doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.03.017

旋耕抛-导土式膜上覆土关键技术与抗旱稻覆膜旱直播机研究

丁启朔[1,2]　敖宏贵[1,2]　徐高明[3]　何瑞银[1,2]　李毅念[1,2]　刘皓东[1,2]

(1.南京农业大学工学院,南京 210031;2.江苏省智能化农业装备重点实验室,南京 210031;
3.江门职业技术学院,江门 529090)

摘要:针对抗旱稻旱直播覆土机具结构复杂、膜上覆土层厚度和覆土率变化较大等问题,在土槽试验探明旋耕抛土的运动规律基础上,将旋耕、铺膜、覆土多环节协调设计,提出并完善旋耕抛-导土式膜上覆土技术模式,并以此关键技术研究抗旱稻覆膜旱直播机。在理论分析建立正转旋耕土壤运动及其抛-导土运动学模型基础上,明确影响覆土性能的导土板关键设计参数,将单因素试验与理论计算相结合,明确了导土板相对旋耕刀回转中心、地面的空间位置和水平安装角度 3 个关键设计参数的取值范围。进而以膜上覆土率、膜上覆土层厚度变异系数为评价指标,开展三因素三水平正交土槽试验,基于所得覆土作业结果并利用响应面分析获得多目标约束条件下的最佳参数组合,探明旋耕抛-导土关键技术并将其应用于抗旱稻覆膜旱直播机设计中,最后开展田间试验验证整机性能。试验结果表明:所提出的旋耕抛-导土关键技术的 3 个设计参数对膜上覆土性能有显著影响;最佳参数组合:导土板水平安装角度为 38°,导土板下端离地距离为 111 mm,导土板下端与旋耕刀回转中心水平距离为 362 mm。对应最优设计参数可实现膜上覆土率 94.2%,膜上覆土层厚度变异系数 14.8%,在田间验证试验中,对应性能指标最佳数据为:膜上覆土率 94.5%,膜上覆土层厚度变异系数 14.8%,符合预期。旋耕抛-导土关键技术以表土 50 mm 浅旋、高转速 500 r/min 为基本特征,实现切土高抛、铺膜装置越顶式的膜上覆土目标,导土板关键设计参数研究结果可为抗旱稻覆膜直播覆土装置参数优化提供参考。

关键词:抗旱稻;覆膜旱直播机;旋耕抛-导土式膜上覆土;覆土率;正交试验

中图分类号:S233.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)03-0176-10　　**OSID**:

Rotary-till Soil-casting Key Technology for Above-film Soil Cover and Development of Film-mulching Dry Direct-seeder for Drought-resistant Rice

DING Qishuo[1,2]　AO Honggui[1,2]　XU Gaoming[3]　HE Ruiyin[1,2]　LI Yinian[1,2]　LIU Haodong[1,2]

(1. *College of Engineering*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210031, *China*
2. *Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment of Jiangsu Province*, *Nanjing* 210031, *China*
3. *Jiangmen Institute of Vocational Technology*, *Jiangmen* 529090, *China*)

Abstract: Mechanized production of dry direct-seeded and degradable film-mulched draught-resistant rice is challenged by the complexity of the seeding implements, the difficult control of mulched soil layers above the film, and the large deviation of soil thickness. A soil-bin investigation was conducted to illustrate soil movement induced by rotary till. Based on the recognized characteristic of soil movement, compromised design of rotary till, film application and soil mulching mechanisms was made to formulize the rotary-till soil-casting technology, which was further adapted to the development of a film-mulching dry direct-seeder for draught-resistant rice. Soil movement induced by rotary-till was theoretically investigated to formulize the model of soil casting and redirecting. Key parameters of the soil-redirecting plate were identified and single-parameter experiment was made on each parameters. The results from both the experiment and theoretical analysis clarified the selective ranges of the three parameters, i.e., dimensions of the soil-redirecting plate respecting to both the rotary blade rotation center and the ground level. By introducing the above-film soil covering rate and variation of the soil layer as criteria,

收稿日期:2024-09-20　修回日期:2024-12-06

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD2300304)

作者简介:丁启朔(1968—),男,教授,博士,主要从事土壤-植物-机器系统科学研究,E-mail:qsding@njau.edu.cn

orthogonal experiment of three factors in three levels was followed to illustrate the optimum combination of the three influencing factors. The rotary-till soil-casting technology was clarified and was then adapted to the development of a film-mulching dry direct-seeder for draught-resistant rice. Field test was then conducted to evaluate the performance of the developed seeder. Results showed that the proposed three parameters had significant influence on the performance of rotary-till soil-casting technology. The optimum combination of the design parameters were 38° for the tilting angle of the plate, 111 mm of height of the plate and 362 mm from the plate to the rotary blade rotation center. Such a combined set of parameters yielded the best performance of 94.2% soil covering rate and 14.8% of soil thickness variation in soil bin test. While in the field evaluation they were 94.5% and 14.8%, respectively. Rotary-till soil-casting technology was featured by 50 mm shallow soil engaging and 500 r/min high speed rotating, which achieved the purposes of soil-cutting and high casting, overtopping the film-applying mechanisms and soil mulching on the applied film. The findings of parameterized design of soil-redirecting plate in this work can be applied as a reference for related research in the future.

