

全膜双垄沟覆膜土壤离散元接触参数仿真标定

戴飞¹ 宋学锋¹ 赵武云¹ 张锋伟¹ 马海军² 马明义²

(1. 甘肃农业大学机电工程学院, 兰州 730070; 2. 甘肃洮河拖拉机制造有限公司, 定西 730500)

摘要: 为进一步提升基于离散元法对全膜双垄沟机械化覆土作业过程研究的准确性, 结合 EDEM 软件进行覆膜土壤摩擦角(土壤休止角及其与钢滑动摩擦角)离散元仿真试验。通过三因素三水平正交组合试验, 得出各接触参数对土壤休止角、土壤与钢滑动摩擦角的影响显著性顺序。分别建立了各关键接触参数与土壤休止角、土壤与钢滑动摩擦角的二次多项式回归模型, 以自制试验装置测定结果作为优化的目标值, 获得全膜双垄沟覆膜土壤离散元最优接触参数组合为: 土壤与土壤静摩擦因数 0.68、土壤与土壤滚动摩擦因数 0.27、土壤与土壤恢复系数 0.21、土壤与钢静摩擦因数 0.31、土壤与钢滚动摩擦因数 0.13 和土壤与钢恢复系数 0.54。为验证所标定全膜双垄沟覆膜土壤接触参数的可靠性, 对模拟仿真与实际试验的土壤休止角、土壤与钢滑动摩擦角进行了对比分析, 两者相对误差分别为 2.6% 和 3.1%; 同时应用离散元法进行全膜双垄沟覆土装置在覆膜土壤颗粒最优标定参数组合设置下的种床覆土过程仿真模拟, 通过与实际作业效果对比, 仿真结果与田间试验工况基本一致, 验证了仿真试验与建立回归模型的有效性。

关键词: 覆膜土壤; 全膜双垄沟; 覆土装置; 离散元法; 参数标定

中图分类号: O347.7; S152.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)02-0049-08

Simulative Calibration on Contact Parameters of Discrete Elements for Covering Soil on Whole Plastic Film Mulching on Double Ridges

DAI Fei¹ SONG Xuefeng¹ ZHAO Wuyun¹ ZHANG Fengwei¹ MA Haijun² MA Mingyi²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

2. Gansu Tao River Tractor Manufacturing Co., Ltd., Dingxi 730500, China)

Abstract: Aiming to further promotion the accuracy research on the process of the mechanized covering soil on whole plastic film mulching on double ridges. Combined with EDEM software, a discrete element simulation test was carried out on the covering soil friction angle (the repose angle of soil-soil and the sliding friction angle of soil-steel). Through the three-factor orthogonal combination test, the significant order of the contact parameters was obtained, which influenced the repose angle of soil-soil and the sliding friction angle of soil-steel. Based on the software regression analysis of Design-Expert 8.0.6 and response surface analysis method, the relationship between the influencing factors and evaluating indicator (repose angle and sliding friction angle) was established. The measured value of covering soil friction angle (the repose angle of soil-soil and the sliding friction angle of soil-steel) was selected as the chosen target; by using response surface method, the optimal aggregative index could be obtained under the condition that the static friction coefficient among soil was 0.68, the rolling friction coefficient among soil was 0.27, the restitution coefficient among soil was 0.21, the static friction coefficient of soil-steel was 0.31, the rolling friction coefficient of soil-steel was 0.13 and the restitution coefficient of soil-steel was 0.54. In order to verify the reliability of the contact parameters of discrete elements for covering soil on whole plastic film mulching on double ridges, the comparative analysis was made between the simulated test and the actual test of soil friction angle (the repose angle of soil-soil and the sliding friction angle of soil-steel), and the relative errors were 2.6% and 3.1%, respectively. The discrete element method was applied to simulate operation process of the device with covering soil on plastic-film seedbed under

收稿日期: 2018-04-24 修回日期: 2018-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51775115, 51405086)和现代农业产业技术体系专项(CARS-14-1-28)

作者简介: 戴飞(1987—), 男, 副教授, 主要从事西北旱区膜土-机器-植物互作系统研究, E-mail: daifei@gsau.edu.cn

通信作者: 赵武云(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事北方旱区作物生产装备工程研究, E-mail: zhaowuy@gsau.edu.cn

the condition of using the optimal contact parameters. The simulation result was consistent with the field test effect. Meanwhile, the parameters calibration method and regression model was feasible, which could provide references for the parameter setting of the soil discrete element simulation of farmland in the northwest arid area of China.

Key words: covering soil on plastic film; whole plastic film mulching on double ridges; covering soil device; discrete element method; parameters calibration

0 引言

全膜双垄沟播技术是我国西北地区旱作农业的一项突破性技术,要求先完成大小垄体种床的耕整、覆膜与覆土准备,后在小垄垄沟内进行播种作业^[1-2]。其中,全膜双垄沟起垄、覆膜-覆土环节农艺要求较为特殊和复杂,首先需构建大垄垄体与小垄垄体相间的异形垄体覆膜种床;其次以小垄垄体为中心基准,铺设宽度为1 200 mm的白(黑)色地膜(厚度为0.01 mm),即用整张地膜覆盖小垄整体及其两侧垄沟,且分别均等向两侧各1/2大垄垄体延伸进行覆膜作业,并同时完成两侧膜边、垄沟内的覆土镇压。同时,当下一组小垄垄体覆膜作业时,其左侧1/2大垄垄体覆土膜边正好与上一组右侧大垄垄体覆土膜边对接,并在中心覆膜土带的连接下完成大垄垄体的全膜覆盖,整张地膜所覆盖双垄底部总体宽度约为1 100 mm,覆盖边界经历了由垄到沟、沿沟至垄的双重跨越^[3]。因此,在上述农艺要求下,覆膜种床覆土环节至关重要,研究全膜双垄沟机械化覆土作业过程对于其种床高效构建具有重要意义。

