 11.7%~15.9%之间,检测精度不小于 84.1%,效果良好;由图 9 可得,检测值与实际值变化趋势一致,转速 10~70 r/min 之间,随着转速增加落肥时间逐渐减少,与室内试验结果一致;当转速大于 70 r/min 时,落肥时间出现反

表 4 施肥机整体滞后时间对比

Tab.4 Comparison of overall lag time of fertilizer applicator											
类型	转速/(r·min ⁻¹)										
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
实际值/s	2.496	2.365	2.301	2.219	2.117	2.069	1.867	1.995	2.067	2.165	
检测值/s	2.176	2.006	1.947	1.866	1.792	1.761	1.620	1.750	1.826	1.838	
误差/%	12.8	15.2	15.4	15.9	15.4	14.9	13.2	12.3	11.7	15.1	

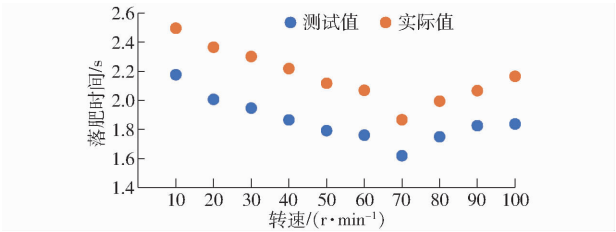


图9 电机转速和落肥时间关系

Fig. 9 Relationship between rotation speed and fertilizer dropping time

弹。针对高转速条件下落肥时间反弹的情况,经查阅文献和理论分析后确定原因:电机转速的增加导致肥料离开排肥轮的初速度增加,肥料颗粒与肥管的碰撞次数增加,导致落肥时间增加^[27]。针对检测值与实际值之间的差值,分析原因如下:测量滞后距离时是以有肥料颗粒落地为标准,使用传感器测量时存在落肥初期少量颗粒难以检测到的情况,导致检测存在偏差。

对转速 10 ~ 70 r/min 范围内的滞后时间进行统计分析,结果如图 10 所示,结果显示,电机转速和滞后时间之间的相关系数为 0.97,二者存在明显的线性关系,与室内试验的整体结果一致。

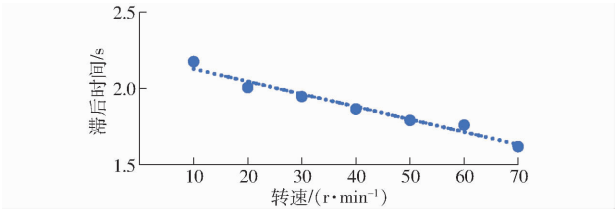


图 10 转速与滞后时间关系

Fig. 10 Relationship between speed and lag time

建立转速-滞后时间的关系模型为

$$T_{lag} = -8.3 \times 10^{-3}n + 2.2118 \quad (6)$$

以电机转速为自变量,对每个转速进行了 3 次试验,试验结果如表 5 所示。

以表 1 中的平均滞后距离为参照,对比分析滞后修正试验结果,对比数据如表 6 所示,由表 6 可得,基于滞后距离的施肥位置修正方法能够有效减小施肥位置滞后距离,将变量施肥机的位置精度至

表 5 位置修正后滞后距离

Tab.5 Hysteresis correction results								m
序号	转速/(r·min ⁻¹)							
	10	20	30	40	50	60	70	
1	-0.163	0.955	0.502	0.214	0.404	0.955	0.893	
2	0.685	1.050	0.358	-0.150	0.583	0.872	0.750	
3	0.457	1.133	0.742	0.635	0.147	1.135	0.983	
平均值	0.326	1.046	0.534	0.233	0.378	0.987	0.875	

表 6 修正试验前后滞后距离对比

Tab.6 Comparison of results before and after hysteresis correction experiment							
项目	转速/(r·min ⁻¹)						
	10	20	30	40	50	60	70
修正前滞后距离/m	3.12	2.96	2.88	2.77	2.65	2.59	2.33
修正后滞后距离/m	0.326	1.046	0.534	0.233	0.378	0.987	0.875
精度提高率/%	89.5	64.6	81.4	91.6	85.7	61.8	62.5

少提高了 61.8%。由于滞后距离是通过转速-滞后时间模型和车速计算得到,模型精度是影响施肥位置修正方法精度的主要因素。此外,田间地势不平导致施肥机不能匀速作业也会影响该方法的准确性。

3 结论

(1) 利用压力传感器、增量式编码器、ArduinoUNO 等设备搭建了滞后时间检测系统。该系统与变量施肥控制系统之间采用进程间通信的方式进行信息交换,通过记录不同工作状态对应的系统时间,实现了变量施肥滞后时间的准确检测。

(2) 提出了基于滞后距离的施肥位置修正方法,以滞后时间及车速计算的滞后距离为基础,通过计算机具与网格边界的距离,以距离补偿的方式,能够实现施肥位置的修正。

(3) 田间试验结果表明,滞后时间检测系统的精度为 84.1%;基于滞后距离的施肥位置修正方法,以转速-滞后时间为数据基础,能够将施肥位置滞后距离至少减小 61.8%,该方法有效提高了变量施肥位置精度。

参 考 文 献

[1] 赵春江,薛绪掌,王秀,等. 精准农业技术体系的研究进展与展望[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 7-12. ZHAO Chunjiang, XUE Xuzhang, WANG Xiu, et al. Advanced and prospects of precision agriculture technology system[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(4): 7-12. (in Chinese)

[2] 金继运, 白由路. 精准农业研究的回顾与展望[J]. 农业网络信息, 2004(4): 3-11. JIN Jiyun, BAI Youlu. Review and prospect of precision agriculture[J]. Agriculture Network Information, 2004(4): 3-11. (in Chinese)

[3] WESTERVELT J D, REETZ H F. GIS in site-specific agriculture[M]. Interstate Publishers, 2000.

