

灭茬深松前置式联合整地机单一作业参数的响应面法优化

李连豪^{1,2} 许春林^{3*} 赵大勇^{1,3} 李向军^{1,3} 李明金^{1,3}

(1. 黑龙江八一农垦大学 工程学院, 黑龙江 大庆 163319;

2. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083;

3. 哈尔滨农业机械化研究所, 哈尔滨 150070)

摘要 研究灭茬深松前置式联合整地机在单一作业时的机组性能。以机组作业速度和耕深为自变量, 油耗和牵引力为响应值, 利用 Box-Behnken 试验设计原理, 采用 2 因素 5 水平响应面分析方法, 并利用 Design-Expert 软件建立数学模型, 对各因素及交互作用进行分析, 并对单一作业参数进行优化。结合农艺因素, 优化结果为: 单一深松作业, 机组作业速度为 3.39 km/h, 深松深度 340 mm 时, 油耗为 2.72 L/km, 牵引力 27.65 kN; 单一旋耕作业, 机组作业速度为 3.92 km/h, 旋耕深度 152 mm 时, 油耗为 3.24 L/km, 牵引力 8.25 kN; 单一灭茬作业, 机组作业速度为 3.37 km/h, 灭茬深度 33.41 mm 时, 油耗为 1.35 L/km, 牵引力 7.8 kN; 此时机组达到最佳工作状态。研究结果对于合理使用灭茬深松前置式联合整地机具有一定参考价值。

关键词 联合整地机; 前置式; 单一作业; 灭茬; 深松; 旋耕

中图分类号 S 210.41; S 222.4

文章编号 1007-4333(2014)05-0153-10

文献标志码 A

Working parameters optimization with response surface method on front-stubble-breaking and subsoiling combined cultivating machine

LI Lian-hao^{1,2}, XU Chun-lin^{3*}, ZHAO Da-yong^{1,3}, LI Xiang-jun^{1,3}, LI Ming-jin^{1,3}

(1. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;

2. College of Water and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

3. Harbin Agricultural Mechanization Research Institute, Harbin 150070, China)

Abstract In order to explore the performance of front-stubble-breaking and subsoiling combined cultivating machine and optimize its working parameters, a response surface model was established by Design-Expert software and Box-Behnken experimental design method. Speed and tiller depth were taken as independent variables and fuel consumption and traction as response in the model. The optimized working speed and tiller depth were 3.39 km/h, 340 mm, 3.92 km/h, 152 mm, 3.37 km/h and 33.41 mm respectively, and the response fuel consumption and traction power were 2.72 L/km, 27.65 kN, 3.24 L/km, 8.25 kN and 1.35 L/km, 7.8 kN respectively on the conditions of single subsoiling part, single rotary tiller part and single stubble part respectively. The result of this research is expected to help rational use of front-stubble-breaking and front-subsoil combined cultivating machine.

Key words combined cultivating machine; front type; single work; stubble; sub-soiling; rotary tiller

为解决传统形式联合整地机机组在使用过程中普遍存在的作物硬茬对拖拉机轮胎损伤率高, 以及拖拉机对土壤压实促使作业阻力增加等问题^[1-4], 哈尔滨市农业机械化研究所相关科研人员设计开发出

一款灭茬深松前置式联合整地机, 大面积田间试验和推广应用表明, 使用灭茬深松前置式联合整地机使作物硬茬对拖拉机轮胎损伤率降低 12.4%, 作业阻力减少 1.9%。

收稿日期: 2013-12-22

基金项目: 国家农业成果转化基金项目(2010GB2B200137); 哈尔滨市科技攻关计划项目(2011AA6BN023)

第一作者: 李连豪, 讲师, 主要从事节水农业技术和装备开发研究, E-mail: lianhao8002@126.com

通讯作者: 许春林, 研究员, 主要从事大规模农业装备的研制和应用, E-mail: xcl1980@vip.sohu.com

与传统形式联合整地机功能相同,农户在使用灭茬深松前置式联合整地机时不但能够实现灭茬、深松、旋耕以及起垄等联合作业,而且能够根据农艺作业需要实现单一灭茬、单一深松和单一旋耕等作业。目前,国内外对传统形式联合整地机的联合作业最佳作业参数研究较多^[5];但对联合整地机单一作业最佳作业参数研究方面尚缺。联合整地机单一作业应用过程中存在的主要问题是:一方面针对传统形式联合整地机,在选择单一作业时,其最佳作业参数是按照单一功能整地机(如,相当宽幅深松机、旋耕机和灭茬机)进行,由于受机具整体影响,此时最佳作业参数与实际情况有一定差距;另一方面灭茬深松前置式联合整地机先灭茬作业后旋耕作业,此时单一作业最佳作业参数必定与传统形式联合整地机的不同。