近年来,离散元法(DEM)及其仿真软件 EDEM 在农业工程领域得到了广泛研究与应用,主要在大田耕作、谷物排种、农业物料参数标定、作物收获等方面取得了一系列重要研究进展^[4-8]。种床覆膜土壤作为全膜双垄沟覆土装置的主要作用对象,是一种典型的离散物质,可借助离散元法对其接触参数及机械化覆土作业过程进行研究。其中,覆膜土壤颗粒的本征参数包括形状尺寸、密度、泊松比和剪切模量,该类参数可通过查阅文献或试验测得;土壤颗粒的接触参数主要包括恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数等,较难直接测量,可借助离散元法采用虚拟试验进行标定与优化筛选。目前,国内外相关学者应用离散元法,通过物料堆积休止角及滑动摩擦角完成了对土壤、稻谷、饲料、马铃薯、玉米等物料颗粒间的静摩擦因数、滚动摩擦因数及恢复系数等接触参数的标定^[7,9-12];同时,依托具体研制样机开展了各类农机具触土部件与大田土壤关于上述接触参数的标定^[13-16],但由于两者互作方式、土壤类型、触土部件材料等多因素的影响,研究标定的土壤重

要接触参数仍处于一个区间值,且基于全膜双垄沟覆土装置作用下有关土壤接触参数的研究鲜见报道。

因此,为进一步提升基于离散元法关于全膜双垄沟覆土作业过程研究的准确性,在参考已有土壤-土壤、土壤-农具重要接触参数(静摩擦因数、滚动摩擦因数及恢复系数)区间值的基础上,分别应用三因素三水平正交回归模拟试验,优化全膜双垄沟机械化覆土装置作用下覆膜土壤的离散元模型参数,建立优化参数下的机械化覆土作业仿真模型并进行试验验证,以期为西北旱区农田耕作土壤离散元仿真参数设置提供参考与借鉴。

1 试验标定参数确定

1.1 作业装置结构组成

双垄耕作施肥喷药覆膜机主要由悬挂架、喷药装置、旋耕刀组、取土铲、镇压装置、挂膜装置、刮板式升运器、覆土侧流槽、覆土直流槽和肥料箱等组成,如图1所示。

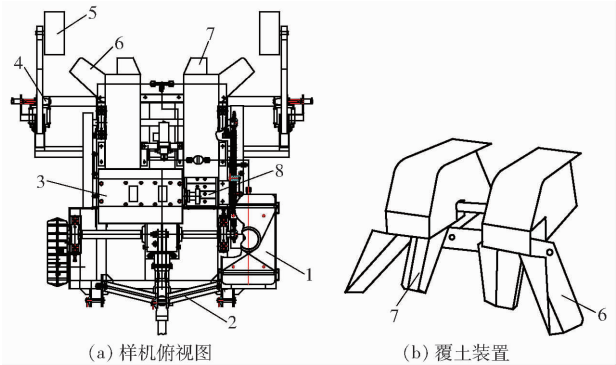


图1 双垄耕作施肥喷药覆膜机结构图

Fig.1 Structure diagrams of operation machine for tillage-fertilization and spraying-filming on double ridges

1. 喷药装置 2. 悬挂架 3. 肥料箱 4. 挂膜装置 5. 镇压装置
6. 覆土侧流槽 7. 覆土直流槽 8. 刮板式升运器

1.2 标定参数选取

全膜双垄沟机械化覆土装置作业过程如图2所示,在作业机旋耕刀组及其取土铲的共同作用下将切削土壤高速抛送至刮板式升运器并后输至覆土装置。覆土装置将土壤分为两条路径,并在覆土侧流槽、覆土直流槽及后置镇压轮的共同配合下完成全膜双垄沟覆膜种床两侧膜边、垄沟内的覆土镇压^[1]。



图2 全膜双垄沟机械化覆土作业过程
Fig.2 Operation process of mechanized covering soil on whole plastic film mulching on double ridges

由机械化覆土装置作业过程可以看出,覆膜土壤间、土壤与覆土侧(直)流槽间主要呈密相堆积与倾斜相对滑动,并形成了覆膜土壤颗粒流,以4条覆土带完成对种床垄沟及膜边的定位覆盖。因此,应用离散元法对覆土过程进行仿真分析时,土壤与土壤静摩擦因数、土壤与土壤滚动摩擦因数、土壤与土壤恢复系数、土壤与钢(溜土槽)静摩擦因数、土壤与钢(溜土槽)滚动摩擦因数、土壤与钢(溜土槽)恢复系数均是影响其仿真结果准确性的关键参数,本研究将标定上述6个主要接触参数。

1.3 标定参数范围确定

根据已有文献研究,相关标定参数的参考范围为:土壤与土壤静摩擦因数在0.30~0.70之间^[5,9,13,17-20],土壤与土壤滚动摩擦因数在0.14~0.40之间^[5,9,13-14,16-17,20],土壤与土壤恢复系数在0.20~0.60之间^[5,15,19,21];土壤与钢静摩擦因数在0.30~0.60之间^[5,13,21-22],土壤与钢滚动摩擦因数在0.04~0.20之间^[5,14,16,21,23],土壤与钢恢复系数在0.28~0.60之间^[15-16,20]。