[4] BALAFOUTIS A, BECK B, FOUNTAS S, et al. Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation, farm productivity and economics[J]. Sustainability, 2017, 9(8): 1339.

[5] KAZLAUSKAS M, BRUČIENĖ I, JASINSKAS A, et al. Comparative analysis of energy and GHG emissions using fixed and

- variable fertilization rates[J]. *Agronomy*, 2021, 11(1): 138.
- [6] KHAKBAZAN M, MOULIN A, HUANG J. Economic evaluation of variable rate nitrogen management of canola for zones based on historical yield maps and soil test recommendations[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 1–14.
- [7] 杨硕, 王秀, 翟长远, 等. 支持种肥监测的变量施肥系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(10): 145–153.
YANG Shuo, WANG Xiu, ZHAI Changyuan, et al. Design and test on variable rate fertilization system supporting seeding and fertilizing monitoring[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(10): 145–153. (in Chinese)
- [8] MCBRATNEY A, WHELAN B, ANCEV T, et al. Future directions of precision agriculture[J]. *Precision Agriculture*, 2005, 6(1): 7–23.
- [9] YANG C. A variable rate applicator for controlling rates of two liquid fertilizers[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2001, 17(3): 409–417.
- [10] HE X, DING Y, ZHANG D, 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.
- [11] SHI Yinyan, HU Zhichao, WANG Xiaochan, et al. Motion analysis and system response of fertilizer feed apparatus for paddy variable-rate fertilizer spreader[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 153: 239–247.
- [12] FULTON J P. Simulation of fixed- and variable-rate application of granular materials[J]. *Transactions of the ASAE*, 2003, 46(5): 1311.
- [13] 狄小冬. 玉米中耕变量施肥电控液压驱动系统的研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2020.
DI Xiaodong. Research on electronic control hydraulic drive system of variable fertilization in corn[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [14] ZHANG J, LIU G, HUANG J, et al. A study on the time lag and compensation of a variable-rate fertilizer applicator[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2021, 37(1): 43–52.
- [15] SHARIPOV G M, HEIB A, ESHKABILOV S L, et al. Variable rate application accuracy of a centrifugal disc spreader using ISO 11783 communication data and granule motion modeling[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 182: 106006.
- [16] FULTON J P, SHEARER S A, HIGGINS S F, et al. Rate response assessment from various granular VRT applicators[J]. *Transactions of the ASAE*, 2005, 48(6): 2095–2103.
- [17] KIM Y J, KIM H J, RYU K H, et al. Fertiliser application performance of a variable-rate pneumatic granular applicator for rice production[J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 100(4): 498–510.
- [18] JAFARI M, HEMMAT A, SADEGHI M. Development and performance assessment of a DC electric variable-rate controller for use on grain drills[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010, 73(1): 56–65.
- [19] 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 Weiqing, 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)
- [20] CHEN M, YANG Z, WANG X, et al. Response characteristics and efficiency of variable rate fertilization based on spectral reflectance[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2018, 11(6): 152–158.
- [21] 洪延宏. 基于神经网络算法的液肥喷施变量控制系统研发与应用[D]. 石河子: 石河子大学, 2020.
HONG Yanhong. Research and development and application of variable control system for liquid fertilizer spraying based on network algorithm[D]. Shihezi: Shihezi University, 2020. (in Chinese)
- [22] MALEKI M R, RAMON H, De BAERDEMAEKER J, et al. Study on the time response of a soil sensor-based variable rate granular fertiliser applicator[J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 100(2): 160–166.
- [23] 林小兰. 基于亩产潜力和目标产量的变量施肥电子处方图的设计与实现[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
LIN Xiaolan. Design and implementation of electronic prescription map for variable rate fertilization based on yield potential and target yield[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [24] 王秀, 赵春江, 孟志军, 等. 精准农业土壤采样栅格划分方法的研究[J]. *土壤学报*, 2005, 42(2): 199–205.
WANG Xiu, ZHAO Chunjiang, MENG Zhijun, et al. Field soil sampling grids for precision agriculture[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(2): 199–205. (in Chinese)
- [25] BASSO B, CAMMARANO D, FIORENTINO C, et al. Wheat yield response to spatially variable nitrogen fertilizer in Mediterranean environment[J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, 51: 65–70.
- [26] 马新明, 马兆务, 许鑫, 等. 信息农机农艺技术融合的小麦智慧生产模式研究[J]. *智慧农业(中英文)*, 2019, 1(4): 62–71.
MA Xinming, MA Zhaowu, XU Xin, et al. Developmental model of wheat smart production based on the integration of information technology, agricultural machinery and agronomy[J]. *Smart Agriculture*, 2019, 1(4): 62–71. (in Chinese)
- [27] COETZEE C J, LOMBARD S G. Discrete element method modelling of a centrifugal fertiliser spreader[J]. *Biosystems Engineering*, 2011, 109(4): 308–325.