

# 深施型液态施肥装置的设计与试验<sup>\*</sup>

王金峰 王金武 葛宜元

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

**【摘要】** 在分析液态肥深施特点的基础上, 针对深施过程中人工开沟、覆埋难度大的问题, 设计了一种可深施液态肥的装置。对此装置的施肥性能进行了二次旋转正交试验, 利用 Design-Expert 6.0.1 软件分析, 获得了液泵压力、喷口直径、土槽台车前进速度和截止阀开度之间交互作用对施肥损失率的影响。最终确定了液态施肥装置的最佳工作参数为: 液泵压力 0.2 MPa、喷肥针喷口直径 3 mm、土槽台车前进速度 0.975 m/s 和截止阀开度 60%, 此时施肥损失率为 2.8%。根据最佳工作参数进行了验证试验, 结果表明最佳工作参数组合得到的施肥量能满足设计要求, 且施肥损失率最小。

**关键词:** 液态肥 施肥量 损失率 响应曲面分析 设计 试验

中图分类号: S224.21

文献标识码: A

## Design and Experiment on Liquid Fertilizer Device of Deep-fertilization

Wang Jinfeng Wang Jinwu Ge Yiyuan

(Engineering College, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

### Abstract

Based on the analysis of liquid fertilizer deep application characteristics, against the problem of the artificial ditching and hard burying during the process of fertilizer deep application, a kind of device which can apply liquid fertilizer deeply was designed. Quadratic rotation orthogonal experiment was conducted to test the fertilization performance of this device, Design-Expert 6.0.1 software was used to analyze, then, the influence of interaction of pump pressure, nozzle diameter, the forward speed of soil-bin trolley and the closing valve opening to fertilization loss rate were obtained. Ultimately, the optimum performance parameters of liquid fertilizer device are ascertained: the pressure of liquid pump is 0.2 MPa, the nozzle diameter of spraying-fertilizer needle is 3 mm, the forward speed of soil-bin trolley is 0.975 m/s, the opening of the closing valve is 60% and fertilization loss rate is 2.8%. With the optimum performance parameters of liquid fertilizer device, the verification experiment result shows that the obtained fertilizer amount from the optimum combination of parameters can meet the design requirement, and the fertilizer loss rate is the least.

**Key words** Liquid fertilizer, Fertilization, Loss rate, Response surface analysis, Design, Experiment

### 引言

多年来,我国农业生产一直在春播和中耕环节中撒施固态化肥以解决土壤肥力不足的问题。这种

施肥方式不仅易使化肥挥发和淋失,污染环境,而且消耗化肥量大,提高作业成本,肥效利用率只在30%左右<sup>[1]</sup>。中国农科院土肥研究所曾做过同位素跟踪试验,试验将碳酸氢铵和尿素深施到地表以

收稿日期: 2008-05-23 修回日期: 2008-06-23

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(50875043)

作者简介: 王金峰, 博士生, 主要从事智能化农业机械研究, E-mail: jinfengw1981@163.com

通讯作者: 王金武, 教授, 博士生导师, 主要从事田间机械和机械可靠性研究, E-mail: jinwu@163.com

下 60~100 mm 的土层中,其氮的利用率可以达到 58% 和 50%,而采用表面撒施的施肥方式,其氮的利用率仅为 27% 和 37%<sup>[2-3]</sup>。大面积应用化肥深施技术,氮素化肥平均利用率可由 30% 提高到 40% 以上,磷素化肥和钾素化肥平均利用率也有所提高<sup>[4-6]</sup>。与表面撒施固态化肥相比,深施液态肥不仅可以减少化肥挥发和风蚀的损失,扩大土壤肥效区域,促进作物吸收,而且使化肥利用率从 30% 提高到 60%,化肥使用量节约 1/3~1/2<sup>[7]</sup>。