2 试验材料与方法

2.1 试验方法与仪器

依托全膜双垄沟机械化覆土作业过程,分别通过土壤休止角及土壤与钢(溜土槽)滑动摩擦角的实测试验与仿真试验,标定土壤与土壤静摩擦因数、土壤与土壤滚动摩擦因数、土壤与土壤恢复系数、土壤与钢(溜土槽)静摩擦因数、土壤与钢(溜土槽)滚动摩擦因数及土壤与钢(溜土槽)恢复系数6个关键参数。

图3a所示为自制土壤休止角测定装置,主要由漏斗、支架、土壤堆积台和抽片等组成。其中,抽片和漏斗嘴上的插槽配合使用,装置支架可调节漏斗与土壤堆积台之间的垂直距离。如图3b所示,将田间耕作土壤装入土壤休止角测定装置,待土壤在漏斗内静止后瞬时拉出装置下端部抽片,并等土壤坡面稳定后,垂直拍照,导入CAD软件中标注土壤休



图3 土壤休止角测定
Fig.3 Determination of repose angle of soil-soil
1.漏斗 2.抽片 3.土壤堆积台 4.支架

止角(Y_{α})。

图4a所示为自制土壤-钢(溜土槽)滑动摩擦角测定装置,主要由拉伸装置、力学试验机、翻转合页、不锈钢溜土槽和绳索等组成。其中,翻转合页随着力学实验机的拉伸可绕轴向旋转90°,且为保证测定参数的准确性,装置选用钢材与实际溜土槽材料一致。如图4b所示,将田间耕作土壤装入土壤-钢(溜土槽)滑动摩擦角测定装置,通过设置万能力学试验机向上拉伸速度(20 mm/min),在绳索牵引下将平行连接有溜土槽的平板匀速提起,并使其缓慢倾斜。待溜土槽内土壤开始持续滑动时,平板倾斜角度即为土壤与钢(溜土槽)的滑动摩擦角,待土壤颗粒持续滑动稳定后,垂直拍照,导入CAD软件中标注土壤与钢(溜土槽)的滑动摩擦角(Y_{β})。

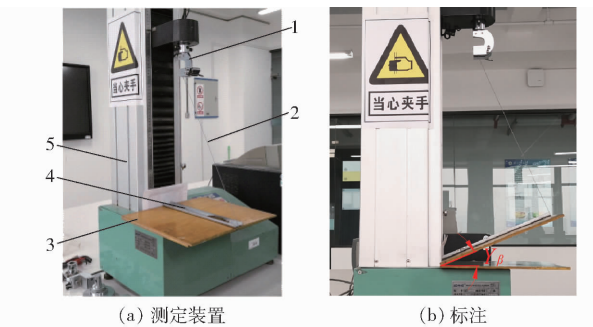


图4 土壤与钢滑动摩擦角测定
Fig.4 Determination of sliding friction angle of soil-steel
1.拉伸装置 2.绳索 3.翻转合页 4.不锈钢溜土槽 5.力学试验机

2.2 试验设计

依据全膜双垄沟机械化覆土过程中土壤与土壤、土壤与钢(溜土槽)的互动特性及其运动规律,选取土壤与土壤静摩擦因数 x_1 、土壤与土壤滚动摩擦因数 x_2 和土壤与土壤恢复系数 x_3 作为试验因素,以仿真土壤休止角 Y_{α} 作为评价指标;选取土壤与钢(溜土槽)静摩擦因数 x_4 、土壤与钢(溜土槽)滚动摩擦因数 x_5 和土壤与钢(溜土槽)恢复系数 x_6 作为试验因素,以仿真土壤与钢滑动摩擦角 Y_{β} 作为评价指标,分别进行三因素三水平正交回归模拟试验,选取的各试验因素编码如表1、2所示,各实施17组响应

面分析试验,每组仿真试验重复进行 3 次,取 3 次测试结果的平均值作为试验结果,通过应用 Design-Expert 8.06 进行数据处理分析^[24]。

表 1 仿真土壤休止角试验因素编码

Tab.1 Coding of simulation test factors of repose angle of soil-soil			
编码	因素		
	土壤与土壤静摩擦因数 x_1	土壤与土壤滚动摩擦因数 x_2	土壤与土壤恢复系数 x_3
-1	0.30	0.14	0.20
0	0.50	0.27	0.40
1	0.70	0.40	0.60

表 2 仿真土壤与钢滑动摩擦角试验因素编码

Tab.2 Coding of simulation test factors of sliding friction angle of soil-steel			
编码	因素		
	土壤与钢静摩擦因数 x_4	土壤与钢滚动摩擦因数 x_5	土壤与钢恢复系数 x_6
-1	0.30	0.04	0.28
0	0.45	0.12	0.44
1	0.60	0.20	0.60

2.3 仿真模型建立

由于全膜双垄沟覆膜土壤是在作业机旋耕刀组的高速转动切削过程中产生,其土壤颗粒的基本结构主要以球形块状颗粒为主,可由 EDEM 软件自带的球形颗粒单元进行土壤模型建立。为保证仿真与实际土壤的一致性,设置 EDEM 球形填充单元的半径为 3 mm,覆膜土壤颗粒及几何体的离散元模拟参数设置见表 3^[5,9,13-14,15-23]。

