

微垄式覆膜覆土联合作业机设计与试验

戴飞¹ 宋学锋¹ 赵武云¹ 魏万成¹ 张锋伟¹ 马海军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: 为实现微型垄全膜覆盖种床机械化高性能构建,通过融合旱地全膜覆盖微垄膜面种植农艺技术要求,设计了微垄式覆膜覆土联合作业机,该机可实现起垄、覆膜、覆土一体化作业。对样机传动系统、覆土系统及垄体整形镇压装置等关键作业部件进行设计,结合相关作业性能要求,完成了覆膜种床覆土量、刮板式提土装置线速度等工作参数分析,确定了试验因素及其取值范围。以联合作业机前进速度、刮板式提土装置线速度和覆土装置倾角为自变量,种床构建合格率为响应值,建立了各试验因素与种床构建合格率的数学模型,得到各因素对种床构建合格率影响的主次顺序,获得微垄式覆膜覆土联合作业机最优工作参数为:联合作业机前进速度 0.71 m/s、刮板式提土装置线速度 0.50 m/s、覆土装置倾角 68°。田间验证试验表明,联合作业机种床构建合格率均值为 95.6%,较优化前有明显提升。应用离散单元法进行微垄式覆膜覆土联合作业机在最优工作参数下的“提土-输土-覆土”动态作业过程模拟,仿真结果与田间试验结果基本一致,说明联合作业机工作参数优化准确、可靠。

关键词: 微型垄; 覆膜覆土; 联合作业机; 离散单元法; 参数优化

中图分类号: S223.2⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)03-0097-09

OSID: 

Design and Experiment of Operation Machine for Filming and
Covering Soil on Tiny Ridges

DAI Fei¹ SONG Xuefeng¹ ZHAO Wuyun¹ WEI Wancheng¹ ZHANG Fengwei¹ MA Haijun²

(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: For further integration agronomic requirement of planting technique of tiny ridges surface with whole film covering in dry land, in order to meet the requirements of mechanical high performance construction seedbed of whole plastic-film mulching on tiny ridges, a combined operation machine was designed, which synchronously realized institutional operation once such as ridging, filming and covering soil on tiny ridges. Based on the prototype, the important working parts such as the driving system, covering soil system and ridge shaping-pressing device were designed. According to the requirements of related operation performance, the key working parameters such as the amount of soil covered on plastic-film mulching seedbed and the velocity of scraper type soil lifting device were analyzed, and the composition of test factors and their value range were determined. Response surface analysis was applied to optimize working parameters of the operation machine. Parameters such as the operation machine speed, the velocity of scraper type soil lifting device and the inclination angle of covering device were selected as independent variables, which would influence qualified rate of seedbed construction. The mathematical model was established, and then the effects of various parameters and their interactions were analyzed as well. The effects order of three parameters on qualified rate of seedbed construction was obtained. The optimal working parameters of operation machine were operation machine speed of 0.71 m/s, the velocity of scraper type soil lifting device of 0.50 m/s and the inclination angle of covering device of 68°. Confirmatory tests showed that the average value of qualified rate of seedbed construction was

收稿日期: 2019-07-22 修回日期: 2019-09-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51775115、51405086)、现代农业产业技术体系专项(CARS-14-1-28)和农业农村部西北农业装备重点实验室开放项目(2017NAE-01)

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

95.6% , compared with before the optimization it was promoted significantly. Application of discrete element method to simulate the dynamic operation process of elevating, conveying and covering soil under the condition of optimal parameters of operation machine. The simulation result was consistent with the field test conditions, which showed that the machine optimization operation parameters calculation was accurate and reliable.

Key words: tiny ridges; filming and covering soil; combined operation machine; discrete element method; parameters optimization

0 引言

长期以来,充分、高效利用天然降雨,确保粮食生产安全和农田生态系统可持续性,是黄土高原雨养区难以破解的理论难题和实践难题,解决问题的关键途径是研发和推广高效、低廉的旱作栽培技术^[1-4]。近年来,农技工作者在系统总结西北旱区全膜双垄沟播农艺技术特点的基础上,结合胡麻、小麦等密植作物的种植,集膜面种穴集雨、覆盖抑蒸、雨水富集叠加利用等原理,提出了旱地全膜覆盖微垄膜面种植技术,并开展了试验研究,取得了显著的抗旱增产效果^[5-6]。

旱地全膜覆盖微垄膜面种植技术要求完成微垄种床的耕整、垄体覆膜和垄沟与膜边覆土准备,然后在垄体膜面上实施播种作业^[7]。微垄覆膜种床在构建过程中产生的地膜破损、膜土耦合失效及微垄种床塌陷等均是影响该项农艺技术可靠推广的关键因素,因此,急需研发切实可行的耕整作业机具,制定配套技术规程。目前,国外种床覆膜覆土机械化程度高、机型先进,单行铺膜幅宽较大或可同步进行多行铺设,趋于向多功能方向发展。但同时受制于农艺要求、产品价格及不同的覆膜作业目的,国外覆

膜覆土机械不能够直接应用于西北旱区覆膜种床的构建^[8-9]。国内相关科研工作者与企业联合设计了1MLQS-40/70型起垄全铺膜联合作业机、全膜双垄沟播起垄施肥铺膜机、横腰带覆土式全膜双垄沟覆膜联合作业机和旱地小麦全膜覆土穴播联合作业机等多种类型的覆膜覆土联合作业机具^[10-12]。但是,上述作业机主要结合旱地玉米全膜双垄沟播、旱地小麦全膜覆土穴播等农艺技术进行配套研制,使得现有覆膜覆土联合作业机的工作性能并不能完全适应于全膜覆盖微垄膜面种植技术的要求^[5,12]。

为进一步提高全膜覆盖微垄种床机械化构建的可靠性与规范性,融合全膜覆盖微垄膜面种植农艺技术,同时考虑微型垄镇压易塌陷的特征,设计微垄式覆膜覆土联合作业机,以期有效解决上述问题。

1 整机结构与工作原理

1.1 结构组成

微垄式覆膜覆土联合作业机主要由三点悬挂装置、动力传递系统、旋耕刀组、刮板式提土装置、提土升运器张紧装置、垄体覆膜装置、碎土-覆土装置、垄体整形镇压装置等部件组成,其具体结构如图1所示。