目前,液态肥在国外已得到了较为广泛的应用。在我国,液态肥的应用也取得了一些进展,特别是液氮直接施用,已被农业部列为推广试验项目,分别在新疆和北京等地进行试点示范<sup>[8]</sup>。由于深施液态肥过程人工开沟、覆埋困难很大,只有借助施肥机具才能付诸实现<sup>[9]</sup>,因此深施型液态施肥装置的研究具有现实意义,也是解决我国施肥问题的主要途径。为此,本文设计深施型液态施肥装置,以期对液态施肥机具的研制提供依据<sup>[10-12]</sup>。

## 1 试验台结构及工作流程

液态施肥装置试验台包括机械传动装置和液态肥供给装置,主要由变频器、调速电动机、液箱、液泵、减速装置、喷液自控阀、执行机构、喷肥针和土槽台车等部件组成,结构如图 1 所示。

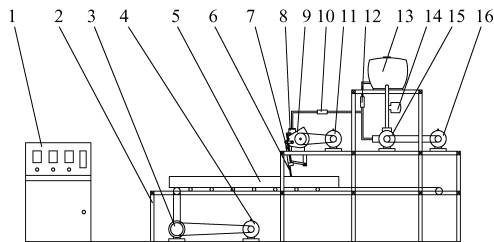


图 1 液态施肥装置试验台结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of liquid fertilization device platform

1. 变频器 2. 试验台架 3,9. 减速装置 4,11,16. 调速电动机  
5. 土槽台车 6. 喷肥针 7. 执行机构 8. 喷液自控阀 10. 过滤器  
12. 截止阀 13. 液箱 14. 过滤器 15. 液泵

试验台安装 3 台调速电动机。调速电动机 4 经减速装置 3 控制土槽台车在试验台架的滑道上左右移动。调速电动机 11 经减速装置 9 将动力传给执行机构和喷液自控阀。喷肥针配装在执行机构的连杆上,执行机构带动喷肥针运动。喷液自控阀通过凸轮运动保证喷肥针入土施肥,离土时停止施肥。液箱固定在试验台架上,在液箱与液泵之间连接过滤器,从液泵口出来的高压液态肥经过 2 条支路,一条通过截止阀回到液箱,另一条经过过滤器和喷液自控阀后直接从喷肥针的喷口喷出。

工作时,调节变频器,使土槽台车的移动与执行

机构运动符合规定要求,液泵在稳定的压力下工作。土槽台车从左到右驶入试验区,执行机构带动喷肥针插入土槽台车盛装的土壤中,与此同时喷液自控阀将具有适当压力的液态肥配送到喷肥针内腔,由喷肥针的喷口喷出注入土槽台车盛装的土壤内;土槽台车继续前进,喷液自控阀停止向喷肥针配送液态肥,喷肥针停止喷施液态肥,此时执行机构带动喷肥针从土壤中退出,完成一次液态肥喷施作业。当土槽台车驶出试验测区时,停止调速电动机 4、11、16。经过 1 min 后,改变调速电动机 4 的转动方向,使土槽台车驶回测区左侧,停止调速电动机 4。1 min 后改变调速电动机 4 转动方向,同时启动调速电动机 11、16,继续工作,如此重复<sup>[13]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验参数

为满足中耕追肥施肥量为 30 mL/次的作业要求,经预备试验,确定试验装置的各项参数范围为:液泵压力 0.1~0.3 MPa,喷口直径 1~5 mm,土槽台车前进速度 0.3~1.5 m/s,截止阀开度 20%~100%。

### 2.2 评价指标

施肥量和液态肥在土壤中的扩散程度影响施肥作业质量。因此,液态施肥装置施肥作业质量评价指标确定为施肥量和施肥损失率。

### 2.3 试验方法

#### 2.3.1 施肥量的测定

将土槽台车移到试验测区左侧,停止调速电动机 4,而液态施肥装置处于工作状态。喷肥针将液态肥喷施在水筒中。当喷肥针喷施 10 次时,用 100 mL 的量筒测量水筒中液态肥的容积,取平均值后,记录数据。