Key words: drought resistant rice; film mulching dry direct seeding machine; rotary-till soil-casting technology for above film soil cover; soil covering rate; orthogonal experiment

0　引言

鉴于抗旱稻覆膜旱作具有显著的增温、保墒、控草生态功效，以及旱直播覆膜稻作降低甲烷排放、提高水资源利用率等功效[1]，因此研发抗旱稻覆膜旱直播机不仅可保障抗旱稻绿色种植[2]，也是低碳农业的关键装备保障。

机械化覆膜旱直播（机覆膜直播）可借鉴技术众多，但抗旱稻机覆膜直播有别于其他作物覆膜种植的关键在于，抗旱稻出苗期的机覆膜易受风力等因素影响甚至毁坏[3]，且机覆膜的不稳定显著影响出苗率，因此抗旱稻机覆膜直播所需膜上覆土关键技术尤为突出。

已报道的膜上覆土技术有针对旱地作物的刮板式输送器“越顶”式输送膜上覆土[4]，以起土铲取土、刮板升运带输土为技术核心；针对玉米旱作全膜双垄沟覆膜的横腰带覆土关键技术[5]，其技术核心亦为取土、输土；具有“提土-输土-覆土”3 阶段功能特征的提土种床覆土装置[6]，以及在小麦全膜覆土一体机上应用的旋耕抛土与铲土板组合技术所实现的取土-输土-覆土功能[7]，也采用研究较多的取土输土技术模式，这也是当前覆土技术中成果相对成熟、理论体系较为完善的研究体系；其特点是突出各单项技术（土壤收集、输运和分铺等）且将覆土作业独立于旋耕作业，仅利用旋耕碎土、平整功能，覆土作业的取土、输土、覆土环节也被分离，在实现各环节作业目标前提下对相应技术组装实现膜上覆土目标，这使得机具功能环节增多、系统结构复杂、作业稳定性差，且这类研究都要求较好土壤条件与作业环境，增加成本且不利于抗旱稻宽幅厢面条件的机覆膜直播的实现。

不同于北方旱作及窄厢的覆膜种植制度，抗旱稻机直播覆膜亟需突破膜上均匀覆土关键技术，同时兼需破解南方大面积换季短时窗高效率技术瓶颈，为此，研发高度集成化的膜上覆土关键技术替代现有多环节组装覆土技术尤为迫切。稻作铺膜旱作包括旋耕、铺膜、覆土、播种等环节，虽前人分别探讨了旋耕作业运动规律[8-9]、抗旱稻旱作合理覆土厚度[10]并在覆土装置上开展了相关研究[11]，但缺少将各技术环节协同分析的简洁、高效的抗旱稻覆膜旱直播关键技术[4-7,12]。

为压缩简化取土、提土、匀土等功能，提升覆土作业效率，解决宽厢平作旱直播稻覆膜的膜上覆土难题，本研究拟结合宽幅厢面平作稻特点，发掘旋耕机固有的旋耕抛土性能优势；理论分析旋耕的土壤运动，配合试验研究如何将抗旱稻机覆膜直播的旋耕、覆膜、覆土各环节协同，实现抗旱稻机直播覆膜关键技术的可能性，进而将该技术集成应用到抗旱稻覆膜旱直播机上进行田间试验验证。

1　材料与方法

1.1　旋耕抛-导土式膜上覆土关键技术集成与整机设计

针对华东区抗旱稻宽厢种植农艺研制了集旋耕抛土、膜上覆土、覆膜直播功能的旋耕抛-导土式膜上覆土覆膜旱直播试验样机（图 1）；机器作业时旋耕机组将土壤破碎抛向导土板，铺膜机与镇压轮同步作业，导土板将土壤导向种膜上方，由排种器在已覆土种膜上破膜播种。其核心技术特征为利用旋耕抛土实现表土后抛，突出细碎表层土壤特点的旋耕粉碎和抛掷，再抛向后置导土板，由导土板以最优导流保障越顶覆土，全幅宽旋耕抛掷厢面均匀覆土规避土壤集收-分铺的繁琐工艺和不稳定性。