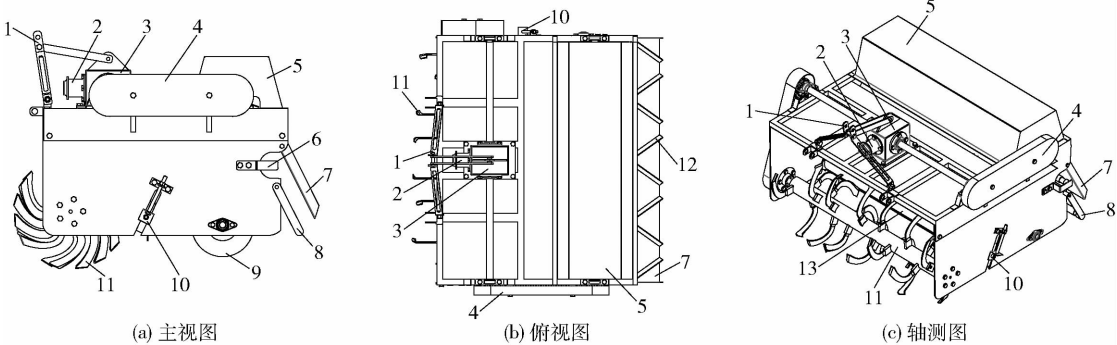


图 1 微垄式覆膜覆土联合作业机结构图

Fig. 1 Structure diagram of operation machine for filming and covering soil on tiny ridges

1. 悬挂架 2. 万向节 3. 变速箱 4. 传动装置 5. 碎土-覆土壳体 6. 挂膜架 7. 覆土装置 8. 展膜辊 9. 垄体整形镇压装置 10. 提土升运器张紧装置 11. 旋耕刀组 12. 溜土槽 13. 刮板式提土装置

其中,联合作业机种床耕整系统由旋耕刀组和垄体整形镇压装置组成;覆膜系统由挂膜架和展膜辊组成;覆土系统由刮板式提土装置、提土升运器张紧装置、碎土-覆土壳体、碎土齿及携有 4 对 V 型溜

土槽的覆土装置组成。

1.2 传动系统与工作原理

微垄式覆膜覆土联合作业机传动系统如图 2 所示,机具以三点后悬挂方式与四轮拖拉机联接,并在

联轴器和变速箱的共同作用下将动力分别传递至左、右两侧动力轴上。其中,左侧动力轴进一步通过传动链带动刮板式提土装置升运转动作业,而右侧动力轴驱动旋耕刀组作业。后置的凸齿式镇压辊、挂膜架及展膜辊则随着机具前进随动转动作业。

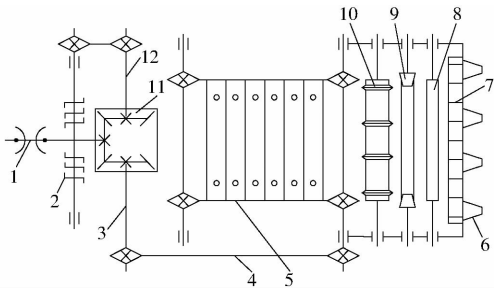


图 2 联合作业机传动系统示意图

Fig.2 Schematic of transmission system

1. 联轴器 2. 旋耕刀组 3. 左侧动力轴 4. 传动链 5. 刮板式提土装置 6. 覆土装置 7. 碎土齿 8. 展膜辊 9. 挂膜架 10. 垄体整形镇压装置 11. 变速箱 12. 右侧动力轴

作业机在田间工作时采用四轮拖拉机后置三点悬挂方式,将拖拉机动力输入至变速箱并传动至左侧动力轴,带动旋耕刀组将种床土壤切削疏松,将部分土壤高速旋切至刮板式提土装置表面;而右侧动力轴通过传动链带动刮板式提土装置顺时针方向转动,并将抛送的土壤倾斜提升至碎土-覆土壳体内,且与碎土齿互动撞击后顺着覆土装置溜土槽向下滑落。与此同时,垄体整形镇压装置对旋耕种床土壤进行压实塑形,后置地膜随挂接装置同步转动,在展膜辊的辅助作用下实现对微型垄体均匀覆膜,并在膜边、垄沟所对应覆土装置溜土槽内分流土壤的掩埋下完成微垄种床的覆膜覆土作业。

1.3 主要技术指标

旱地全膜覆盖微垄膜面种植技术农艺栽培模式如图 3 所示。微垄覆膜种床宽度为 320 mm,高度为 30~40 mm,应用微垄式覆膜覆土联合作业机挂接幅宽为 1 200 mm 的地膜一次性构建 3 组覆膜微型

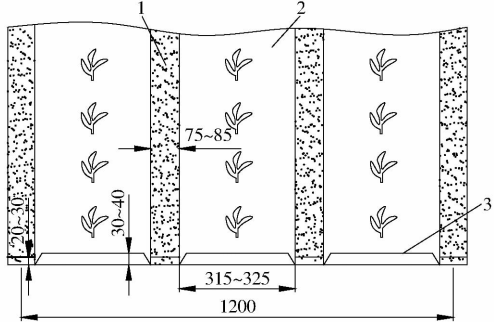


图 3 旱地全膜覆盖微垄膜面种植技术农艺栽培模式

Fig.3 Cultivation pattern of planting technique of tiny

ridges surface with whole film covering in dry land

1. 垄沟覆膜土带 2. 覆盖地膜 3. 微型垄体

垄体,微垄间的覆土带宽度为 80 mm,实行大田全域地膜覆盖,最后在覆膜微垄表面上完成播种作业。

结合甘肃省全膜微垄覆膜种床构建特点和耕整作业所需动力计算,微垄式覆膜覆土联合作业机主要技术参数如表 1 所示。

表 1 作业机主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of operation machine

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 500×1 500×900
配套动力/kW	22
整机质量/kg	246
作业速度/(km·h ⁻¹)	1.80~3.24
生产率/(hm ² ·h ⁻¹)	0.22~0.36
旋耕深度/mm	100~120
起垄高度/mm	30~40
起垄宽度/mm	315~325
覆土宽度/mm	75~85
覆土厚度/mm	20~30
采光面地膜机械破损程度/(mm·m ⁻²)	≤50
挂接地膜宽度/mm	1 200
挂接地膜厚度/mm	≥0.01

