

基于处方图的垄作玉米四要素变量施肥机作业效果评价

安晓飞^{1,2} 付卫强^{1,2} 魏学礼¹ 丛岳¹ 王培¹

(1. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097; 2. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 为了进一步提高肥料利用率, 解决黑龙江垦区垄作玉米施肥作业过程中由于颗粒肥密度不同而造成的肥料分层问题, 基于沃尔 2BJM 施肥机, 设计了一套适合垄作玉米四要素变量施肥的控制系統。系統集成了亚米级差分 GNSS 装置, 采用电液比例控制技术分别控制 4 路排肥轴转速。系統根据用户设置的目标施肥量, 实时计算液压马达的目标转速, 并同步向肥料控制器发送转速指令。控制器通过光电编码器反馈的马达转速信号, 调节比例阀开度, 一次完成氮肥、磷肥、钾肥和微肥 4 种单质肥同步变量施用。田间试验结果表明, 各路施肥管误差均小于 3.00%, 变异系数均小于 0.05; 与传统施肥机同期作业效果对比表明, 玉米株高、叶干质量、地上生物量以及 SPAD 值与传统施肥区并无明显差异, 但变量施肥减小了田块中玉米株高、叶干质量、地上生物量以及 SPAD 的空间差异性。尿素施用量由 217 kg/hm² 减少到了 150 kg/hm², 减少了 30.88%; 二胺由 232 kg/hm² 减少到了 200 kg/hm², 减少了 13.79%; 钾肥由原来的 79 kg/hm² 增加到了 108 kg/hm², 增加了 36.70%。肥料的投入成本减少了 160 元/hm², 变量施肥测产数据为 12 200 kg/hm², 产量增加了 217 kg/hm², 较传统施肥区增产 1.78%, 收入增加 508 元/hm²。综合考虑系統误差、玉米生长指标和最终产量数据, 基于处方图的垄作玉米四要素变量施肥机满足黑龙江垦区玉米施肥作业实际要求, 有效解决了肥料分层问题, 显著提高了肥料利用率。

关键词: 变量施肥; 垄作玉米; 精准农业; 控制系统; 效果评价

中图分类号: O657.3; S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)S0-0066-05

Evaluation of Four-element Variable Rate Application of Fertilization Based on Maps

AN Xiaofei^{1,2} FU Weiqiang^{1,2} WEI Xueli¹ CONG Yue¹ WANG Pei¹

(1. Beijing Research Center of Information Technology for Agriculture, Beijing 100097, China

2. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: In order to solve the fertilizer layered problem caused by the different density of mixed pellet fertilizer in Heilongjiang province, a four-element variable rate fertilization control system was developed based on 2BJM fertilizer machinery. According to the four different speeds of fertilizer feed shafts, the control system could work on either setting value or fertilizer maps condition by electro-hydraulic proportional control technology. It also integrated a submeter-scale differential GNSS device. The system could calculate the target speed of the hydraulic motor in real time according to the target value, and send the speed instruction to the fertilizer controller synchronously. Once the system received motor speed signal, the opening of proportional valve could be adjusted automatically. And then the four-element synchronization variable fertilization (nitrogen, phosphorus, potassium, and micronutrient fertilizer) could be carried out. The results of field experiment showed that the errors of the fertilizer tubes were less than 3.0%, and the variation coefficient was less than 0.05. Compared with the traditional machinery area, though the maize growth indexes of height, weight, aboveground biomass and SPAD did not increase significantly, all of these variable coefficients reduced obviously. The nitrogen and phosphorus fertilization contents reduced from 217 kg/hm², 232 kg/hm² to 150 kg/hm², 200 kg/hm² respectively. The potassium fertilization content increased from 79 kg/hm² to 108 kg/hm². The final yield data was

收稿日期: 2017-07-10 修回日期: 2017-11-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200600-2016YFD0200605)、农业部 948 项目(2016-X26)和山东省重点研发计划项目(2016CYJS03A01-1)

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@nercita.org.cn

通信作者: 付卫强(1978—),男,副研究员,主要从事农机智能装备研究,E-mail: fuwq@nercita.org.cn

12 200 kg/hm², increasing by 1.81%. All the experiments showed that the four-element variable rate fertilization control system could solve the fertilizer layered problem and satisfy the need in practice.