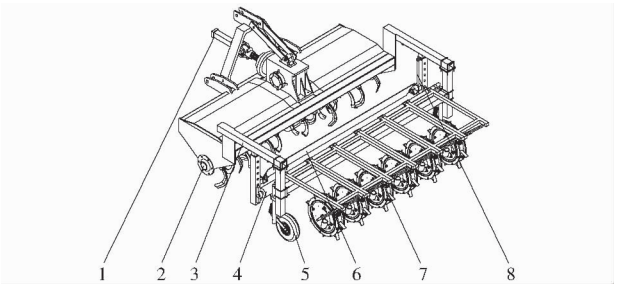

图 1 旋耕抛-导土式膜上覆土覆膜旱直播机结构示意图

Fig. 1 Rotary tillage throw-guide type membrane mulching dry direct seeding machine structure schematic

1. 传动轴 2. 旋耕机组 3. 机架 4. 铺膜机 5. 压膜轮 6. 导土板 7. 鸭嘴式排种器 8. 可调节导轨

1.2 试验样机基础技术参数及田间试验参数确定

依据华东稻麦轮作区抗旱稻厢沟栽培农艺及耕作层特点,采用一膜六行种植模式[13-14],配合行距 300 mm 采用地膜宽 1 900 mm,机器作业宽幅 2 000 mm;根据文献与机具特点设计耕深 30 ~ 70 mm[15-16];配套功率大于等于 54 kW;作业速度 3 ~ 6 km/h;刀轴转速 200 ~ 600 r/min[17];膜上覆土率大于等于 87%,覆土层厚度 10 ~ 20 mm[10],设计参数见表 1。

表 1 旋耕抛-导土膜上覆土覆膜旱直播机试验样机参数

Tab. 1 Parameters of test prototype of rotary tillage throw-guide soil mulching on membrane mulching dry direct seeding machine

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 388×2 118×930
作业幅宽/mm	2 000
刀轴转速/(r·min^{-1})	200 ~ 600(可调)
作业耕深/mm	30 ~ 70(可调)
配套功率/kW	≥54
作业速度/(km·h^{-1})	3 ~ 6
覆土层厚度/mm	10 ~ 20
膜上覆土率/%	≥87

1.3 旋耕抛-导土式膜上覆土关键技术理论分析

对逆旋抛土技术研究较多,但后抛率低下[11],因此,从旋耕运动学原理考虑规避逆旋切出土块在上抛、罩壳碰撞、后输运多个运动环节所受的不良影响,采用正旋抛土方式,突出其切抛土的优势,配合导土板进行抛土流迹合理疏导。正转旋耕中当旋耕速比 $\lambda>1$ 时旋耕刀正切刃运动轨迹为余摆线,以旋耕刀端点 N 作运动学分析,轨迹如图 2,方程为

$$\begin{cases} x = vt + R\cos(\omega t) \\ y = -R\sin(\omega t) \end{cases} \tag{1}$$

式中 (x,y)——端点 N 水平、竖直方向运动轨迹坐标

R——端点 N 与刀轴旋转中心轴距离,m

v——机器作业前进速度,m/s

t——旋耕刀作业时间,s

ω——旋耕刀角速度,rad/s

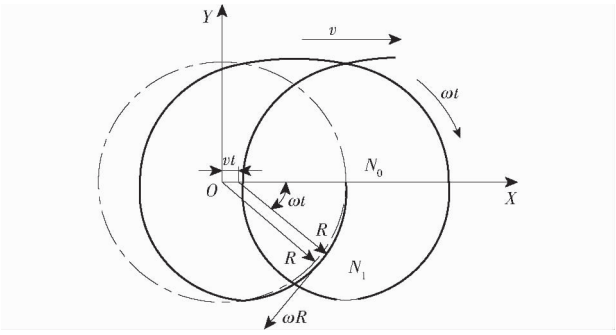

图 2 旋耕刀端点 N 的运动轨迹

Fig. 2 Motion trajectory of rotary plough blade endpoint N

由式(1)可知,旋耕刀切抛土壤刀上任意一点运动轨迹都为余摆线。

对式(1)中 t 求导并整理得到端点 N 绝对速度 v_N 方程

$$v_N = \sqrt{v^2 - 2vR\omega\sin(\omega t) + R^2\omega^2} \tag{2}$$

旋耕时被抛土块相对于导土板的运动会因抛射角、质量、脱离位置差异形成图 3 所示运动状态(V_1、V_2、V_3),而导土板设计目的是保护铺膜和播种装置,使土块到达导土板后速度和方向改变并从 C 端脱离,因高速旋耕时被抛土块速度较大,直接用其覆土会冲击膜上覆土层并影响铺膜和播种。