表 3 覆膜土壤颗粒及几何体的离散元模拟参数

Tab.3 DEM simulation parameters of covering soil on plastic film and geometry		
参数	数值	
	土壤	钢(溜土槽)
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2 600	7 865
泊松比	0.30	0.30
剪切模量/Pa	5.00×10^7	7.90×10^{10}
恢复系数(与土壤)	0.20~0.60	0.28~0.60
静摩擦因数(与土壤)	0.30~0.70	0.30~0.60
滚动摩擦因数(与土壤)	0.14~0.40	0.04~0.20

采用 EDEM 2018 软件进行土壤休止角测定(图 5)及土壤与钢滑动摩擦角测定(图 6)的建模仿真,仿真模型选用 Hertz-Mindlin (no slip) 接触模型,rayleigh 时间步长设置为 20%,计算时间步长为 0.01 s。待仿真结束后,将模型调整到正视视角,采用屏幕量角器 Screen Protractor 4.0 工具分别对土壤休止角、土壤与钢滑动摩擦角进行测量。

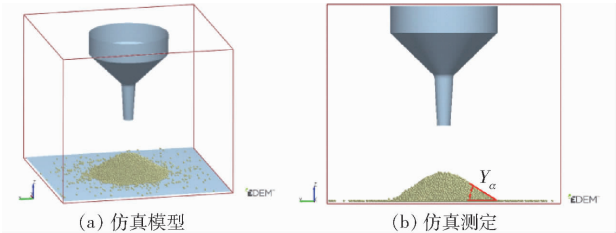


图 5 土壤休止角仿真模拟试验

Fig.5 Simulation test of repose angle of soil-soil

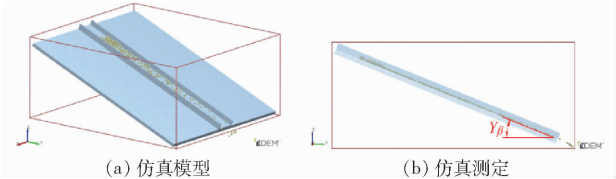


图 6 土壤与钢滑动摩擦角仿真模拟试验

Fig.6 Simulation test of sliding friction angle of soil-steel

3 试验结果与分析

3.1 实测试验结果

应用如图 3、4 所示的仪器与方法分别进行土壤休止角、土壤与钢滑动摩擦角的测定。每类试验重复 5 次,得到土壤休止角均值为 31.2°,土壤与钢滑动摩擦角均值为 22.6°。

3.2 仿真试验结果

3.2.1 土壤休止角

以各影响因素编码值为自变量,以仿真结果测得的土壤休止角(Y_α)为评价指标,构建不同试验组的几何体模型导入到 EDEM 中进行仿真试验,试验设计及结果如表 4 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为各变量编码值。

表 4 土壤休止角仿真试验设计与结果

Tab.4 Simulation test design and result of repose angle of soil-soil				
试验序号	X_1	X_2	X_3	$Y_\alpha/(^\circ)$
1	0	-1	1	29.5
2	0	-1	-1	26.2
3	1	-1	0	30.5
4	-1	0	1	23.8
5	1	1	0	37.3
6	1	0	-1	29.4
7	0	1	-1	34.4
8	1	0	1	31.7
9	0	1	1	30.3
10	-1	1	0	25.1
11	-1	0	-1	29.2
12	-1	-1	0	27.6
13	0	0	0	36.5
14	0	0	0	35.9
15	0	0	0	36.4
16	0	0	0	36.2
17	0	0	0	31.9

借助 Design-Expert 8.06 软件对试验结果进行分析,获得编码值表示的土壤休止角 Y_{α} 二次回归模型为

$$Y_{\alpha}=35.38+2.90X_1+1.66X_2-0.49X_3-3.42X_1^2-1.84X_2^2-3.44X_3^2+2.32X_1X_2+1.93X_1X_3-1.85X_2X_3$$

(1)

对上述二次回归模型进行方差分析和回归系数显著性检验,结果如表 5 所示。

表 5 土壤休止角回归方程方差分析

Tab.5 Variance analysis of soil-soil repose angle regression equation

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	266.74	9	29.64	8.33	0.005 3 **
X_1	67.28	1	67.28	18.92	0.003 4 **
X_2	22.11	1	22.11	6.22	0.041 4 *
X_3	1.90	1	1.90	0.53	0.488 4
X_1X_2	21.62	1	21.62	6.08	0.043 1 *
X_1X_3	14.82	1	14.82	4.17	0.080 5
X_2X_3	13.69	1	13.69	3.85	0.090 6
X_1^2	49.10	1	49.10	13.81	0.007 5 **
X_2^2	14.26	1	14.26	4.01	0.085 4
X_3^2	49.83	1	49.83	14.01	0.007 2 **
残差	24.90	7	3.56		
失拟	9.55	3	3.18	0.83	0.542 9
误差	15.35	4	3.84		
总和	291.64	16			

注：* 表示差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)。下同。

由表 5 分析可知,模型 $P(0.005\ 3)$ 小于 0.01,表明回归模型极显著;失拟项 $P(0.542\ 9)$ 大于 0.05,即失拟不显著,说明模型所拟合的二次回归方程与实际相符合,能正确反映土壤休止角 Y_{α} 与 X_1 、 X_2 、 X_3 之间的关系,回归模型可以较好地对优化试验中各种试验结果进行预测。其中模型的 X_1 、 X_1^2 、 X_3^2 对土壤休止角的影响极显著; X_2 和 X_1X_2 影响显著,其余各项均不显著。根据模型各因素回归系数的大小,可得到各因素对土壤休止角的影响主次顺序为: X_1 、 X_2 、 X_3 ,即土壤与土壤静摩擦因数、土壤与土壤滚动摩擦因数和土壤与土壤恢复系数。