2 关键部件设计与工作参数分析

2.1 输土-种床覆土装置

如图 4 所示,输土-种床覆土装置主要由刮板式提土装置、提土升运器张紧装置、碎土-覆土壳体(壳体下方连接有 40 根碎土齿,有利于将旋耕升运土壤进一步触碰细化,避免尺寸较大的土石块落入覆膜垄沟)和覆土装置(其上设置有 4 组 V 型溜土槽,分别与微垄全覆膜种床膜边及垄沟相对应)等部件组成,覆土装置能够根据覆土效果对其竖直方向夹角 θ 进行调整。依据前期土壤与溜土钢槽动摩擦角测定均值(21.9°)及对刮板式覆土装置抛送土壤后溜土槽的最佳倾角试验优化,对覆土装置倾角

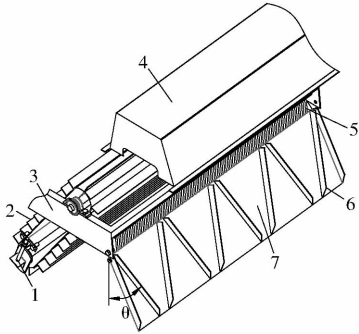


图 4 输土-种床覆土装置结构简图

Fig.4 Structural diagram of soil transporting-covering mechanism

1. 提土升运器张紧装置 2. 刮板式提土装置 3. 机架 4. 碎土-覆土壳体 5. 碎土齿 6. V 型溜土槽 7. 覆土装置

θ 值圆整后应保持在 $42^{\circ} \sim 68^{\circ}$ 。^[13-14]

如图 5 所示,依据全膜覆盖微垄膜面种植技术农艺要求,进行覆膜微垄种床机械化构建。

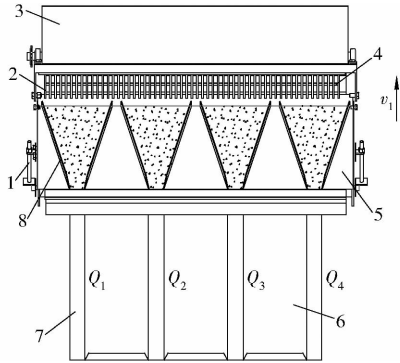


图 5 种床覆土作业过程

Fig. 5 Schematic of operation process of covering soil on seedbed

1. 提土升运器张紧装置 2. 碎土齿 3. 碎土-覆土壳体 4. 刮板式提土装置 5. 覆土装置 6. 微型垄体 7. 垄沟覆土带 8. V 型溜土槽

当联合机进行覆膜覆土作业时,在右侧动力轴的转动下带动刮板式提土装置运转,前置旋耕刀组将切削的部分土壤抛送至刮板式提土装置并进行顺时针倾斜旋转快速提升。高速升运的土壤在刮板式提土装置输送至最高处时被瞬时翻转、惯性甩出,并与覆土罩壳上连接等距排布的碎土齿连续撞击,使得进入覆土装置上的土壤更加细致均匀。当覆膜土壤落入覆土装置上的 V 型溜土槽后在其自身重力与覆土装置倾角的共同作用下落入已覆膜种床的膜边及垄沟内。

2.2 覆膜种床覆土量

覆膜种床覆土量是影响全膜微垄生产系统功能稳定的关键因素之一,覆土量过大或过小均会对其种床构建效果产生影响。当垄沟内覆土量过大时,覆膜种床有效采光面积减小,微型垄体高度不显著,严重制约了“增温集雨”的生产功能;而当覆土量过小时,覆膜种床不易紧贴地表沉降,难以抵挡外界自然风力揭膜,致使种床“覆盖抑蒸”的功能失效。因此,为保证作业机输土-种床覆土装置工作过程中对微型覆膜种床覆土作业的一致性与稳定性,便于样机工作参数优化选取,需对其覆土量进行计算。

种床覆土作业过程如图 5 所示,规定样机工作行走 1 000 mm 为一个测试区域,对相关覆土量进行计算,微型覆膜种床的覆土量为

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \tag{1}$$

式中 Q ——覆膜种床的覆土量,kg

$Q_1、Q_2、Q_3、Q_4$ ——4 对 V 型溜土槽对应的覆土量,kg

由作业机的输土-种床覆土装置结构可以看出,4 对 V 型溜土槽各自的覆土量对应相等,则有

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = \gamma L_1 B_1 h \tag{2}$$

式中 γ ——土壤(黄绵土)容重,取 $1\,300\text{ kg/m}^3$ ^[15]
 L_1 ——样机工作行走距离,为 1 000 mm
 B_1 ——垄沟覆膜土带宽度,取 80 mm
 h ——覆土厚度,取 25 mm

由式(2)计算分别得出: $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = 2.60\text{ kg}$ 。

则计算得出联合作业机进行一个试验区域种床机械化构建所需的覆土量 $Q = 10.40\text{ kg}$ 。

2.3 刮板式提土装置

刮板式提土装置结构及其工作过程如图 6 所示,当输送覆膜土壤填充至刮板式提土装置中且稳定倾斜升运时,在土壤重力作用下,两刮板之间及其填充土壤形成了一个闭合的直角三角形。

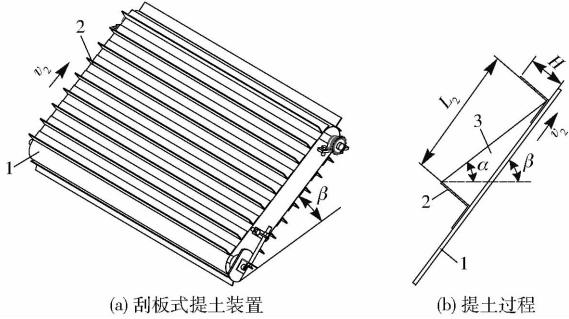


图 6 刮板式提土装置作业过程

Fig. 6 Schematics of operation process of scraper type soil lifting device

1. 土壤升运带 2. 土壤升运刮板 3. 覆膜土壤

依据图 6b 所示几何关系,可得土壤升运刮板高度为

$$H = L_2 \tan(\beta - \alpha) \tag{3}$$

式中 L_2 ——刮板式输送器土壤升运刮板间距,为 0.12 m

β ——刮板式输送器倾斜角,选取 40° ^[12]
 α ——土壤(黄绵土)的内摩擦角,取 28° ^[16]