基于以上考虑,本研究以灭茬深松前置式联合整地机为研究对象,以耕深和机组作业速度为自变量,通过试验测得不同因素水平组合条件下的油耗和牵引力,采用响应面分析法确定各因素及交互作用对油耗和牵引力的影响,以获得最佳作业参数。

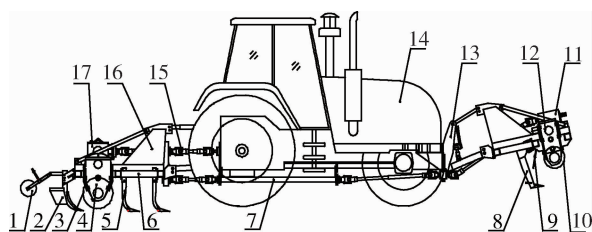
1 1ZQHF-350/5 型灭茬深松前置式联合整地机结构与原理

1.1 基本结构

1ZQHF-350/5 型灭茬深松前置式联合整地机主要由机架、动力传递系统、灭茬部件、深松部件、旋耕部件和起垄镇压部件等组成。根据农艺要求和动力计算^[6],结构参数见表 1,整机结构见图 1。

表 1 1ZQHF-350/5 型灭茬深松前置式联合整地机结构参数
Table 1 Structure parameters of 1ZQHF-350/5 front-stubble-breaking and subsoiling combined cultivating machine

参数 Parameter	数值 Value
幅宽/cm Working width	350.0
灭茬深度/mm Stubble depth	20.0~100.0
深松深度/mm Sub-soiling depth	210.0~410.0
旋耕深度/mm Rotary tiller depth	120.0~220.0
垄距/cm Row width	65.0~70.0
配套动力/kW Power	132.3~161.7
作业速度/(km/h) Working speed	2.0~6.0



1. 镇压器 Compacting machine; 2. 起垄铧 Ridge forming ploughshare; 3. 碎土刀轴 Soil chopping blade shaft; 4. 旋耕侧变速箱 Rotary tillage lateral gearbox; 5. 松土铲 Break shovel; 6. 机架 Frame; 7. 灭茬传动总成 Assemble of stubble transmission; 8. 深松铲 Loosen soil shovel; 9. 防尘板 Proof dust board; 10. 灭茬刀轴 Stubble blade shaft; 11. 灭茬主变速箱 Stubble main gearbox; 12. 灭茬侧变速箱 Stubble lateral gearbox; 13. 前悬挂装置 Front suspension device; 14. 拖拉机 Tractor; 15. 主传动轴 Main transmission shaft; 16. 吊挂架 Hanging rack; 17. 旋耕主变速箱 Rotary tillage main gearbox.

图 1 1ZQHF-350/5 型灭茬深松前置式联合整地机

Fig. 1 1ZQHF-350/5 front-stubble-breaking and subsoiling combined cultivating machine

1.2 工作原理

由配置在拖拉机前端的灭茬部件中的灭茬刀将作物硬茬打碎,同时由深松部件进行垄上深松作业,其后拖拉机经过灭茬深松后的土壤,由配置在拖拉机后端的旋耕部件中的旋耕刀进行碎土作业、起垄和镇压作业,一次作业使耕地达到待播状态^[8-9]。

2 材料与方方法

2.1 试验仪器

1ZQHF-350/5 型灭茬深松前置式联合整地机 1 台(哈尔滨农业机械化研究所研制),CYB-809A 拖拉机及农具性能综合测试系统(哈尔滨博纳公司生产)1 套,测试区规划仪器与工具(含直尺)若干,取土工具若干^[10]。

2.2 试验地点与时间

试验于 2012-09-25—2012-10-12 日在哈尔滨市农业科学院示范园区(哈尔滨市万宝镇)进行,总试验面积约 20 hm²,试验地前茬作物为垄作玉米,试验田土壤基本性状见表 2。

2.3 试验方法

2.3.1 试验布置

将试验区分为 3 个试验小区,每一小试验区预留一定面积的准备区;根据试验要求将试验区分为单一灭茬作业、单一深松作业和单一旋耕作业 3 个不同试验区。

表 2 试验田土壤基本性状

Table 2 Basic properties of soil in test field

取样深度/cm Sample depth	土壤容重/(g/cm ³) Soil bulk density	绝对含水率/% Absolute moisture content
0.00~10.00	1.14	20.49
>10.00~20.00	1.18	22.34
>20.00~30.00	1.21	22.72
>30.00~40.00	1.27	23.49
>40.00~50.00	1.31	23.78