3.2.2 土壤与钢滑动摩擦角

以各影响因素编码值为自变量,以仿真结果测得的土壤与钢滑动摩擦角 (Y_{β}) 为评价指标,构建不同试验组的几何体模型导入到 EDEM 中进行仿真试验,试验设计及结果如表 6 所示, X_4 、 X_5 、 X_6 为各变量编码值。

借助 Design-Expert 8.06 软件对试验结果进行分析,获得编码值表示的土壤与钢滑动摩擦角 Y_{β} 二

表 6 土壤与钢滑动摩擦角仿真试验设计与结果

Tab.6 Simulation test design and result of sliding friction angle of soil-steel

试验序号	X_4	X_5	X_6	$Y_{\beta}/(^{\circ})$
1	1	0	-1	44.6
2	-1	-1	0	21.6
3	0	1	1	22.3
4	0	1	-1	39.9
5	0	-1	1	17.8
6	-1	0	-1	22.3
7	-1	0	1	22.5
8	-1	1	0	19.3
9	0	-1	-1	17.1
10	1	1	0	46.5
11	1	-1	0	25.2
12	1	0	1	42.8
13	0	0	0	32.6
14	0	0	0	30.1
15	0	0	0	31.2
16	0	0	0	26.6
17	0	0	0	30.8

次回归模型为

$$Y_{\beta}=30.26+9.18X_4+5.79X_5-2.31X_6+3.33X_4^2-5.44X_5^2-0.54X_6^2+5.90X_4X_5-0.50X_4X_6-4.57X_5X_6$$

(2)

对上述二次回归模型进行方差分析和回归系数显著性检验,结果如表 7 所示。

表 7 土壤与钢滑动摩擦角回归方程方差分析

Tab.7 Variance analysis of soil-steel sliding friction angle regression equation

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	1 373.89	9	152.65	14.18	0.001 0 **
X_4	673.44	1	673.44	62.56	<0.000 1 **
X_5	267.96	1	267.96	24.89	0.001 6 **
X_6	42.78	1	42.78	3.97	0.086 4
X_4X_5	139.24	1	139.24	12.94	0.008 8 **
X_4X_6	1.00	1	1.00	0.093	0.769 4
X_5X_6	83.72	1	83.72	7.78	0.027 0 *
X_4^2	46.76	1	46.76	4.34	0.075 6
X_5^2	124.72	1	124.72	11.59	0.011 4 *
X_6^2	1.24	1	1.24	0.12	0.744 3
残差	75.35	7	10.76		
失拟	55.28	3	18.43	3.67	0.120 6
误差	20.07	4	5.02		
总和	1 449.24	16			

由表 7 分析可知,模型 $P(0.001\ 0)$ 小于 0.01,表明回归模型极显著;失拟项 $P(0.120\ 6)$ 大于 0.05,即失拟不显著,说明模型所拟合的二次回归方程与实际相符合,能正确反映土壤与钢滑动摩擦角 Y_{β} 与 X_4 、 X_5 、 X_6 之间的关系,回归模型可以较好地

优化试验中各种试验结果进行预测。其中模型的 X_4 、 X_5 和 X_4X_5 对土壤与钢滑动摩擦角的影响极显著; X_5^2 和 X_5X_6 影响显著,其余各项均不显著。根据模型各因素回归系数的大小,可得到各因素对土壤休止角的影响主次顺序为: X_4 、 X_5 、 X_6 ,即土壤与钢静摩擦因数、土壤与钢滚动摩擦因数和土壤与钢恢复系数。

3.3 最优标定参数确定

应用 Design-Expert 8.06 软件 Optimization - Numerical 模块,将 3.1 节实测试验目标参数土壤休止角 $Y_\alpha = 31.2^\circ$ 、土壤与钢滑动摩擦角 $Y_\beta = 22.6^\circ$ 代入回归方程(1)、(2),分别对回归模型进行所对应目标的优化求解,获得土壤休止角最优标定参数组合为: $x_1 = 0.68, x_2 = 0.27, x_3 = 0.21$;土壤与钢滑动摩擦角最优标定参数组合为: $x_4 = 0.31, x_5 = 0.13, x_6 = 0.54$ 。因此,全膜双垄沟机械化覆土仿真模型中土壤离散元所需参数如表 8 所示。

表 8 覆土作业过程仿真离散元模拟参数
Tab.8 Discrete element simulation parameters
of covering soil process

参数	数值	来源
土壤与土壤恢复系数	0.21	标定
土壤与钢(溜土槽)恢复系数	0.54	标定
土壤与土壤静摩擦因数	0.68	标定
土壤与钢(溜土槽)静摩擦因数	0.31	标定
土壤与土壤滚动摩擦因数	0.27	标定
土壤与钢(溜土槽)滚动摩擦因数	0.13	标定

4 试验验证

4.1 休止角、滑动摩擦角验证

为验证覆膜土壤颗粒及几何体最优参数组合的准确性,采用表 3、8 所示参数值进行离散元仿真试验,模拟土壤休止角及土壤与钢滑动摩擦角堆积情

况。每类试验重复 5 次,得到离散元模拟参数标定后土壤休止角、土壤与钢滑动摩擦角均值为 30.4° 和 21.9° ,两者相对误差分别为 2.6% 和 3.1%,表明经过模型参数标定与优化,全膜双垄沟覆膜土壤离散元模型较为准确。