由式(3)计算得出土壤升运刮板高度 $H = 0.03\text{ m}$ 。

为保障覆膜微垄种床覆盖地膜能够快速沉降,且与整形镇压垄体表面充分贴合,联合作业机刮板式提土装置应升运输送充足的土壤对种床膜边、垄沟进行均匀连续覆土。当提土装置线速度过大时,升运土壤翻转惯性大,部分土壤不经过 V 型溜土槽而直接散落至微垄膜面,造成地膜有效采光面积减少,种床增温效果不显著。若提土装置线速度过小时,升运土壤不能有效供给,致使 V 型溜土槽内的覆膜土壤不能形成持续颗粒流,造成覆膜种床膜边、垄沟内覆土不均匀或者漏覆现象,导致种床覆盖抑蒸、抗风揭膜功能失效。因此,刮板式提土装置线速

度是影响覆膜覆土性能的关键作业因素。根据图5种床覆土过程进行分析,作业机刮板式提土装置确保了覆膜种床所需覆土量,则其提升线速度为^[17]

$$v_2 = \frac{Q}{tB_2H\gamma\varphi k} \tag{4}$$
$$t = \frac{L_1}{v_1}$$

其中 v_2 ——刮板式提土装置提升线速度, m/s
 B_2 ——土壤升运带宽度, 为 1.40 m
 φ ——刮板式输送机填充系数, 取 0.80^[17]
 k ——倾斜系数, 根据刮板式提土装置倾斜角为 40°, 查表取 0.43^[17]
 t ——联合作业机行走 1 000 mm 所需时间, s
 v_1 ——联合作业机前进速度, 为 0.5~0.9 m/s
由式(4)计算得出刮板式提土装置提升线速度 v_2 为 0.28~0.50 m/s。

2.4 垄体整形镇压装置

联合作业机垄体整形镇压装置主要由镇压轴及其上端设有的 4 组整形镇压凸齿组成, 其结构如图 7 所示。

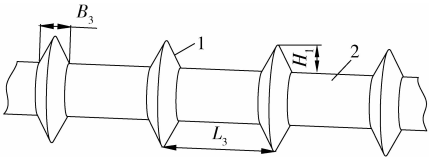


图7 垄体整形镇压装置

Fig.7 Composition of ridge shaping-pressing mechanism

1. 整形镇压凸齿 2. 镇压轴

由于构建种床为微型垄体, 垄体高度仅为 30~40 mm, 为避免采用传统覆膜覆土作业后再进行镇压所引起的垄体塌陷、地膜架空等问题, 在机械化作业过程中先应用该装置进行整形镇压, 后完成覆膜覆土作业工序。依照全膜覆盖微垄栽培模式, 设计的垄体整形镇压装置镇压轴上相邻两凸齿之间的距离 L_3 = 320 mm, 凸齿宽度 B_3 = 80 mm, 凸齿高度 H_1 = 45 mm。

3 试验材料与方法

3.1 试验材料

2018 年 4 月, 在甘肃省洮河拖拉机制造有限公司-甘肃农业大学临洮旱作农机装备专家大院试验田进行了微垄式覆膜覆土联合作业机田间工作性能试验。试验地面积为 0.60 hm², 土壤为黄绵土, 土壤含水率 14.9%~16.1%, 土壤容重 1 300 kg/m³, 坚实度小于 0.16 MPa, 田间表面平整。联合作业机配套动力为 22 kW 的洮河 304 型轮式拖拉机, 作业速度控制在 0.5~0.9 m/s, 试验前对联合作业机进行调试, 在地膜挂接架上安装(白色)卷状地膜(厚度

为 0.01 mm, 幅宽为 1 200 mm)。

3.2 试验方法

试验参照 NY/T 987—2006《铺膜穴播机作业质量》标准^[18]和旱地全膜覆盖微垄膜面种植技术对覆膜种床构建作业效果的要求^[19](种床起垄高度为 30~40 mm, 起垄宽度为 315~325 mm, 覆土宽度为 75~85 mm, 覆土厚度为 20~30 mm, 采光面地膜机械破损程度小于等于 50 mm/m², 符合该条件确定为种床构建合格), 以微垄式覆膜覆土联合作业机种床构建合格率为评价指标, 进行样机工作参数优化试验^[14-15]。选取 10 m×1.6 m 试验田为测试区, 在覆膜微型垄体上选取 0.2 m×1.6 m 的面积为一个测试点, 应用钢卷尺、游标卡尺进行种床构建合格率测定。种床构建合格率测定计算式为^[20]

$$Y = \frac{N_1}{N} \times 100\% \tag{5}$$

式中 Y ——种床构建合格率, %
 N_1 ——种床构建合格测试点数, 个
 N ——总试验测试点数, 个

3.3 试验设计

依据微垄式覆膜覆土联合作业机关键部件设计与工作参数分析结果, 分别选取联合作业机前进速度 x_1 (0.5~0.9 m/s)、刮板式提土装置线速度 x_2 (0.28~0.50 m/s) 和覆土装置倾角 x_3 (42°~68°) 作为试验因素, 以种床构建合格率 Y 作为评价指标。试验采用三因素三水平响应曲面分析方法, 选取各试验因素编码如表 2 所示, 共实施 17 组响应面分析试验(表 3), 每组试验重复进行 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 8.0.6 软件进行数据处理分析^[21-22]。

表2 试验因素编码
Tab.2 Coding of test factors

编码	因素		
	联合作业机前进速度 $x_1/(m \cdot s^{-1})$	刮板式提土装置线速度 $x_2/(m \cdot s^{-1})$	覆土装置倾角 $x_3/(^{\circ})$
-1	0.5	0.28	42
0	0.7	0.39	55
1	0.9	0.50	68

4 试验结果与分析

4.1 回归模型建立与检验

试验结果如表 3 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值, 微垄式覆膜覆土联合作业机的种床构建合格率达 65.8%~92.2%。其中, 种床构建合格率在 80% 以上的试验组占试验总组数的 70.59%, 表明微垄式覆膜覆土联合作业机总体的覆膜覆土工作性能良

好,但试验过程中其覆膜覆土性能稳定性及种床机械化构建质量变化波动较大。

表 3 响应面分析结果
Tab.3 Results of response surface analysis

试验号	X_1	X_2	X_3	$Y/\%$
1	-1	-1	0	78.6
2	-1	0	1	83.2
3	0	1	-1	90.6
4	-1	0	-1	84.9
5	0	0	0	86.1
6	0	1	1	92.2
7	0	-1	-1	89.6
8	1	0	-1	75.5
9	1	0	1	76.3
10	1	-1	0	65.8
11	1	1	0	83.4
12	0	0	0	85.3
13	0	0	0	81.6
14	0	0	0	85.7
15	-1	1	0	81.9
16	0	-1	1	71.2
17	0	0	0	88.8