2.3.2 数据采集与处理

根据不同作业状态需要,将 CYB-809A 拖拉机及农具性能综合测试系统中的牵引力传感器和油耗传感器安装在规定位置。通过设计不同因素水平组合的试验方案,测量各试验条件下的油耗和牵引力,将 CYB-809A 拖拉机及农具性能综合测试系统采集到的数据进行误差补偿,以方差分析为手段建立数学回归模型,应用响应面法分析并优化作业参数^[11-13]。

2.4 试验设计

运用 Design-Expert8.0 软件对试验数据进行回归分析,选取作业参数机组作业速度和耕深为试验因素,油耗和牵引力为响应值进行响应面法试验。利用 Box-Behnken 试验设计原理设置不同作业状态下的各因素水平和编码^[14-15](表 3)。

表 3 单一作业试验因子水平设置及编码

Table 3 Coding table of factors level with single work test

水平设置及编码值 Level set and coding value	作业速度/(km/h) Working unit speed	作业深度/mm Working depth		
		深松 Sub-soiling	旋耕 Rotary tiller	灭茬 Stubble
上星号臂(+1, 414) Level of upper asterisk arm	5.4	372.0	208.0	208.0
上水平(1) Upper level	5.0	360.0	200.0	200.0
零水平(0) Zero level	4.0	330.0	180.0	180.0
下水平(-1) Lower level	3.0	300.0	160.0	160.0
下星号臂(-1, 414) Level of lower asterisk arm	2.6	288.0	152.0	152.0

3 结果与分析

3.1 单一深松作业

1ZQHF-350/5 型灭茬深松前置式联合整地机仅安装 5 个深松铲,试验结果见表 4。

3.1.1 深松作业速度和深松深度对油耗的影响

对试验结果(表 4)进行分析,得到油耗 y_1 的回归模型:

$$y_1 = 2.3 + 0.224x_1 - 0.001x_2 + 0.02x_1^2 \quad (1)$$

式中: x_1 为作业速度,km/h; x_2 为深松深度,mm; y_1 为油耗,L/km; y_2 为牵引力,kN。对回归模型进行方差分析(表 5)可知,模型 $P < 0.000 1$,表明模型极

显著;失拟项 $P > 0.05$,失拟不显著,表明回归模型与实际拟合良好;决定系数 $R^2 = 0.924 6$,拟合度高,说明模型所拟合的回归方程合适,能够正确反应 y_1 与 x_1 和 x_2 之间关系。

显著水平 $\alpha = 0.05$ 时,深松深度 x_2 和 x_1^2 对油耗 y_1 影响显著, x_2 大于 x_1 ,其他因子不显著。

由 x_1 和 x_2 对 y_1 影响的等高线图(图 2)可知, y_1 为 2.64~2.77 L/km。 y_1 随 x_2 增大而增大,随 x_1 增大而先减小后增大。响应曲面沿 x_2 方向变化较快,而沿 x_1 方向变化较慢,说明在试验水平下 x_2 对 y_1 的影响比 x_1 显著,与方差分析结果一致。

表4 单一深松作业试验结果

Table 4 Results with single sub-soiling part test

试验序号 Test serial number	因子 Factors		性能指标 Function index	
	x_1	x_2	y_1	y_2
1	1	1	2.747	30.316
2	1	-1	2.659	27.285
3	-1	1	2.742	28.217
4	-1	-1	2.676	24.225
5	1.414	0	2.746	30.811
6	-1.414	0	2.733	23.850
7	0	1.414	2.792	31.802
8	0	-1.414	2.593	22.796
9	0	0	2.698	28.546
10	0	0	2.688	28.543
11	0	0	2.692	28.548
12	0	0	2.690	28.529
13	0	0	2.689	28.531
14	0	0	2.695	28.536
15	0	0	2.698	28.542
16	0	0	2.698	28.541

注： x_1 为作业速度，km/h； y_1 为油耗，L/km； y_2 为牵引力，kN。下表同。 x_2 为深松深度，mm。

Notes: x_1 refers to working unit speed; y_1 refers to fuel consumption; y_2 refers to traction power. The same below. x_2 refers to sub-soiling depth.