Key words: variable rate fertilization; ridge maize; precision agriculture; control system; effective evaluation

引言

变量施肥技术是根据土壤养分和作物长势的空间变异,决策生成变量施肥处方图,或基于实时传感器获取土壤和作物信息,利用农田精准变量施肥作业机械,在田间因地制宜、定位投入、变量实施,是精准农业生产中的关键步骤之一^[1-4]。

我国化学肥料过量施用严重,引起了环境污染和农产品质量安全等重大问题。目前氮肥、磷肥和钾肥利用率分别只有33%、24%和42%^[5]。国内传统人工施肥方式仍然占主导地位,化肥撒施、表施现象比较普遍,机械施肥仅占主要农作物种植面积的30%左右^[5]。国内外学者对变量施肥技术进行了广泛的研究,主要分为两类:基于处方图的变量施肥技术研究^[6-10];基于传感器的变量施肥技术研究^[11-16]。黑龙江垦区采用先拌肥、后施肥的统一施肥方式,由于肥料颗粒密度不同,在施肥过程中造成了肥料在肥箱中出现分层现象,进而进入到土壤中出现肥料分层的现象,而目前的研究都集中在变量施肥技术的研究,无法解决肥料分层的问题,进一步导致了施肥效果不理想,肥料利用率不高。

本文采用基于处方图的垄作玉米四要素变量施肥技术,解决由于颗粒肥密度不同而造成的肥料分层问题,并对垄作玉米的作业效果进行评价。

1 材料与方

1.1 试验条件和方

本研究选择黑龙江农垦赵光农场某地块作为试验区域,试验期间为2016年4月15日—5月4日。赵光农场海拔高度在240~330 m之间,地处中高纬度,属寒温带季风气候,年平均气温0.5℃,无霜期120 d左右。年降水量570 mm,年平均日照2 700 h以上。试验区范围为:东经126.72°~126.75°,北纬48.02°~48.04°,高程最小值为301.564 m,最大值为317.142 m,高差15.578 m,总体地势为西南高、东北低。

玉米种植模式采用110 cm大垄、垄上行距40 cm、垄间行距65 cm的栽培模式。垄上双苗带播种,施肥量270~300 kg/hm²,氮、磷、钾质量比例为1.6:1:(0.5~0.8)。选用的玉米品种为德美亚1号,在试验区生长日数为105~110 d,活动积温2 100℃。

施肥方式选用基于处方图的四要素变量施肥和传统混合肥施肥2种方式。其中四要素变量施肥装备采用自主设计的四要素变量施肥控制系统,传统混合肥施肥采用外槽轮式施肥机。施肥深度统一为种下方5 cm处。33.33 hm²地块中,6.00 hm²采用四要素变量施肥机作业,剩余27.33 hm²采用传统施肥机作业,其余田间管理作业方式完全一致。图1是试验区域分布图。

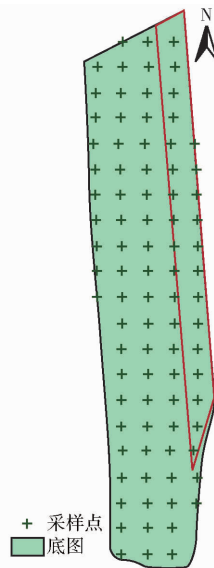


图1 试验区域分布图

Fig. 1 Experiment area

1.2 四要素变量施肥控制系统

图2是四要素变量施肥机控制系统总体结构图。采用电液比例控制技术分别控制4路排肥轴的转速,既可以按照用户设定量同步变量施用,也可以按照施肥处方图作业。系统由车载终端、电控部分、液压部分和机械传动共4部分组成。根据用户设置的目标施肥量,实时计算液压马达目标转速,并同步向肥料控制器发送转速指令。控制器通过光电编码器反馈的马达转速信号,调节比例阀的开度,一次完成氮肥、磷肥、钾肥和微肥4种单质肥的同步变量施用。

四要素变量施肥机工作电压为12 V,工作幅宽为6.6 m,垄作行宽1.1 m,垄行整数倍;氮肥、磷肥、钾肥、微肥肥箱容积分别为643、425、326、210 L,基本按照垦区肥料推荐比例设置。系统通过三点悬挂方式与拖拉机连接,配套功率为119~14 kW,作业速度可以达到6~15 km/h,生产效率可以达到3.9~9.9 hm²/h。液压马达与排肥轴间通过链条传