4.2 覆土作业过程仿真与验证

为进一步验证全膜双垄沟覆土装置采用覆膜土壤颗粒优化标定接触参数后作业模型的准确性,采用离散单元法对装置覆土作业过程进行数值模拟。其中,覆土土壤颗粒选取球体颗粒建模,其直径设定为 3 mm,土壤与土壤、土壤与钢(溜土槽)接触模型选择 Hertz - Mindlin (no-slip),仿真试验参数设置如表 3、8 所示。仿真时间步长 1.405×10^{-5} s,是瑞利时间步的 40%,仿真共进行 2 s。根据全膜双垄沟覆土装置结构设计,覆土侧流槽角为 75° ,覆土直流槽角为 48° ,刮板升运带式提土器单侧刮板为 10 个,两刮板间距离设置为 130 mm,运动通过 EDEM 中 coupling server 面板,由动力学耦合来控制。依据覆土装置作业参数优化值,其前进速度为 0.70 m/s,刮板升运带式提土器线速度设置为 0.67 m/s^[1]。颗粒工厂是 160 mm × 180 mm 的长方形平面,单侧颗粒工厂每秒生成土壤颗粒数为 1.447×10^7 个。

图 7 所示为全膜双垄沟覆土装置在覆膜土壤颗粒及几何体最优标定参数组合设置下的种床覆土仿真过程。

在全膜双垄沟覆土模拟仿真前 0.15 s 内为土壤颗粒生成与刮板升运带式提土器填充时段(图 7a)。当仿真时间为 0.44 s 时(图 7b),刮板升运带上方土壤已经足量填充并开始逐渐进入覆土侧、直流槽;0.73 s 时(图 7c)覆土装置各溜土槽处均出现少量、不连续的土壤颗粒流;0.95 ~ 1.56 s 时(图 7d、7e、7f)覆土侧、直流槽内土壤逐步形成连贯的覆土颗粒流,且土壤颗粒流量逐渐增大;1.73 ~ 2.00 s(图 7g、

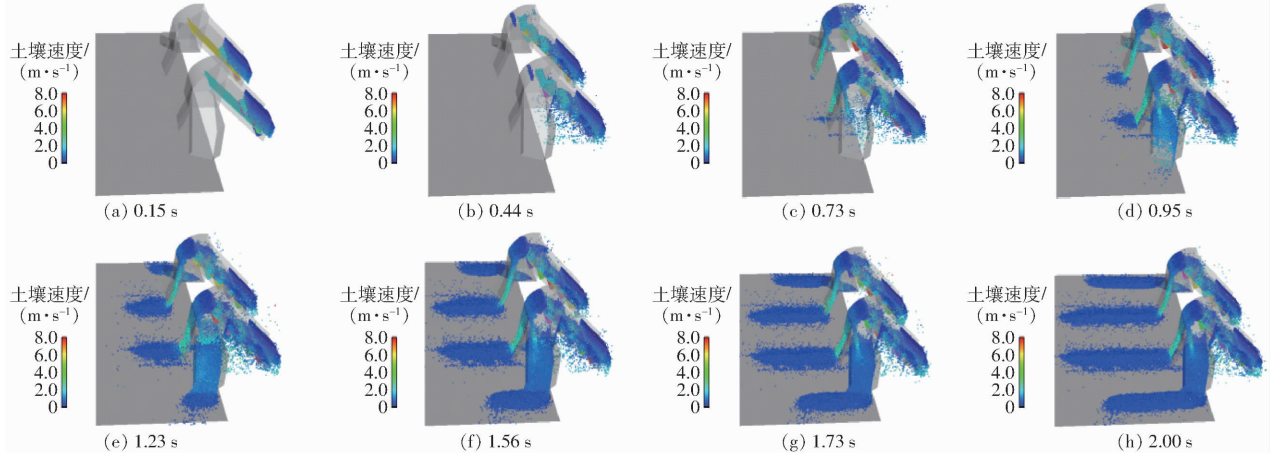


图 7 全膜双垄沟覆土过程仿真模拟结果

Fig.7 Simulation operation process of covering soil on whole plastic film mulching on double ridges

7h)全膜双垄沟覆土装置趋于稳定的覆土输送状态,所形成4条覆土带的土壤颗粒流厚度相对均匀一致,达到机械化覆土的作业要求。全膜双垄沟覆土过程仿真模拟(图8a)与田间覆土验证试验(图8b)基本一致,表明相关接触参数的优化标定可靠有效。

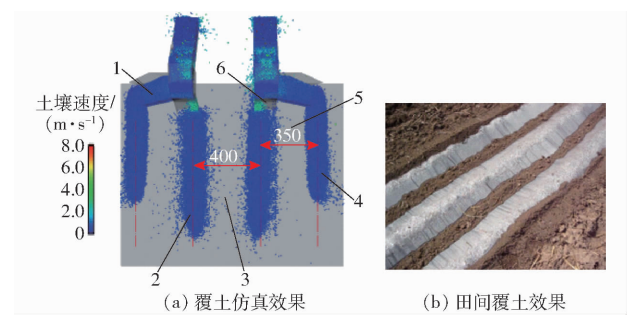


图8 覆土作业效果验证

Fig.8 Verification test of covering soil effort

1. 覆土侧流槽 2. 种床垄沟覆土带 3. 种床小垄 4. 种床大垄覆土带 5. 种床大垄 6. 覆土直流槽

5 结论

(1)结合 EDEM 软件进行土壤休止角测定及土壤与钢滑动摩擦角测定的建模仿真。通过三因素三水平正交组合试验,得出各因素对土壤休止角的影响

主次顺序依次为:土壤与土壤静摩擦因数、土壤与土壤滚动摩擦因数和土壤与土壤恢复系数;得出各因素对土壤与钢滑动摩擦角的影响主次顺序依次为:土壤与钢静摩擦因数、土壤与钢滚动摩擦因数和土壤与钢恢复系数。