表5 单一深松作业油耗回归模型方差分析

Table 5 Variance analysis of regression model on consumption with single sub-soiling part

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean squares	F	P
x_1	5.096×10^{-6}	1	5.096×10^{-6}	22.040	0.889
x_2	0.024	1	0.024	0.021	$< 1.0 \times 10^{-4}$
x_1^2	3.362×10^{-3}	1	3.362×10^{-3}	95.830	4.200×10^{-2}
x_2^2	7.200×10^{-5}	1	7.200×10^{-5}	13.590	0.601
$x_1 x_2$	1.210×10^{-4}	1	1.210×10^{-4}	0.290	0.500
模型 Model	12.800	5	2.560	13.630	$< 1.0 \times 10^{-4}$
失拟项 Lack of fit	0.030	3	0.100	0.490	0.732
残差 Residual	0.530	5	0.106		
净误差 Net error	0.230	2	0.115		
总离差 Total sum of squares	13.030	10			

注： x_2 为深松深度，mm。Notes: x_2 refers to sub-soiling depth.

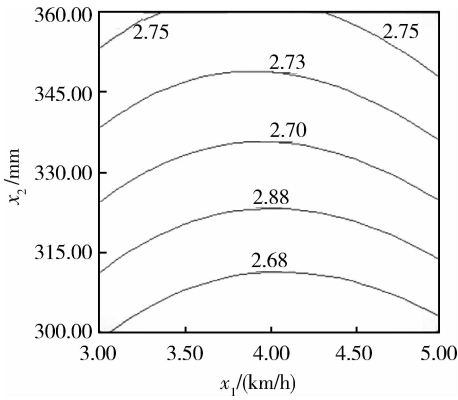


图 2 单一深松作业速度 x_1 和深松深度 x_2 对油耗的影响
 Fig. 2 Influence of working unit speed and sub-soiling depth on fuel consumption with single sub-soiling part

3.1.2 深松作业速度和深松深度对牵引力的影响
 对试验结果(表 4)进行分析,得到牵引力 y_2 的回归模型:

$$y_2 = -6.7 + 1.88x_1 + 0.08x_2 \quad (2)$$

回归模型方差分析(表 6)可知,模型 $P < 0.000 1$, 表明模型极显著;失拟项 $P > 0.05$, 失拟不显著,回归模型与实际拟合良好;决定系数 $R^2 = 0.933 1$, 拟合度高,说明模型所拟合的方程式能够正确反应 y_2

与 x_1 和 x_2 之间关系。

显著水平 $\alpha = 0.05$ 时, x_1 和 x_2 对 y_2 影响显著, x_2 大于 x_1 , 其他因子不显著。

由 x_1 和 x_2 对 y_2 影响等高线图(图 3)可知, y_2 的范围为 23.63~32.32 kN。 y_2 随 x_1 和 x_2 的增大而增大。响应曲面沿 x_2 方向变化较快, 而沿 x_1 方向变化较慢。在试验水平下 x_2 对 y_2 的影响比 x_1 显著, 与方差分析结果一致。

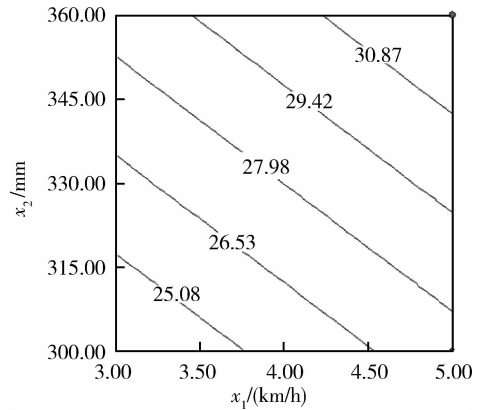


图 3 单一深松作业速度 x_1 和深松深度 x_2 对牵引力影响
 Fig. 3 Influence of working unit speed and sub-soiling depth on traction power with single sub-soiling part

表 6 单一深松作业牵引力回归模型方差分析

Table 6 Variance analysis of regression model on traction power with single sub-soiling part

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean squares	F	P
x_1	28.14	1	28.14	29.95	1.0×10^{-4}
x_2	48.80	1	48.80	51.95	$< 1.0 \times 10^{-4}$
模型 Model	33.04	2	16.52	10.47	$< 1.0 \times 10^{-4}$
失拟项 Lack of fit	0.94	1	0.94	0.32	0.53
残差 Residual	1.56	1	1.56		
净误差 Net error	0.62	1	0.62		
总离差 Total sum of squares	34.60	4			

注: x_2 为深松深度, mm。 Notes: x_2 refers to sub-soiling depth.