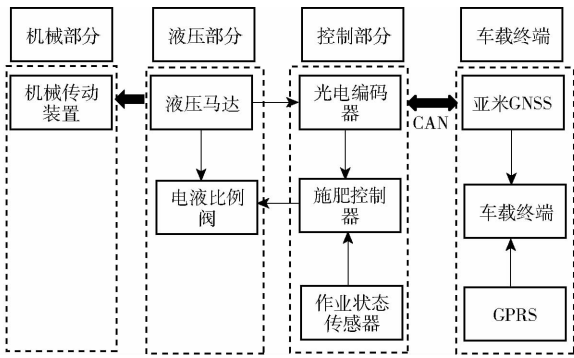


图2 四要素变量施肥控制系统总体结构

Fig. 2 Overall structure of VRF

动,采用电液比例阀组控制液压马达转速控制排肥槽轮转速实现变量施肥。图3是液压马达驱动装置。

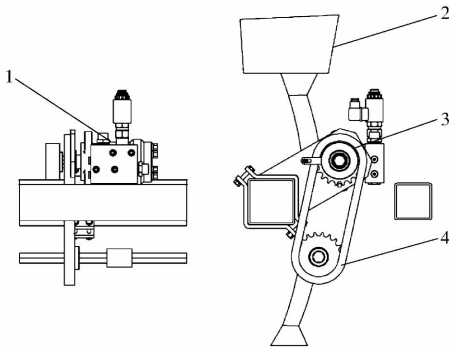


图3 液压马达驱动装置

Fig. 3 Hydraulic motor driving device

1. 阀块 2. 肥箱 3. 马达 4. 排肥轴

1.3 评价指标

本研究的目的是对基于处方图的四要素变量施肥作业效果开展评价,主要包括四要素变量施肥机本身误差的分析、变量施肥作业对玉米生长指标的影响以及对玉米产量的影响。据此,评价指标主要计算公式为:

每次试验的排肥量均值为 \bar{x} ,则有

$$\bar{x} = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} x_i \quad (1)$$

式中 x_i ——每次试验的排肥量

排肥量标准差为 δ ,则有

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{24} (x_i - \bar{x})^2}{23}} \quad (2)$$

排肥量变异系数为 C_v ,则有

$$C_v = \frac{\delta}{\bar{x}} \quad (3)$$

2 结果与讨论

2.1 施肥处方图的生成

四要素变量施肥机控制系统的核心在于基于处

方图的变量施肥算法。根据农业部测土配方施肥管理中的养分平衡法^[5],对赵光农场 33.33 hm² 地块进行了采样、化验和处方图生成。按照网格取样法(60 m × 60 m)共取土壤样品 87 个,同时用 GPS 进行定位。土壤经风干后分别测定了土壤有机质、全氮、碱解氮、硝态氮、铵态氮,有效磷、速效钾含量。在获得了土壤供肥水平的基础上,并获得玉米合理养分用量,分别获得 N、P、K 的预期施用量,进而生成变量施肥处方图,由于该地块并不缺少微肥,因此没有生成微肥处方图。肥料需要量计算公式为

$$W = \frac{(U - N_s)R}{C} \quad (4)$$

式中 W ——肥料需要量,kg/hm²

U ——一季作物需要吸收的总养分,kg

N_s ——土壤供肥量,kg

C ——肥料养分质量分数,%

R ——肥料当季利用率,%

每生产 100 kg 吸收纯氮(N)2.85 kg、磷(P₂O₅)0.7 kg、钾(K₂O)2.2 kg,目标产量 12 000 kg/hm² 计算,每公顷地耕作层所能提供的土壤速效养分系数按照 0.15 换算,有效养分修正系数分别为 0.65、0.50 和 0.80。肥料中有效成分质量分数分别为 40%、30% 和 60%,N、P、K 需肥量计算公式为

$$N = \frac{2.85 \times 8 - 0.15 \times 0.65 y_n}{0.4} \quad (5)$$

式中 N ——氮肥供应量,kg

y_n ——土壤中碱解氮含量(质量比),mg/kg

$$P = \frac{8 \times 0.7 - 0.15 \times 0.50 y_p}{0.3} \quad (6)$$

式中 P ——磷肥供应量,kg

y_p ——土壤中有效磷含量(质量比),mg/kg

$$K = \frac{8 \times 2.2 - 0.15 \times 0.80 y_k}{0.6} \quad (7)$$

式中 K ——钾肥供应量,kg

y_k ——土壤中有效钾含量(质量比),mg/kg

2.2 四要素变量施肥机误差分析

基于处方图(图4)的变量施肥控制系统由 DGPS、轮速检测模块、机载控制终端、变量施肥控制器、电液比例液压系统、排肥执行机构等多个部分组成。每一个环节的误差都会影响到整个系统的精度。在黑龙江农垦赵光农场进行了四要素变量施肥机田间标定和验证试验。氮肥、磷肥、钾肥分别使用尿素、磷酸二铵和氯化钾。由于试验地块不缺少微肥,因此试验中微肥肥箱也加满尿素代替微肥进行测试。试验结果如表1所示,结果表明,在排肥轮转速 10、30、50 r/min 条件下,氮肥、磷肥、钾肥和微肥