借助 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行分析,获得种床构建合格率 Y 二次回归模型为

$$Y = 85.50 - 3.45X_1 + 5.36X_2 - 2.21X_3 - 7.00X_1^2 - 1.08X_2^2 + 1.48X_3^2 + 3.57X_1X_2 + 0.63X_1X_3 + 5.00X_2X_3$$

(6)

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 4 所示。

表 4 回归方程方差分析
Tab.4 Variance analysis of regression equation

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
回归	736.69	9	81.85	9.33	0.003 8 **
X_1	95.22	1	95.22	10.85	0.013 2 *
X_2	230.05	1	230.05	26.22	0.001 4 **
X_3	39.16	1	39.16	4.46	0.072 5
X_1X_2	51.12	1	51.12	5.83	0.046 5 *
X_1X_3	1.56	1	1.56	0.18	0.685 7
X_2X_3	100.00	1	100.00	11.40	0.011 8 *
X_1^2	206.32	1	206.32	23.51	0.001 9 **
X_2^2	4.87	1	4.87	0.55	0.480 7
X_3^2	9.16	1	9.16	1.04	0.340 9
残差	61.42	7	8.77		
失拟	34.88	3	11.63	1.75	0.294 7
误差	26.54	4	6.64		
总和	798.11	16			

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

由表 4 分析可知,建立二次回归模型的 P 值

(0.003 8) 小于 0.01,表明回归模型极其显著;失拟项 $P > 0.05$,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,能正确反映种床构建合格率 Y 与因素 X_1 、 X_2 、 X_3 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。其中模型的一次项 X_2 和二次项 X_1^2 对种床构建合格率的影响极显著; X_1 和交互项 X_1X_2 、 X_2X_3 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,可得到各因素对种床构建合格率的影响主次顺序为: X_2 、 X_1 、 X_3 。

试验过程中发现,覆土装置溜土槽排出土壤量、均匀程度及覆土装置倾角都直接关系到种床垄沟、膜边覆土质量,是影响种床构建合格率的关键因素。同时,输土—种床覆土装置可根据联合作业机前进速度的变化对刮板式提土装置线速度、覆土装置倾角进行工作参数调整,以确保种床覆土量的适宜与稳定。

4.2 模型交互项的解析

根据式(6)作出各因素之间关系的响应面图(图 8~10),响应曲面的形状能够反映交互因素作用的强弱。

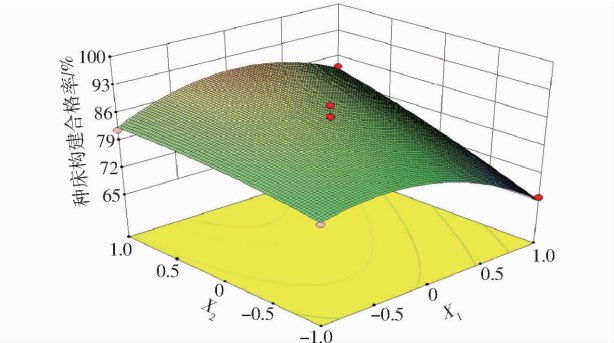


图 8 联合作业机前进速度与刮板式提土装置线速度对种床构建合格率的影响

Fig.8 Impact of operation machine speed and soil elevating scraper belt device speed on qualified rate of seedbed construction

由图 8 可知,当微垄式覆膜覆土联合作业机前进速度在 0.7~0.9 m/s 之间、刮板式提土装置线速度为 0.28~0.39 m/s 时,种床构建合格率相对较低,基本保持在 65%~79% 之间,且由响应曲面变化趋势看出刮板式提土装置线速度对种床构建合格率的影响明显大于联合作业机前进速度。这主要是在微垄种床机械化构建过程中,联合作业机前进速度加快时种床垄体整形、覆膜速率相应增大,因此需要充足且适宜的土壤对垄沟、膜边进行覆盖,但此时所对应的刮板式提土装置线速度较低,无法及时将所需覆膜土壤后置抛送,影响了覆膜覆土作业的协同性与可靠性。

由图 9 可以看出,当联合作业机前进速度控制

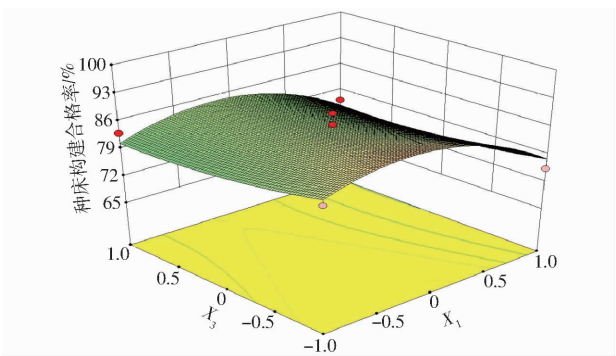


图 9 联合作业机前进速度与覆土装置倾角对种床构建合格率的影响

Fig. 9 Impact of operation machine speed and inclination angle of covering device on qualified rate of seedbed construction

在 0.5 ~ 0.7 m/s 之间、覆土装置倾角为 55° ~ 68° 时,种床构建合格率相对较高 (79% ~ 86%),由偏回归分析可以看出,联合作业机前进速度与覆土装置倾角的交互作用对微垄覆膜种床构建合格率影响并不显著,这与方差分析结果相同。

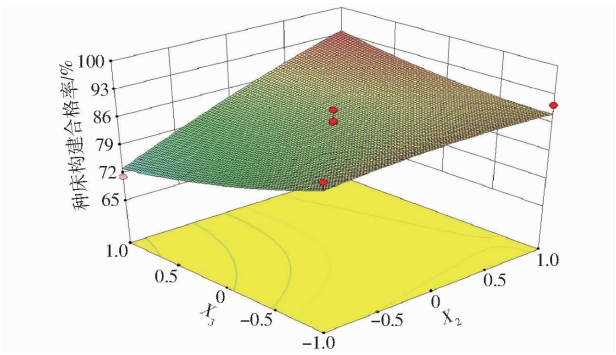


图 10 刮板式提土装置线速度与覆土装置倾角对种床构建合格率的影响

Fig. 10 Impact of soil elevating scraper belt device speed and inclination angle of covering device on qualified rate of seedbed construction