3.2 单一旋耕作业

1ZQHF-350/5 型灭茬深松前置式联合整地机仅安装旋耕部件, 试验结果见表 7。

3.2.1 旋耕作业速度和旋耕深度对油耗的影响

对试验结果(表 7)进行分析, 得到油耗 y_1 的回归模型:

$$y_1 = 5.47 - 1.54x_1 + 0.005x_2 + 0.11x_1^2 + 0.004x_1x_2 \quad (3)$$

式中: x_2 为旋耕深度。由油耗 y_1 回归模型方差分析(表 8)可知, 模型 $P < 0.000 5$, 表明模型显著^[14-15]; 失拟项 $P > 0.05$, 失拟不显著, 回归模型与实际拟合良好; 决定系数 $R^2 = 0.902$, 拟合度高, 说

表7 单一旋耕作业试验结果

Table 7 Results of single rotary tiller part test

试验序号 Test serial number	因子 Factors		性能指标 Function index	
	x_1	x_2	y_1	y_2
1	1	1	3.715	11.812
2	1	-1	3.404	10.037
3	-1	1	3.563	9.870
4	-1	-1	3.550	8.030
5	1.414	0	3.631	11.780
6	-1.414	0	3.722	7.930
7	0	1.414	3.736	12.516
8	0	-1.414	3.132	8.406
9	0	0	3.465	9.920
10	0	0	3.459	9.900
11	0	0	3.471	9.960
12	0	0	3.466	9.930
13	0	0	3.460	9.920
14	0	0	3.455	9.900
15	0	0	3.462	9.950
16	0	0	3.468	9.960

注: x_2 为旋耕深度。Notes: x_2 refers to rotary tiller depth.

表8 单一旋耕作业下油耗回归模型方差分析

Table 8 Variance analysis of regression model on consumption with single rotary tiller part

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean squares	F	P
x_1	1.882×10^{-3}	1	1.882×10^{-3}	0.500	0.496
x_2	0.170	1	0.170	46.13	$< 1.0 \times 10^{-4}$
x_1^2	0.092	1	0.092	24.490	6.0×10^{-4}
x_2^2	1.554×10^{-3}	1	1.554×10^{-3}	0.410	0.535
$x_1 x_2$	0.022	1	0.022	5.900	0.036
模型 Model	10.720	5	2.144	21.330	$< 5.0 \times 10^{-4}$
失拟项 Lack of fit	1.030	3	0.343	0.420	0.607
残差 Residual	1.920	5	0.384		
净误差 Net error	0.890	2	0.445		
总离差 Total sum of squares	12.640	10			

注: x_2 为旋耕深度。Notes: x_2 refers to rotary tiller depth.

明模型所拟合的方程式能够正确反应 y_1 与 x_1 和 x_2 之间关系。

显著水平 $\alpha=0.05$ 时, x_1 、 x_2 、 x_1^2 和 x_1x_2 对 y_1 影响显著, 显著性顺序从大到小依次为 x_2 、 x_1^2 、 x_1x_2 和 x_1 , 其他因子影响不显著。

由 x_1 和 x_2 对 y_1 影响等高线图(图 4)可知, y_1 的范围为 3.28~3.76 L/km。 y_1 随 x_2 增大而增大, 随 x_1 增大而先减小后增大。响应曲面沿 x_2 方向变化较快, 而沿 x_1 方向变化较慢。在试验水平下 x_2 对 y_1 的影响比 x_1 显著, 与方差分析结果一致。

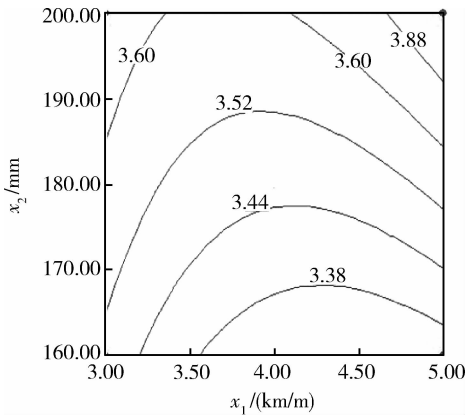


图 4 单一旋耕作业速度 x_1 和旋耕深度 x_2 对油耗的影响
Fig. 4 Influence of working unit speed and rotary tiller depth on fuel consumption with single rotary tiller part

3.2.2 旋耕作业速度和旋耕深度对牵引力的影响

对试验结果(表 7)进行分析, 得到牵引力 y_2 的回归模型:

$$y_2 = -5.31 + 1.17x_1 + 0.06x_2 \quad (4)$$

由 y_2 回归模型方差分析(表 9)可知, 模型 $P < 0.0001$, 表明模型极显著; 失拟项 $P > 0.05$, 失拟不显著, 回归模型与实际拟合良好; 决定系数 $R^2 = 0.945$, 拟合度高, 说明模型所拟合的方程式能够正确反应 y_2 与 x_1 和 x_2 之间的关系。