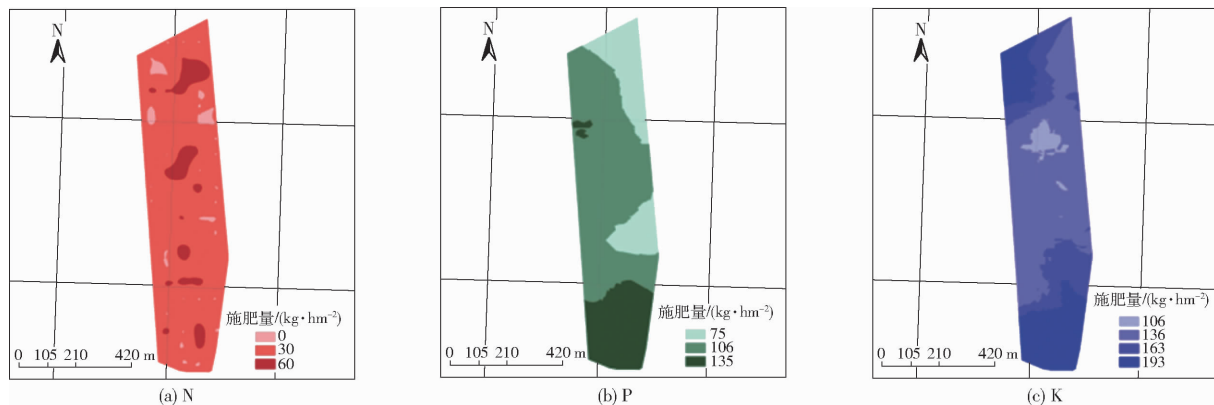


图4 变量施肥处方图

Fig. 4 Variable rate fertilizer maps

排肥最大误差分别为 3.00%、2.86%、2.20% 和 -2.00%，四要素变量施肥机整体误差小于 3.00%，变异系数小于 0.05。

表1 四要素变量施肥机各路排肥数据

Tab.1 Fertilizing data of VRF

序号	肥料	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	N	10	1.00	0.97	3.00	0.03
2	P	10	1.40	1.39	0.71	0.05
3	K	10	5.00	4.71	1.80	0.05
4	N	10	1.00	0.98	2.00	0.04
5	N	30	1.00	1.00	0.00	0.04
6	P	30	1.40	1.36	2.86	0.04
7	K	30	3.60	3.54	1.67	0.03
8	N	30	1.00	1.02	-2.00	0.04
9	N	50	1.00	1.00	0.00	0.04
10	P	50	1.40	1.34	1.43	0.04
11	K	50	5.00	4.89	2.20	0.04
12	N	50	1.00	1.02	-2.00	0.03

2.3 变量施肥作业对玉米生长指标的影响

在玉米生育期对玉米的生长情况进行了采样。变量施肥与常规施肥的面积比为 1:5，因此采样点数量也按照 1:5 进行布置，采样后检测数据包括玉米株高、叶面积、叶干质量、株干质量、地上生物量和 SPAD 值，采样测量结果如表 2 所示。采用变量施肥与常规施肥相比，玉米的株高、叶面积、叶干质量、株干质量、地上生物量以及 SPAD 值 F 检验值分别为 0.04、5.04、0.15、1.21、0.88、4.34，均小于临界值，在 0.05 水平下，均无显著性差异。但是明显减小了田块中玉米株高、叶干质量、地上生物量以及 SPAD 值的空间差异性。变量施肥技术对玉米的生长指标虽然没有数值的显著变化，但是降低了玉米生长空间变异性。

2.4 四要素变量施肥作业对玉米产量的影响

在玉米的成熟期间，再次进行采样测产，每个样

表2 采样样本统计

Tab.2 Statistics of crop samples

模式	株高/ cm	总叶面积/ (m ² ·hm ⁻²)	叶干质量/ (kg·hm ⁻²)	株干质量/ (kg·hm ⁻²)	地上生物量/ (kg·hm ⁻²)	SPAD 值
变量	230 ± 5.6	43 854 ± 416	2 732 ± 99	8 788 ± 190	11 520 ± 259	54 ± 0.97
常规	231 ± 6.1	45 207 ± 957	2 698 ± 114	8 526 ± 367	11 224 ± 481	56 ± 1.35