由图 10 可以看出,当联合作业机覆土装置倾角为 68°,刮板式提土装置线速度由 0.28 m/s 递增至 0.50 m/s 时,其种床构建合格率呈现出持续递增的总体变化趋势(由 71.2% 线性递增至 92.2%)。通过响应曲面变化趋势可得刮板式提土装置线速度对种床构建合格率的影响显著高于覆土装置倾角。产生该现象的主要原因是刮板式提土装置线速度不断增大时,不仅加快了其对旋耕土壤的升运输送速率,而且使覆膜土壤向后抛掷的惯性力增加,加剧了覆膜土壤与罩壳碎土齿的充分互作效应,使覆膜土壤颗粒度进一步细化,保障了种床构建合格率的持续稳定性。

4.3 参数优化与试验验证

为保证微垄式覆膜覆土联合作业机工作时种床

构建合格率为 100%,应用 Design-Expert 8.0.6 软件中 Optimization – Numerical 模块对回归方程模型进行该目标下的优化求解,得到联合作业机最优工作参数:联合作业机前进速度为 0.71 m/s、刮板式提土装置线速度为 0.50 m/s、覆土装置倾角为 68°。

为验证式(6)的可靠性,采用微垄式覆膜覆土联合作业机在最优作业参数配置下进行种床构建中覆膜覆土作业性能验证试验。试验结果表明,验证试验的种床构建合格率均值为 95.6%,较优化前种床构建合格率(65.8% ~ 92.2%)有明显提升,表明在优化作业参数条件下能够改善微垄种床垄沟、膜边的覆土质量,降低采光面地膜机械破损程度,缓解覆土作业过程中普遍出现的土壤颗粒流“飞溅、脉动”现象,符合旱地全膜覆盖微垄膜面栽培技术要求,因此该回归模型是可靠的。

5 覆土作业过程模拟

5.1 参数设置

为进一步研究微垄式覆膜覆土联合作业机设置最优工作参数后所呈现出的“提土-输土-覆土”动态工作特性,采用离散单元法对样机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,土壤颗粒-土壤颗粒、土壤颗粒-提土装置刮板、壁面接触模型选择 Hertz – Mindlin (no-slip),仿真试验参数设置如表 5 所示^[13,23]。

表 5 物性及接触参数

Tab. 5 Parameters of materials and contact

项目	参数	数值
土壤颗粒	泊松比	0.4
	剪切模量/Pa	1.0×10^6
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 364
刮板、壁面	泊松比	0.28
	剪切模量/Pa	3.5×10^{10}
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 850
土壤颗粒-土壤颗粒	恢复系数	0.21
	静摩擦因数	0.68
	动摩擦因数	0.27
土壤颗粒-刮板、壁面	恢复系数	0.54
	静摩擦因数	0.31
	动摩擦因数	0.13

仿真时间步长为 1.405×10^{-5} s,是瑞利时间步的 40%,仿真共进行 2.5 s。根据输土-种床覆土装置结构设计,刮板式提土装置上设置有 20 个刮板,两刮板间距为 0.12 m,刮板高度为 0.03 m,运动通过 EDEM 中 coupling server 面板,由动力学耦合来控制。依据样机工作参数优化值,刮板式提土装置线速度设置为 0.50 m/s,模型的覆土装置倾角设置为

68°。仿真过程中颗粒工厂为 1 400 mm × 180 mm 的长方形平面,颗粒工厂生成土壤颗粒数为 5.80×10^7 个/s。

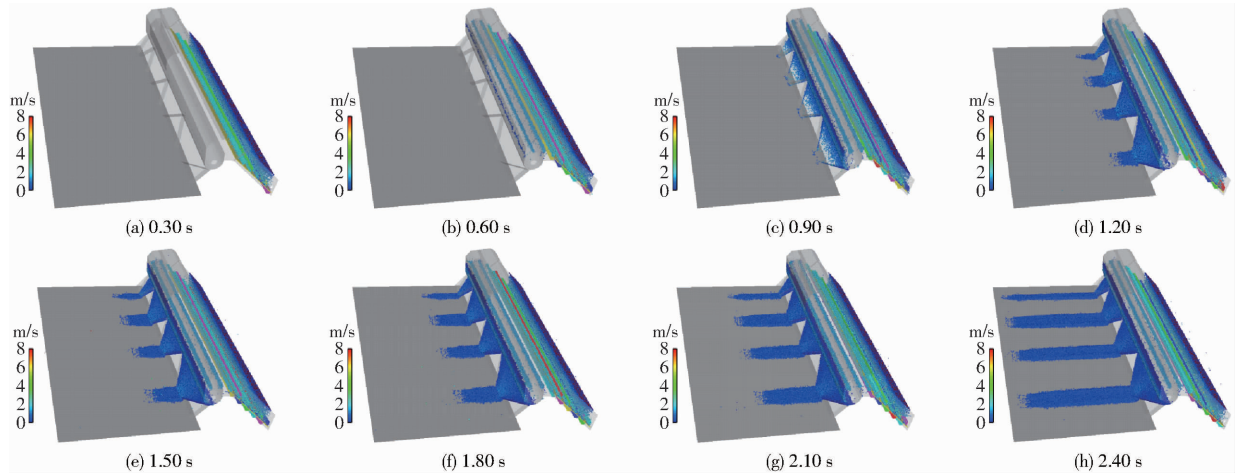


图 11 输土-种床覆土过程仿真模拟

Fig. 11 Simulation operation process of elevating and covering soil on seedbed

在联合作业机输土-种床覆土过程模拟仿真的前 0.30 s 时间段为土壤颗粒持续生成与刮板式提土装置开始逐步填充阶段(图 11a)。当仿真时间为 0.60 s 时(图 11b),已经填充足量土壤颗粒的刮板式提土装置开始逐渐进入碎土-覆土壳体,可以看出刮板式提土装置线速度是直接决定种床覆土量的关键因素。在作业过程持续至 0.90 s 时(图 11c),与碎土齿相互作用后的少量覆膜土壤颗粒缓缓出现在 4 组 V 型溜土槽上,形成不连续的土壤颗粒流。由图 11d 可以看出,在仿真时间为 1.20 s 时种床表面已经开始出现较为稳定均匀的覆土带,并在 1.50 s 左右罩壳碎土齿部位逐步形成连贯的土壤颗粒流,且流量逐渐增大。当 1.80 ~ 2.40 s 时(图 11f ~ 11h)整个输土-种床覆土过程趋于稳定的覆土输送状态,此时同一高度的土壤颗粒流厚度相对均匀一致,刮板式提土装置表面仅有少数飞溅土壤颗粒。所以,刮板式提土装置线速度与覆土装置倾角的匹配至关重要,当土壤传输线速度一定、覆土装置倾角较大时,覆膜土壤会在 V 型溜土槽内滞留,造成覆土带不连续,覆土量不均匀;而当覆土装置倾角一定、土壤传输线速度不断增大时,覆膜土壤瞬时剧增,导致在碎土-覆土壳体内出现堵塞而不能持续排出,使得 V 型溜土槽内无充足覆土颗粒流,影响覆土作业质量。因此,适宜的刮板式提土装置线速度与覆土装置倾角交互选取,使得覆膜土壤颗粒流最终呈现出“幕帘状”而不断持续下落,达到种床构建合格的覆土作业要求^[24]。联合作业机输土-种床覆土过程仿真模拟与实际种床构建合格率验证试验(图 12a)基本一致,由种床构建实际效果(图 12b)