显著水平 $\alpha=0.05$ 时, x_1 和 x_2 对 y_2 影响显著, x_1 和 x_2 对 y_2 影响的显著性相同, 其他因子影响不显著。

由 x_1 和 x_2 对 y_2 影响等高线图(图 5)可知, y_2 的范围为 7.64~12.34 kN。 y_2 随 x_1 和 x_2 的增大而增大。响应曲面沿 x_2 方向变化较快, 而沿 x_1 方向变化较慢。在试验水平下对 y_2 的影响 x_2 比 x_1 显著, 与方差分析结果一致。

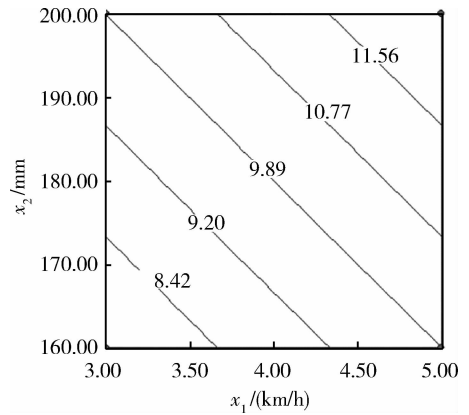


图 5 单一旋耕作业速度 x_1 和旋耕深度 x_2 对牵引力的影响
Fig. 5 Influence of working unit speed and rotary tiller depth on traction power with single rotary tiller part

表 9 单一旋耕作业下牵引力回归模型方差分析

Table 9 Variance analysis of regression model on traction power with single rotary tiller part

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean squares	F	P
x_1	11.03	1	11.03	101.80	$< 1.0 \times 10^{-4}$
x_2	11.11	1	11.11	102.54	$< 1.0 \times 10^{-4}$
模型 Model	9.76	2	4.88	98.47	$< 1.0 \times 10^{-4}$
失拟项 Lack of fit	0.27	1	0.27	0.73	0.86
残差 Residual	0.42	2	0.21		
净误差 Net error	0.15	1	0.15		
总离差 Total sum of squares	10.18	4			

注: x_2 为旋耕深度。Notes: x_2 refers to rotary tiller depth.

3.3 单一灭茬作业

安装灭茬部件,试验结果见表10。

1ZQHF-350/5型灭茬深松前置式联合整地仪

表10 单一灭茬作业试验结果

Table 10 Results of single stubble part test

试验序号 Test serial number	因子 Factors		性能指标 Function index	
	x_1	x_2	y_1	y_2
1	1	1	1.602	11.960
2	1	-1	1.326	9.872
3	-1	1	1.592	9.556
4	-1	-1	1.367	7.820
5	1.414	0	1.356	11.200
6	-1.414	0	1.450	7.800
7	0	1.414	1.692	10.700
8	0	-1.414	1.306	8.230
9	0	0	1.385	9.870
10	0	0	1.386	9.870
11	0	0	1.379	9.840
12	0	0	1.383	9.850
13	0	0	1.385	9.840
14	0	0	1.382	9.830
15	0	0	1.385	9.860
16	0	0	1.386	9.900

注: x_2 为灭茬深度。Notes: x_2 refers to stubble depth.

3.3.1 灭茬作业速度和灭茬深度对油耗的影响

对试验结果(表10)进行分析,得到 y_1 的回归模型:

$$y_1 = 2.03 - 1.8x_1 - 0.015x_2 + 0.015x_1^2 + 0.0002x_2^2 \quad (5)$$

式中: x_2 为灭茬深度。由 y_1 回归模型方差分析(表11)可知,模型 $P < 0.0001$,表明模型极显著;失拟项 $P > 0.05$,失拟不显著,回归模型与实际拟合良好;决定系数 $R^2 = 0.9246$,拟合度高,说明模型所拟合的方程式能够正确反应 y_1 与 x_1 和 x_2 之间关系。

显著水平 $\alpha = 0.05$ 时, x_1 、 x_2 、 x_1^2 和 x_2^2 对 y_1 影响显著,对 y_1 影响显著性顺序从大到小依次为 x_1 、 x_1^2 、 x_2^2 和 x_2 ,其他因子影响不显著。