#### 2.3.2 损失率的测定

使土槽台车和液态施肥装置均处于正常工作状态,当土槽台车经过 10 m 测区时,执行机构带动喷肥针深施液态肥。当喷肥针入土时,液态肥会喷施在土槽台车盛装的土壤中,并形成圆柱形的肥效区域。当喷肥针离土时,管路中的液态肥会洒落在土槽台车盛装土壤的表面,造成施肥量的损失。当喷肥针喷施 10 次时,停止调速电动机 4 和调速电动机 11。测取肥效区域中土壤质量,计算施肥损失率。施肥损失率计算公式为

$$A = \left[ 1 - \frac{1}{10Q} \sum_{i=1}^{10} (B_i - C_i) \right] \times 100\% \quad (1)$$

式中  $B_i$ ——喷施  $i$  次后肥效区域中土壤质量,kg  
 $C_i$ ——喷施  $i$  次前肥效区域中土壤质量,kg

Q—10次施肥量的平均值,kg

### 2.3.3 多因子试验设计

本试验采用软件 Design-Expert 6.0.1 进行四因子二次正交旋转试验,以施肥量和施肥损失率为性能指标。试验因子及水平编码见表 1。根据编码表,设计二次正交旋转试验方案,试验方案及结果如表 2 所示。

表 1 因子水平编码

Tab.1 Code table of factor level

编码值	液泵压力	喷口直径	机器前进	截止阀
	/MPa	/mm	速度/m·s <sup>-1</sup>	开度/%
上星号臂(2)	0.30	5	1.5	100
上水平(1)	0.25	4	1.2	80
零水平(0)	0.20	3	0.9	60
下水平(-1)	0.15	2	0.6	40
下星号臂(-2)	0.10	1	0.3	20

表 2 二次正交旋转试验方案及试验数据

Tab.2 Experimental scheme and experimental data of quadratic orthogonal rotary

试验 序号	因子				性能指标	
	液泵压 力 $x_1$	喷口直 径 $x_2$	机器前进 速度 $x_3$	截止阀 开度 $x_4$	施肥量 $y_1$ /mL·次 <sup>-1</sup>	施肥损失 率 $y_2$ /%
1	1	1	1	1	51.5	5.8
2	1	1	1	-1	28.0	3.4
3	1	1	-1	1	66.5	7.3
4	1	1	-1	-1	46.0	5.2
5	1	-1	1	1	29.2	3.5
6	1	-1	1	-1	21.5	2.8
7	1	-1	-1	1	40.1	4.6
8	1	-1	-1	-1	25.5	3.2
9	-1	1	1	1	25.0	3.1
10	-1	1	1	-1	14.1	2.0
11	-1	1	-1	1	38.5	4.5
12	-1	1	-1	-1	28.0	3.4
13	-1	-1	1	1	14.1	2.0
14	-1	-1	1	-1	6.0	1.2
15	-1	-1	-1	1	24.0	3.0
16	-1	-1	-1	-1	13.5	2.0
17	2	0	0	0	45.1	5.1
18	-2	0	0	0	21.5	2.8
19	0	2	0	0	45.1	5.1
20	0	-2	0	0	17.5	2.4
21	0	0	2	0	18.5	2.5
22	0	0	-2	0	54.0	6.0
23	0	0	0	2	39.0	4.5
24	0	0	0	-2	7.0	1.3
25	0	0	0	0	32.5	2.9
26	0	0	0	0	31.5	2.8
27	0	0	0	0	30.0	2.6

## 3 结果与分析

### 3.1 施肥量

根据表 2 的试验数据,应用 Design-Expert 6.0.1 软件得出施肥量的方差分析结果如表 3 所示。影响施肥量的 4 个因子编码值与性能指标的关系为

$$y_1 = 31.08333 + 8.01250x_1 + 8.69583x_2 - 6.82083x_3 + 7.09583x_4 + 1.35729x_2^2 - 2.58021x_4^2 \quad (2)$$