(2)分别建立了各关键接触参数与土壤休止角、土壤与钢滑动摩擦角的二次多项式回归模型;以自制土壤休止角、土壤与钢滑动摩擦角试验装置测定结果作为优化的目标值,获得全膜双垄沟覆膜土壤离散元最优接触参数组合为:土壤与土壤静摩擦因数 0.68、土壤与土壤滚动摩擦因数 0.27、土壤与土壤恢复系数 0.21、土壤与钢静摩擦因数 0.31、土壤与钢滚动摩擦因数 0.13 和土壤与钢恢复系数 0.54。

(3)为验证所标定全膜双垄沟覆膜土壤接触参数的可靠性,对模拟仿真与实际试验的土壤休止角、土壤与钢滑动摩擦角进行了对比,两者相对误差分别为 2.6% 和 3.1%;应用离散单元法进行全膜双垄沟覆土装置在覆膜土壤颗粒最优标定参数组合设置下的种床覆土过程仿真模拟,通过与实际作业效果对比,验证了仿真试验与回归模型的有效性。

参 考 文 献

- [1] 戴飞,赵武云,马明义,等. 双垄耕作施肥喷药覆膜机工作参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(1):83-90. DAI Fei, ZHAO Wuyun, MA Mingyi, et al. Parameters optimization of operation machine for tillage-fertilization and spraying-filming on double ridges[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1):83-90. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160112&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.012. (in Chinese)
- [2] 戴飞,赵武云,石林榕,等. 基于近等速机构的玉米全膜双垄沟穴播机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(11):74-81. DAI Fei, ZHAO Wuyun, SHI Linrong, et al. Design and experiment of hill-seeder with whole plastic-film mulching on double ridges for corn based on mechanism with approximate constant speed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11):74-81. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161110&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.010. (in Chinese)
- [3] 戴飞,赵武云,张锋伟,等. 玉米全膜双垄沟残膜回收机作业性能优化与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(18):50-60. DAI Fei, ZHAO Wuyun, ZHANG Fengwei, et al. Optimization and experiment of operating performance of collector for corn whole plastic film mulching on double ridges[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(18):50-60. (in Chinese)
- [4] 付宏,王常瑞,靳聪,等. 农机部件数字化设计软件平台 AgriDEM 开发[J]. 农业工程学报,2017,33(7):1-9. FU Hong, WANG Changrui, JIN Cong, et al. Development of digital design software platform AgriDEM for agricultural machinery parts[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(7):1-9. (in Chinese)
- [5] UCGUI M, SAUNDERS C, FIELKE J M. Discrete element modelling of top soil burial using a full scale mouldboard plough under field conditions[J]. Biosystems Engineering, 2017, 160:140-153.
- [6] 韩丹丹,张东兴,杨丽,等. 内充气吹式玉米排种器工作性能 EDEM-CFD 模拟与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(13):23-31. HAN Dandan, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. EDEM-CFD simulation and experiment of working performance of inside-filling air-blowing seed metering device in maize[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13):23-31. (in Chinese)
- [7] 鹿芳媛,马旭,谭穗妍,等. 水稻芽种离散元主要接触参数仿真标定与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(2):93-99. LU Fangyuan, MA Xu, TAN Suiyan, et al. Simulative calibration and experiment on main contact parameters of discrete elements for rice bud seeds[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2):93-99. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180212&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.012. (in Chinese)
- [8] 蒋恩臣,孙占峰,潘志洋,等. 基于 CFD-DEM 的收获机分离室内谷物运动模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,

45(4):117-122.

JIANG Enchen, SUN Zhanfeng, PAN Zhiyang, et al. Numerical simulation based on CFD-DEM and experiment of grain moving laws in inertia separation chamber[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4):117-122. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140418&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.018. (in Chinese)