由 x_1 和对 y_1 影响的等高线图(图6)可知, y_1 的范围为1.3~1.6 L/km, y_1 随 x_2 增大而增大,随 x_1 增大而先减小后增大。响应曲面沿 x_2 方向变化

较快,而沿 x_1 方向变化较慢。在试验水平下 x_2 对 y_1 的影响比 x_1 显著,与方差分析结果一致。

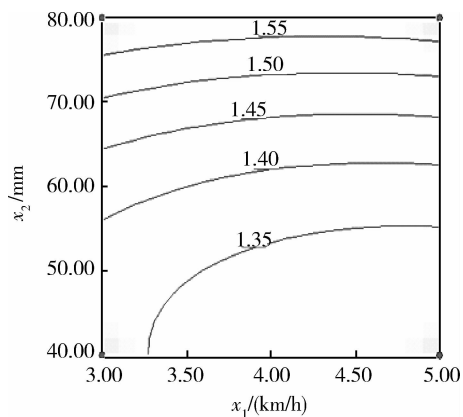
图6 单一灭茬作业速度 x_1 和灭茬深度 x_2 对油耗的影响

Fig. 6 Influence of working unit speed and stubble depth on fuel consumption with single stubble part

表 11 单一灭茬作业下油耗回归模型方差分析

Table 11 Variance analysis of regression model on consumption with single stubble part

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean squares	F	P
x_1	3.359×10^{-3}	1	3.359×10^{-3}	13.700	4.100×10^{-4}
0.140	1	0.140	558.550	$<1.0 \times 10^{-4}$	
x_1^2	1.740×10^{-3}	1	1.740×10^{-3}	7.100	0.024
x_2^2	0.032	1	0.032	128.430	$<1.0 \times 10^{-4}$
$x_1 x_2$	6.520×10^{-4}	1	6.520×10^{-4}	2.650	0.135
模型 Model	7.320	5	1.464	31.970	$<1.0 \times 10^{-4}$
失拟项 Lack of fit	0.180	3	0.060	0.563	0.760
残差 Residual	0.480	5	0.096		
净误差 Net error	0.300	2	0.150		
总离差 Total sum of squares	7.800	10			

注： x_2 为灭茬深度。Notes： x_2 refers to stubble depth.

3.3.2 灭茬作业速度和灭茬深度对牵引力的影响

对试验结果(表 10)进行分析,得到 y_2 的回归模型:

$$y_2 = 2.36 + 1.16x_1 + 0.046x_2 \quad (6)$$

由回归模型方差分析(表 12)可知,模型 $P < 0.0001$, 表明模型极显著;失拟项 $P > 0.05$, 失拟不显著,回归模型与实际拟合良好;决定系数 $R^2 = 0.9523$, 拟合度高,说明模型所拟合的方程式能够正确反应 y_2 与 x_1 和 x_2 之间关系。

表 12 单一灭茬作业下牵引力回归模型方差分析

Table 12 Variance analysis of regression model on traction power with single stubble part

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean squares	F	P
x_1	10.770	1	10.770	311.960	$<1.0 \times 10^{-4}$
x_2	6.730	1	6.730	194.830	$<1.0 \times 10^{-4}$
模型 Model	8.040	2	4.020	31.930	$<1.0 \times 10^{-4}$
失拟项 Lack of fit	0.230	1	0.230	0.6720	0.854
残差 Residual	0.355	2	0.178		
净误差 Net error	0.125	1	0.125		
总离差 Total sum of squares	8.399	4			

注： x_2 为灭茬深度。Notes： x_2 refers to stubble depth.

显著水平 $\alpha = 0.05$ 时, x_1 和 x_2 影响显著,其他因子影响不显著。由 x_1 和 x_2 对 y_2 影响的等高线图(图 7)可知, y_2 的范围为 23.63~32.32 kN。 y_2

随 x_1 和 x_2 的增大而增大。响应曲面沿 x_1 方向变化较快,而沿 x_2 方向变化较慢。在试验水平下 x_1 对 y_2 的影响比 x_2 显著,与方差分析结果一致。

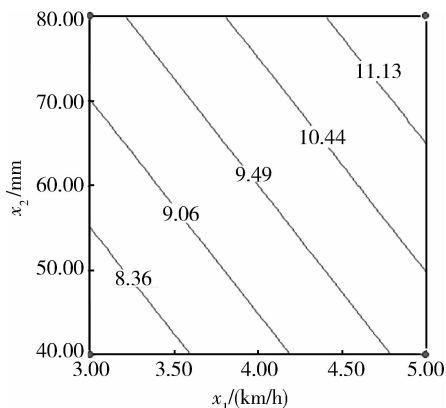


图7 单一灭茬作业速度 x_1 和灭茬深度 x_2 对牵引力的影响

Fig. 7 Influence of working unit speed and stubble depth on traction power with single stubble part