表 3 各因子对施肥量影响的方差分析

Tab.3 Variance analysis table of influence of each factor to fertilization

来源	平方和	自由度	均方和	F 值	显著性
$x_1$	1536.00	1	1536.00	118.38	<0.0001
$x_2$	1820.04	1	1820.04	140.38	<0.0001
$x_3$	1120.67	1	1120.67	86.37	<0.0001
$x_4$	1024.17	1	1024.17	92.81	<0.0001
$x_1^2$	0.01	1	0.01	0.00107	0.9742
$x_2^2$	58.68	1	58.68	4.52	0.0455
$x_3^2$	17.01	1	17.01	1.31	0.2650
$x_4^2$	213.56	1	213.56	16.40	0.0006
$x_1x_2$	49.00	1	49.00	3.78	0.0655
$x_1x_3$	0.56	1	0.56	0.04	0.8371
$x_1x_4$	42.25	1	42.25	3.26	0.0855
$x_2x_3$	49.00	1	49.00	3.78	0.0655
$x_2x_4$	39.06	1	39.06	3.01	0.0974
$x_3x_4$	2.25	1	2.25	0.17	0.6813
误差	272.48	21			
总和	6424.74	35			

从表 3 方差分析结果可知,因子  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  和  $x_4$  极显著,因子  $x_2^2$  和  $x_4^2$  在  $\alpha=0.05$  时显著,其他因子不显著。由分析可知,各因子对施肥量影响的显著性顺序从大到小依次为喷口直径、液泵压力、截止阀开度和土槽台车前进速度。

### 3.2 施肥损失率

同样,可得出施肥损失率的方差分析结果如表 4 所示。影响施肥损失率的 4 个因子编码值与性能指标的关系为

$$y_2 = 3.01667 - 0.66667x_1 - 0.79167x_2 + 0.72500x_3 + 0.65833x_4 + 0.24167x_1^2 + 0.19167x_2^2 + 0.31667x_3^2 + 0.23750x_1x_4 \quad (3)$$

从表 4 方差分析结果可知,因子  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  和  $x_4$  极显著,因子  $x_1^2$ 、 $x_2^2$ 、 $x_3^2$  和  $x_1x_4$  在  $\alpha=0.05$  时

显著,其他因子不显著。各因子对施肥损失率影响的显著性顺序从大到小依次为喷口直径、土槽台车前进速度、液泵压力和截止阀开度。

表 4 各因子对损失率影响的方差分析

Tab.4 Variance analysis table of influence of each factor to loss rate

来源	平方和	自由度	均方和	F 值	显著性
$x_1$	10.67	1	10.67	64.69	<0.000 1
$x_2$	15.04	1	15.04	91.23	<0.000 1
$x_3$	12.62	1	12.62	76.51	<0.000 1
$x_4$	10.40	1	10.40	63.09	<0.000 1
$x_1^2$	1.87	1	1.87	11.33	0.002 9
$x_2^2$	1.18	1	1.18	7.13	0.014 3
$x_3^2$	3.21	1	3.21	19.46	0.000 2
$x_4^2$	0.01	1	0.01	0.08	0.774 5
$x_1x_2$	0.16	1	0.16	0.97	0.335 8
$x_1x_3$	0.04	1	0.04	0.24	0.627 4
$x_1x_4$	0.90	1	0.90	5.47	0.029 3
$x_2x_3$	0.20	1	0.20	1.23	0.280 3
$x_2x_4$	0.01	1	0.01	0.06	0.807 9
$x_3x_4$	0.16	1	0.16	0.97	0.335 8
误差	3.46	21			
总和	59.93	35			

### 3.3 施肥损失率响应曲面分析

根据中耕作物需肥量的要求,施肥量的范围确定为 26~34 mL/次。在此范围内,施肥损失率越小越好。因此,应用响应曲面法分析各因子对施肥损失率的影响。将其中 2 个因子固定在零水平,考察其他 2 个因子对施肥损失率的影响。