5.2 输土-种床覆土仿真

图 11 所示为微垄式覆膜覆土联合作业机在最优工作参数下的输土-种床覆土仿真模拟过程。

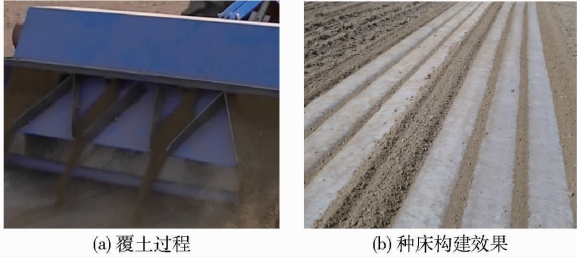


图 12 种床构建合格率验证试验

Fig. 12 Verification tests of qualified rate of soil cover

表明相关工作参数的优化选取可靠有效。

6 结论

- (1)通过融合旱地全膜覆盖微垄膜面种植农艺技术要求,设计了微垄式覆膜覆土联合作业机,确定了样机传动系统,并对其输土-种床覆土装置、刮板式提土装置结构及垄体整形镇压装置等关键作业部件进行设计,结合相关作业性能要求,完成了覆膜种床覆土量、刮板式提土装置线速度等关键工作参数的分析计算。
- (2)应用响应曲面分析法,建立种床构建合格率与联合作业机前进速度、刮板式提土装置线速度、覆土装置倾角的二次多项式回归模型。以种床构建完全合格($Y = 100\%$)为目标,获得微垄式覆膜覆土联合作业机最优工作参数:联合作业机前进速度为 0.71 m/s、刮板式提土装置线速度为 0.50 m/s、覆土装置倾角为 68°。田间验证试验表明,联合作业机的种床构建合格率均值为 95.6%,较优化前有明显提升。
- (3)应用离散单元法进行微垄式覆膜覆土联合作业机最优工作参数下“提土-输土-覆土”动态作

业过程模拟,仿真结果与田间试验结果基本一致,表明该联合作业机工作参数的优化计算可靠、有效,样机作业性能符合旱地全膜覆盖微垄膜面种植农艺技术要求。

参 考 文 献

[1] GAN Y T, KADAMBOT H M S, NEIL C T, et al. Chapter seven-ridge-furrow mulching systems-an innovative technique for boosting crop productivity in semiarid rain-fed environments[J]. *Advances in Agronomy*, 2013, 118(1): 429 – 476.

[2] 莫非,周宏,王建永,等. 田间微集雨技术研究及应用[J]. *农业工程学报*,2013,29(8):1 – 17.
MO Fei, ZHOU Hong, WANG Jianyong, et al. Development and application of micro-field rain-harvesting technologies[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(8): 1 – 17. (in Chinese)

[3] 马忠明,白玉龙,薛亮,等. 不同覆膜栽培方式对旱地土壤水热效应及西瓜产量的影响[J]. *中国农业科学*,2015,48(3): 514 – 522.
MA Zhongming, BAI Yulong, XUE Liang, et al. Effects of different plastic film mulching methods on soil water and temperature as well as watermelon yield in loess dryland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(3): 514 – 522. (in Chinese)

[4] 陈书珍,刘广才,周德录,等. 旱地大豆全膜微垄沟播技术的肥料效应[J]. *草业科学*,2018,35(6):1480 – 1488.
CHEN Shuzhen, LIU Guangcai, ZHOU Delu, et al. Study on fertilizer effects of techniques of whole-plastic-film mulching on microridges and planting in catchment furrows of arid-land soybean[J]. *Pratacultural Science*, 2018, 35(6): 1480 – 1488. (in Chinese)

[5] 戴飞,赵武云,张锋伟,等. 西北雨养区全膜双垄沟播技术与配套机具研究进展分析[J/OL]. *农业机械学报*,2019, 50(5):1 – 16.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, ZHANG Fengwei, et al. Research progress analysis of furrow sowing with whole plastic-film mulching on double ridges technology and machine in northwest rainfed area [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(5):1 – 16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190501&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.001. (in Chinese)

[6] 孙新荣,仲彩萍,张维彪. 旱作农业区全膜微垄沟播蚕豆留膜免耕穴播胡麻栽培技术研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2018,36(6):125 – 130.
SUN Xinrong, ZHONG Caiping, ZHANG Weibiao. Study on micro ridge-furrow film mulching cultivation techniques of faba bean and flax rotation in dryland farming areas[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(6): 125 – 130. (in Chinese)

[7] 李小燕,张雷,牛芬菊,等. 旱地组合型微垄全膜不同覆盖时期对土壤水分及胡麻生长的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015,33(2):16 – 21.
LI Xiaoyan, ZHANG Lei, NIU Fenju, et al. Effects of mulching periods on soil moisture and growth of dryland flax under combined micro-ridge with fully film mulching practice[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(2): 16 – 21. (in Chinese)

[8] SEFA A, AHMET C, ZINNUR G. Effects of various no-till seeders and stubble conditions on sowing performance and seed emergence of common vetch[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 126(1): 72 – 77.

[9] SIVAKUMAR S, DURAIRAJ C D. Development of a gravity fed automatic vegetable transplanter with walking beam mechanism [J]. *Trends in Biosciences*, 2014, 7(6): 407 – 410.