3.4 最佳作业参数及验证

3.4.1 最佳作业参数

在结果分析和回归方程拟合的基础上,利用 Design-Expert8.0 软件对试验参数进一步优化,在保证牵引力和油耗数值最小的条件下,综合农艺因素,确定最佳作业参数。

单一深松作业时最佳作业参数为:作业速度 3.39 km/h,深松深度 340 mm,此时油耗为 2.72 L/km,牵引力 27.65 kN;单一旋耕作业时最佳作业参数为:作业速度 3.92 km/h,旋耕深度 152 mm,此时油耗 3.24 L/km,牵引力 8.25 kN;单一灭茬作业时,最佳作业参数为:作业速度 3.37 km/h,耕深 33.41 mm,此时油耗 1.35 L/km,牵引力 7.8 kN。

3.4.2 试验验证

根据确定的最佳作业参数^[16-17],选取不同地块(土壤基本特性相近)进行验证试验,试验进行3次,取平均值。验证结果说明,单一深松作业,最佳作业参数下的油耗为 2.69 L/km,牵引力为 27.53 kN;单一旋耕作业,最佳作业参数下的油耗为 3.15 L/km,牵引力 8.13 kN;单一灭茬作业,最佳作业参数下的油耗为 1.26 L/km,牵引力 7.87 kN。均与软件优化结果基本一致。

4 结论

结合农艺因素本研究确定:1ZQHF-350/5型灭

茬、深松前置式联合整地单一作业时的最佳作业参数为:单一深松作业,机组作业速度为 3.39 km/h,深松深度 340 mm;单一旋耕作业,机组作业速度 3.92 km/h,旋耕深度 152 mm;单一灭茬作业,机组作业速度 3.37 km/h,灭茬深度 33.41 mm。此时机组达到最佳工作状态。

参考文献

- [1] 丁启朔,丁为民.现代土壤机械耕作研究的综述[J].土壤通报,2006,37(1):149-153
- [2] 李汝莘,林成厚,高焕文,等.小四轮拖拉机土壤压实的研究[J].农业机械学报,2002,33(1):126-129
- [3] 吴永波,刘爽.土壤压实对土壤性质及植物生长的影响[J].林业科技开发,2010,24(1):15-17
- [4] 林振江,崔立勇,王闯,等.农田土壤机械压实的发生、影响及改良[J].农机化研究,2011(11):249-252
- [5] 张兴义,隋跃宇.农田黑土机械压实及其对作物产量的影响[J].农机化研究,2002(04):64-67
- [6] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册:上册[M].北京:机械工业出版社,2007:261-293
- [7] 赵伟,张文春,周志立,等.深松旋耕组合作业机的研制与试验研究[J].农业工程学报,2007,23(1):125-128
- [8] 周宏明,薛伟,桑正中.旋耕机总体参数的优化设计模型[J].农业机械学报,2001,32(5):37-39
- [9] 王金武,张成亮,许春林,等.联合整地机平整部件参数优化[J].农业机械学报,2013,44(2):34-39
- [10] 陈振歌,王金武,牛春亮,等.弹齿式苗间除草装置关键部件设计与试验[J].农业机械学报,2010,41(6):80-85
- [11] 何义川,王序俭,曹肆林,等.1JH-3.0型宽幅秸秆粉碎还田机的研制[J].中国农业大学学报,2013,18(6):180-185
- [12] 赵武云,郭康权.组合式螺旋板齿种子玉米脱粒机工作参数优化[J].农业机械学报,2012,43(12):6-61
- [13] 袁雪,祁力钧,王虎,等.温室摇摆式变量弥雾机喷雾参数响应面法优化[J].农业机械学报,2012,43(4):45-52
- [14] 杨有刚,刘迎春,吕新民.挖坑机扭转振动特征对的动力学分析[J].农业机械学报,2005,36(9):34-36
- [15] 魏效玲,薛冰军,赵强.基于正交试验设计的多指标优化方法研究[J].河北工程大学学报:自然科学版,2010,27(3):95-99
- [16] 刘瑞江,张业旺,闻崇炜,等.正交试验设计和分析方法研究[J].实验技术与管理,2010,27(9):52-55
- [17] 付俊峰,张东兴,李霞,等.振动深松机的改进设计与试验研究[J].中国农业大学学报,2011,16(6):158-162

责任编辑:刘迎春