#### 3.3.1 液泵压力和喷口直径

固定土槽台车前进速度为 0.9 m/s,截止阀开度为 60%,得

$$y_2 = 3.016 67 - 0.666 67x_1 - 0.791 67x_2 + 0.241 67x_1^2 + 0.191 67x_2^2 + 0.100 00x_1x_2 \quad (4)$$

性能指标  $y_2$  的最小值为 2.1%,在试验水平下喷口直径对施肥损失率的影响要比液泵压力显著。

#### 3.3.2 液泵压力和土槽台车前进速度

固定喷口直径为 3 mm,截止阀开度为 60%,得

$$y_2 = 3.016 67 - 0.666 67x_1 + 0.725 00x_3 + 0.241 67x_1^2 + 0.316 67x_3^2 - 0.050 00x_1x_3 \quad (5)$$

性能指标  $y_2$  的最小值为 2.0%,在试验水平下土槽台车前进速度对施肥损失率的影响要比液泵压力显著。

#### 3.3.3 液泵压力和截止阀开度

固定喷口直径为 3 mm,土槽台车前进速度为 0.9 m/s,得

$$y_2 = 3.016 67 - 0.666 67x_1 + 0.658 33x_4 + 0.241 67x_1^2 + 0.020 83x_4^2 + 0.237 50x_1x_4 \quad (6)$$

由图 2 可知,性能指标  $y_2$  的最小值为 2.1%。响应曲面沿  $x_1$  方向变化较快,而沿  $x_4$  方向变化较慢。在试验水平下液泵压力对施肥损失率的影响要比截止阀开度显著。

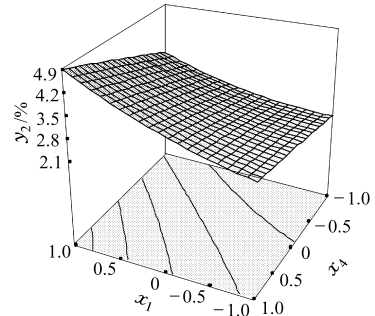


图 2 液泵压力与截止阀开度对施肥损失率影响的响应曲面图

Fig.2 Response surface map of influence of pump pressure and close valve's opening to fertilization loss rate

#### 3.3.4 喷口直径和土槽台车前进速度

固定液泵压力为 0.2 MPa,截止阀开度为 60%,得

$$y_2 = 3.016 67 - 0.791 67x_2 + 0.725 00x_3 + 0.191 67x_2^2 + 0.316 67x_3^2 - 0.112 50x_2x_3 \quad (7)$$

性能指标  $y_2$  的最小值为 2.3%,在试验水平下喷口直径对施肥损失率的影响要比土槽台车前进速度显著。

#### 3.3.5 喷口直径和截止阀开度

固定液泵压力为 0.2 MPa,土槽台车前进速度为 0.9 m/s,得

$$y_2 = 3.016 67 - 0.791 67x_2 + 0.658 33x_4 + 0.191 67x_2^2 + 0.020 83x_4^2 + 0.025 00x_2x_4 \quad (8)$$

性能指标  $y_2$  最小值为 1.7%,在试验水平下喷口直径对施肥损失率的影响要比截止阀开度显著。

#### 3.3.6 土槽台车前进速度和截止阀开度

固定液泵压力 0.2 MPa,喷口直径为 3 mm,得

$$y_2 = 3.016 67 + 0.725 00x_3 + 0.658 33x_4 + 0.316 67x_3^2 + 0.020 83x_4^2 - 0.100 00x_3x_4 \quad (9)$$

性能指标  $y_2$  的最小值为 2.0%,在试验水平下土槽台车前进速度对施肥损失率的影响要比截止阀开度显著。

### 3.4 最佳参数优化

在施肥量为 26~34 mL/次,施肥损失率最小的条件下,应用 Design-Expert 6.0.1 软件进行优化后得出因子最佳参数为:液泵压力 0.2 MPa,喷口直径 3 mm,土槽台车前进速度 0.975 m/s 和截止阀开度