点 2 株玉米，折合成玉米的产量。根据当年肥料价格获得变量施肥效果数据，如表 3 所示。尿素按零售 1 800 元/t；二胺 4 300 元/t；钾肥 3 300 元/t；玉米按 1.00 元/kg 计算。在变量施肥作业中，氮肥用量减少，尿素由 217 kg/hm² 减少到 150 kg/hm²，减少 30.88%；二胺由 232 kg/hm² 减少到 200 kg/hm²，减少 13.79%；钾肥由原来的 79 kg/hm² 增加到 108 kg/hm²，增加 36.70%。尽管由于该地块 K 肥含量较低，增加了 K 肥的施用量，但整体上肥料的投入成本减少 160 元/hm²，产量增加 217 kg/hm²，收入增加 508 元/hm²。

从经济角度分析，采用变量施肥技术实现了 N、P 用量的显著降低，尤其是 N 肥的使用量，可以降低 30% 以上；从产投比上来对比分析，虽然只有 1.78% 的增产，但这是在 N、P、K 用量都减少的前提下获得，收入增加 508 元/hm²，效果明显。

表3 变量施肥效果

Tab.3 Effective of VRF

模式	面积/ hm ²	施肥量/ (kg·hm ⁻²)			成本/ (元·hm ⁻²)	产量/ (kg·hm ⁻²)	收益/ (元·hm ⁻²)
		尿素	二胺	钾肥			
变量	6	150	200	108	1 489	12 200	18 032
常规	31	217	232	79	1 649	11 983	17 524

3 结论

(1) 开发的四要素变量施肥控制系统可实现氮

肥、磷肥、钾肥和微肥4种单质肥同步变量施用,田间试验结果表明,各路施肥管误差均小于3.0%,变异系数均小于0.05。

(2)采用基于处方图的垄作玉米四要素变量施肥技术装备可显著降低N肥料使用量,尿素施用量由

217 kg/hm²减少到150 kg/hm²,减少30.88%;二胺由232 kg/hm²减少到200 kg/hm²,减少13.79%;钾肥由原来的79 kg/hm²增加到108 kg/hm²,增加36.70%。肥料的投入成本减少160元/hm²,解决了肥料分层问题,并实现增产1.78%,完全满足生产实际需要。

参 考 文 献

- 汪懋华. “精细农业”发展与工程技术创新[J]. 农业工程学报, 1999, 15(1): 1-8.
WANG Maohua. Development of precision agriculture and innovation of engineering technologies [J]. Transactions of CSAE, 1999, 15(1): 1-8. (in Chinese)
- 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)
- 王永生, 陈静, 陶欢, 等. 精准农业技术对生态环境的影响评价研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(4): 73-78.
WANG Yongsheng, CHEN Jing, TAO Huan, et al. Research progress on impact evaluation of precision agriculture technology on ecological environment [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2016, 18(4): 73-78. (in Chinese)
- 张书慧, 马成林, 李伟, 等. 变量施肥对玉米产量及土壤养分影响的试验[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8): 64-67.
ZHANG Shuhui, MA Chenglin, LI Wei, et al. Experimental study on the influence of variable rate fertilization on maize yield and soil nutrients [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(8): 64-67. (in Chinese)
- 吴良泉, 武良, 崔振岭, 等. 中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 802-817.
WU Liangquan, WU Liang, CUI Zhenling, et al. Basic NPK fertilizer recommendation and fertilizer for mulla for maize production regions in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(4): 802-817. (in Chinese)
- 张睿, 王秀, 赵春江, 等. 链条输送式变量施肥抛撒机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 20-25.
ZHANG Rui, WANG Xiu, ZHAO Chunjiang, et al. Design and experiment of variable rate fertilizer spreader with conveyor chain [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 20-25. (in Chinese)
- 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.
- 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)
- 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. 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)
- 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)
- 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.
- TONY E. GIYOUNG K. Development of a uniformity controlled granular fertilizer spreader [C] // ASABE Annual International Meeting. Portland, Oregon, 2006: 9-12.
- MALEKI M R, RAMON H, DE BAERDEMACKER J, et al. A study on the time response of a soil sensor-based variable rate granular fertilizer applicator [J]. Biosystems Engineering, 2008, 100(2): 160-166.
- MOUAZEN A M, KAROU I, 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.
- 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.
- JAFARI M, HERMMAT 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.