[10] 张勇,安世才,王赞,等. 1MLQS-40/70 起垄全铺膜联合作业机的改进设计[J]. *中国农机化*,2011,32(4):89 – 92.
ZHANG Yong, AN Shicai, WANG Yun, et al. Improved design on the 1MLQS-40/70 whole film mulching and ridge forming combined machine[J]. *Chinese Agricultural Mechanization*, 2011, 32(4): 89 – 92. (in Chinese)

[11] 戴飞,赵武云,史瑞杰,等. 横腰带覆土式全膜双垄沟覆膜联合作业机设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*,2019, 50(6):130 – 139.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, SHI Ruijie, et al. Design and experiment of operation machine for filming and girdle covering on double ridges [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(6): 130 – 139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190614&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.014. (in Chinese)

[12] 戴飞,赵武云,张华,等. 旱地小麦全膜覆土穴播联合机覆土作业性能试验[J]. *干旱地区农业研究*,2017,35(6):294 – 299.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, ZHANG Hua, et al. Performance experiment of soil mulching on plastic-film and dibble machine for dry-land wheat[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(6): 294 – 299. (in Chinese)

[13] 戴飞,宋学锋,赵武云,等. 全膜双垄沟覆膜土壤离散元接触参数仿真标定[J/OL]. *农业机械学报*,2019,50(2):49 – 56,77.
DAI Fei, SONG Xuefeng, ZHAO Wuyun, et al. Simulative calibration on contact parameters of discrete elements for covering soil on whole plastic film mulching on double ridges[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(2): 49 – 56, 77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190206&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.006. (in Chinese)

[14] 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)

- SHA Yi. Effect of impeller location and flow measurement in volute of a vortex pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11):57–62. (in Chinese)
- [10] QUAN Hui, FU Baiheng, LI Rennian, et al. Mathematical model of energy conversion mechanism in screw centrifugal pump based on load criteria of blade airfoil[J]. Engineering Computations, 2017, 34(7):2168–2188.
- [11] 朱荣生, 苏保稳, 王秀礼, 等. 折边对旋流泵性能影响的数值计算与试验[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(5):398–401. ZHU Rongsheng, SU Baowen, WANG Xiuli, et al. Numerical simulation and experiment of influence of hem on performance of vortex pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(5):398–401. (in Chinese)
- [12] 施卫东, 孙新庆, 陆伟刚, 等. 矿用潜水电泵性能正交试验[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(1):6–10. SHI Weidong, SUN Xinqing, LU Weigang, et al. Orthogonal experiment on performance of submersible mining pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(1):6–10. (in Chinese)
- [13] 王洪亮, 施卫东, 陆伟刚, 等. 基于正交试验的深井泵优化设计[J]. 农业机械学报, 2010, 41(5):56–63. WANG Hongliang, SHI Weidong, LU Weigang, et al. Optimization design of deep well pump based on latin square test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5):56–63. (in Chinese)
- [14] SCHIVLEY G P. An analytical and experimental study of a vortex pump [J]. ASME Journal of Basic Engineering, Ser. D, 1970, 92(4):889–900.
- [15] 陈红勋. 旋流泵叶轮内部旋转流场的测试[J]. 农业机械学报, 1996, 27(1):49–54. CHEN Hongxun. Measurement of rotating flow field with in the impeller of vortex pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1996, 27(1):49–54. (in Chinese)
- [16] YE C X, UMEZU M, NUGENT A H, et al. The spiral vortex pump-design concept, flow characteristics & test results[J]. Proc. of the 7th ISAO, Artif. Organs., 1990, 14(Supp.1):46–49.
- [17] UMEZU M, YE C X, NUGENT A H, et al. Advantage of the spiral vortex design in pneumatic blood pumps as demonstrated by dye-washout tests[J]. Proc. of the 7th ISAO, Artif. Organs., 1990, 14(Supp.4):31–33.
- [18] IMACHI K, FUJIMASA I, MABUCHI K, et al. A newly designed jellyfish valve for an artificial heart blood pump[J]. Trans. Am. Soc. Artif. Intern. Organs., 1988, 34(12):726–728.
- [19] IWASAKI K, UMEZU M, IMACHI K, et al. Design improvement of the Jellyfish valve for long-term use in artificial hearts [J]. Int. J. Artif. Organs., 2001, 24(7):463–469.
- [20] 黄剑峰, 张立翔, 杨松. 水轮机槽道内导叶动态绕流水力特性大涡模拟分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4):125–130. HUANG Jianfeng, ZHANG Lixiang, YANG Song. Analysis on hydraulic characteristics of dynamic flow around vane in hydro-turbine channel using large eddy simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(4):125–130. (in Chinese)

(上接第 105 页)

- [15] 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)
- [16] 李强, 刘国彬, 许明祥, 等. 黄土丘陵区撂荒地土壤抗冲性及相关理化性质[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10):153–159. LI Qiang, LIU Guobin, XU Mingxiang, et al. Soilanti-scouribility and its related physical properties on abandoned land in the Hilly Loess Plateau [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10):153–159. (in Chinese)
- [17] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下册)[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2007.
- [18] NY/T 987—2006 铺膜穴播机作业质量[S]. 2006.
- [19] DB62/T 1935—2010 全膜双垄沟铺膜机操作规程及作业质量验收[S]. 2010.
- [20] 赵立军, 何堤, 周福君. 2BF-1400 型水稻覆膜播种机覆土机构参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8):21–26. ZHAO Lijun, HE Di, ZHOU Fujun. Parameter optimization and test on soil-covering mechanism of 2BF-1400 rice mulching film seeder machine[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(8):21–26. (in Chinese)
- [21] 彭飞, 李腾飞, 康宏彬, 等. 小型制粒机喂料器参数优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(2):51–58. PENG Fei, LI Tengfei, KANG Hongbin, et al. Optimization and experiment on feeder for small-scale pellet mill[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2):51–58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160207&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.007. (in Chinese)
- [22] 高筱钧, 周金华, 赖庆辉. 中草药三七气吸滚筒式精密排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2):20–28. GAO Xiaojun, ZHOU Jinhua, LAI Qinghui. Design and experiment of pneumatic cylinder precision seed-metering device for *Panax notoginseng*[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(2):20–28. (in Chinese)
- [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?file_no=20171111&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.011. (in Chinese)
- [24] 贾富国, 姚丽娜, 韩燕龙, 等. 基于离散元法的糙米匀料盘仿真优化设计[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4):235–241. JIA Fuguo, YAO Li'na, HAN Yanlong, et al. Simulation and optimal design of uniform plate of brown rice based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(4):235–241. (in Chinese)