60%,此时施肥损失率为2.8%。

### 3.5 验证试验

通过上述优化获得了最佳工作参数组合,并进行验证试验。为了消除随机误差,进行8次重复试验。试验结果中施肥量最大值为32.5 mL/次,最小值为28.6 mL/次,施肥损失率最大值为3.4%,最小值为2.6%,平均值为2.9%。

通过试验证明,由最佳参数得到响应值与优化结果近似,能满足设计要求。

## 4 结论

(1) 各因子对施肥量影响的显著性顺序从大到

小依次为喷口直径、液泵压力、截止阀开度和土槽台车前进速度;对施肥损失率影响的显著性顺序从大到小依次为喷口直径、土槽台车前进速度、液泵压力和截止阀开度。

(2) 在施肥量为26~34 mL/次时,应用响应曲面对影响施肥损失率的因子及其相互作用进行分析,优化后的工作参数为:液泵压力0.2 MPa、喷口直径3 mm、土槽台车前进速度0.975 m/s和截止阀开度60%,此时施肥损失率为2.8%。

(3) 根据最佳参数进行验证试验,结果表明由最佳工作参数组合得到的施肥量能够满足设计的要求,且施肥损失率最小。

## 参 考 文 献

- 冯金龙. 液体施肥装置施肥机理的试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2007.  
Feng Jinlong. Experiment research on fertilize parameters of liquid fertilizer device[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- 李志红,李锦泽,侯桂凤,等. 变量施肥机的设计[J]. 农机化研究,2008(8):109~110.  
Li Zhihong, Li Jinze, Hou Guifeng, et al. Design of variable fertilizer applicator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008(8):109~110. (in Chinese)
- 冯金龙,王金武,李玉清,等. 穴施液体施肥装置施肥机理的试验研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2008,20(6):44~47.  
Feng Jinlong, Wang Jinwu, Li Yuqing, et al. The experimental study on the mechanism of liquid fertilizing unit[J]. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University, 2008,20(6):44~47. (in Chinese)
- 程亨曼,孙文峰,陈宝昌. 多功能液态深施机的设计[J]. 农机化研究,2005(1):173~174.  
Cheng Hengman, Sun Wenfeng, Chen Baochang. The design on multi-functions liquid fertilizer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2005(1):173~174. (in Chinese)
- 江善襄. 磷肥和复合肥料[M]. 北京:化学工业出版社,1999.
- 汪家铭. 液体肥料开发应用前景广阔[J]. 应用科技,1999(12):15
- 阎宗彪,陈春风. 充分利用当前优势推广机械化肥深施[J]. 河北农机,2008(1):43~53.
- 黄燕,汪春,衣淑娟. 液体肥料施用装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2007,38(4):85~87.  
Huang Yan, Wang Chun, Yi Shujuan. Manufacture and the test analysis on the device of liquid fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(4):85~87. (in Chinese)
- 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2003.
- 王金峰,王金武. 液态变量施肥机两种不同变量机构的研究[J]. 农机化研究,2007(1):123~125.  
Wang Jinfeng, Wang Jinwu. Research on two different kinds of variable mechanism of liquid variable fertilizer applicator [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2007(1):123~125. (in Chinese)
- 冯金龙,王金武. 探针注入式深层施肥机构的运动分析[J]. 农机化研究,2007(4):64~65.  
Feng Jinlong, Wang Jinwu. The analysis for probe injection deep fertilization mechanism[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2007(4):64~65. (in Chinese)
- 黄燕,汪春,衣淑娟. 液体肥料的应用现状与发展前景[J]. 农机化研究,2006(2):198~200.  
Huang Yan, Wang Chun, Yi Shujuan. The application situation of fluid fertilizer and its developmental prospects[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2006(2):198~200. (in Chinese)
- 王万中. 试验的设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社,2004.