- [9] 王宪良,胡红,王庆杰,等. 基于离散元的土壤模型参数标定方法[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(12):78-85.
WANG Xianliang, HU Hong, WANG Qingjie, et al. Calibration method of soil contact characteristic parameters based on DEM theory[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12):78-85. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171209&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.009. (in Chinese)
- [10] 彭飞,王红英,方芳,等. 基于注入截面法的颗粒饲料离散元模型参数标定[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(4):140-147.
PENG Fei, WANG Hongying, FANG Fang, et al. Calibration of discrete element model parameters for pellet feed based on injected section method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4):140-147. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180416&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.016. (in Chinese)
- [11] 石林榕,孙伟,赵武云,等. 马铃薯种薯机械排种离散元仿真模型参数确定及验证[J]. 农业工程学报,2018,34(6):35-42.
SHI Linrong, SUN Wei, ZHAO Wuyun, et al. Parameter determination and validation of discrete element model of seed potato mechanical seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6):35-42. (in Chinese)
- [12] 王云霞,梁志杰,张东兴,等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[J]. 农业工程学报,2016,32(22):36-42.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, ZHANG Dongxing, et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22):36-42. (in Chinese)
- [13] 方会敏,姬长英,AHMED A T,等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(1):60-67.
FANG Huimin, JI Changying, AHMED A T, et al. Simulation analysis of straw movement in straw-soil-rotary blade system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1):60-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160109&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.009. (in Chinese)
- [14] 郑侃,何进,李洪文,等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(9):62-72.
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Research on polyline soil breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9):62-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160910&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.010. (in Chinese)
- [15] 赵淑红,刘宏俊,谭贺文,等. 仿旗鱼头部曲线型开沟器设计与性能试验[J]. 农业工程学报,2017,33(5):32-39.
ZHAO Shuhong, LIU Hongjun, TAN Hewen, et al. Design and performance experiment of opener based on bionic sailfish head curve[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5):32-39. (in Chinese)
- [16] 王金武,唐汉,王金峰,等. 悬挂式水田单侧修筑埂机数值模拟分析与性能优化[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(8):72-80.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng, et al. Numerical analysis and performance optimization experiment on hanging unilateral ridger for paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8):72-80. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170807&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.007. (in Chinese)
- [17] UCCUL M, SAUNDERS C, FIELKE J M. Discrete element modelling of tillage forces and soil movement of a one-third scale mouldboard plough[J]. Biosystems Engineering, 2017, 155:44-54.
- [18] 黄玉祥,杭程光,苑梦婵,等. 深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(7):80-88.
HUANG Yuxiang, HANG Chengguang, YUAN Mengchan, et al. Discrete element simulation and experiment on disturbance behavior of subsoiling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7):80-88. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160712&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.012. (in Chinese)
- [19] SUN Jiyu, WANG Yueming, MA Yunhai, et al. DEM simulation of bionic subsoilers (tillage depth > 40 cm) with drag reduction and lower soil disturbance characteristics[J]. Advances in Engineering Software, 2018, 119:30-37.
- [20] 赵淑红,王加一,陈君执,等. 保护性耕作拟合曲线型深松铲设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(2):82-92.
ZHAO Shuhong, WANG Jiayi, CHEN Junzhi, et al. Design and experiment of fitting curve subsoiler of conservation tillage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2):82-92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180211&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.011. (in Chinese)

- [15] 范旭辉,贾洪雷,张伟汉,等. 免耕播种机仿形爪式防堵清茬机构参数分析[J]. 农业机械学报,2011,42(10):56-60.
FAN Xuhui, JIA Honglei, ZHANG Weihai, et al. Parametric analysis of finger-type anti-blocking residue-cleaner for no-till planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 56-60. (in Chinese)
- [16] 林静,李宝筏,李宏哲. 阿基米德螺线型破茬开沟和切拔防堵装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(17):10-19.
LIN Jing, LI Baofa, LI Hongzhe. Design and experiment of archimedes spiral type stubble breaking ditching device and stubble breaking anti blocking device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(17): 10-19. (in Chinese)
- [17] 贾洪雷,刘行,余海波,等. 免耕播种机凹面爪式清茬机构仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(11):68-77.
JIA Honglei, LIU Hang, YU Haibo, et al. Simulation and experiment on the stubble clearance mechanism with concave claw-type for no-tillage planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11):68-77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181108&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.008. (in Chinese)
- [18] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:机械工业出版社,1988.
- [19] 张波屏. 播种机械设计原理[M]. 北京:机械工业出版社,1982:389-403.
- [20] 张才权. 水田耙星形耙片几何参数的研究[J]. 农业机械学报,1979,10(2):85-95.
ZHANG Caiquan. Research of geometric parameters of star-shape disc for paddy field harrow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1979, 10(2): 85-95. (in Chinese)
- [21] 庞声海. 关于滑切理论与滑切角的选用[J]. 华中农学院学报,1982(2):64-69.
- [22] ZHAO Jiale, HUANG Dongyan, JIA Honglei, et al. Analysis and experiment on cutting performances of high-stubble mazize stalks[J]. The International Journal of Agricultural and Biological Engineering,2017, 10(1):40-52.
- [23] 王金武,唐汉,王金峰,等. 悬挂式水田单侧修筑埂机数值模拟分析与性能优化[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(8):72-80.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng, et al. Numerical analysis and performance optimization experiment on hanging unilateral ridger for paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 72-80. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170807&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.007. (in Chinese)
- [24] 方会敏. 基于离散元法的秸秆-土壤-旋耕刀相互作用机理研究[D]. 南京:南京农业大学,2016.
FANG Huimin. Research on the straw-soil-rotary blade interaction using discrete element method[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [25] 任露泉. 试验设计及其优化[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [26] 任露泉. 回归设计及其优化[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [27] NY/T 1628—2008 玉米免耕播种机作业质量[S]. 2008.
- [28] NY/T 1768—2009 免耕播种机质量评价技术规范[S]. 2009.

(上接第56页)

- [21] 孙伟,刘小龙,石林榕,等. 刮板升运带式膜上覆土装置覆土特性[J]. 机械工程学报,2016,52(7):38-45.
SUN Wei, LIU Xiaolong, SHI Linrong, et al. Covering soil on plastic-film characteristics of scraper lifting belt mechanism [J]. Journal of Mechanical Engineering,2016,52(7): 38-45. (in Chinese)
- [22] ZENG Zhiwei, CHEN Ying, ZHANG Xirui, et al. Modelling the interaction of a deep tillage tool with heterogeneous soil[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 143: 130-138.
- [23] 戴飞,赵武云,宋学锋,等. 提土-全膜面覆土装置作业参数优化与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(11):88-96.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, SONG Xuefeng, et al. Operating parameter optimization and experiment of device with elevating and covering soil on plastic-film[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 88-96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171111&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.011. (in Chinese)
- [24] 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/OL]. 农业机械学报,2012,43(4):45-50.
YUAN Xue, QI Lijun, WANG Hu, et al. Spraying parameters optimization of swing, automatic variables and greenhouse mist sprayer with response surface method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 45-50. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120410&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.010. (in Chinese)