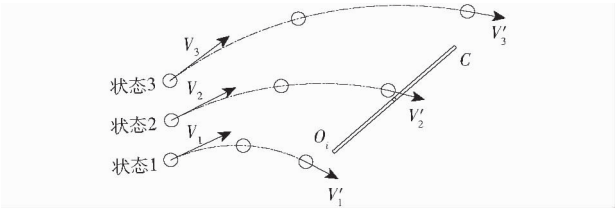

图 3 导土板作用机理图

Fig. 3 Action mechanism diagram of soil guide plate

由图 1、3 可知,避免被抛土块以状态 1、3(图 3)运动,保证土块以状态 2(图 3)运动时才能发挥导土板功能;其实现方式可通过分析旋耕机组耕深、转速、前进速度对土块运动的影响明确,但其理论分析内容复杂,试验分析可行性更高;分析导土过程,相比旋耕作业的土壤运动理论分析,从运动学角度分析导土板作用机理从而实现其功能更为合适,故通过理论(图 4)和试验综合分析从而实现土壤到达导土板并从 C 端脱离的设计目标。

图 4 中 O 为旋耕刀回转圆最低点;h 为土块脱离旋耕刀约束时距旋耕沟底垂直高度,mm;L 为土块脱离旋耕刀时与旋耕刀回转中心水平距离,mm;A 为土块脱离旋耕刀约束时位置;C 为旋耕刀回转中心;α 为抛射角,rad;θ 为土块抛出点与旋耕刀回转

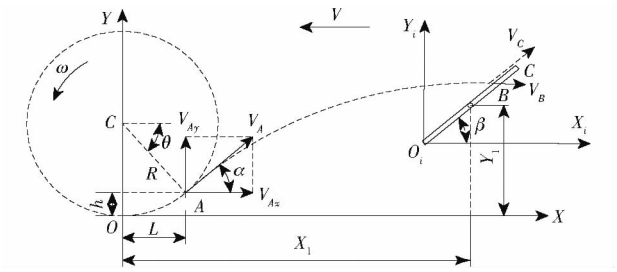

图 4　导土式旋耕覆土土壤运动原理图

Fig. 4　Soil kinematics of guided rotary ploughing mulches

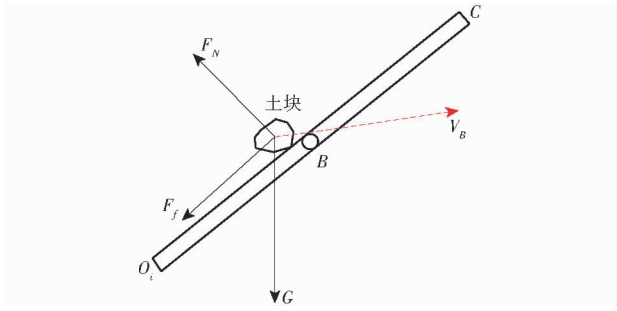

图 5　导土板 B 处被抛土块运动分析

Fig. 5　Analysis of motion of tossed soil block at point B of guide plate

中心连线的水平夹角，rad；ω 为旋耕角速度，rad/min；V 为前进速度，km/h；V_A 为土块脱离旋耕刀绝对速度，m/s；V_{Ax}、V_{Ay} 为 V_A 沿 X、Y 轴方向分速度，m/s；V_B 为土块到达 B 时瞬时速度，m/s；V_C 为土块从导土板 C 端脱离瞬时速度，m/s；X_1 为导土板与旋耕刀回转中心水平间距，mm；Y_1 为导土板回转中心与旋耕刀回转圆最低点竖直间距，mm；O_i 为导土下端；B 为土块与导土板首次接触点；C 为导土板上端；β 为导土板安装角度，rad。导土板设计宽度 L_d 为 250 mm。

导土式旋耕覆土作业中土壤运动有土块脱离刀具后抛飞运动和土壤相对导土板直线运动 2 个阶段（图 4），土块抛飞运动时土块脱离旋耕刀的抛射角、绝对速度和其离沟底垂直距离可控性差，设为已知。理论上土块脱离旋耕刀瞬间速度和旋耕刀上约束点绝对速度一致。故设旋耕刀端点 N 转动到点 A 时土块刚好脱离，点 A 土块绝对速度计算式为

$$\begin{cases} V_A = V_N = \sqrt{v^2 + R^2\omega^2 - 2vR\omega\sin\theta} \\ \sin\theta = \dfrac{R-h}{R} \end{cases} \tag{3}$$

忽略空气阻力，被抛土块脱离旋耕刀后做匀减速曲线运动，机器前进速度为 V，土块从点 A 到点 B 所用时间为 t，B 在坐标系 XOY 中的坐标（X_B，Y_B）为

$$\begin{cases} X_B = R\cos\theta + V_{Ax}t \\ Y_B = h + V_{Ay}t - \dfrac{1}{2}gt^2 \end{cases} \tag{4}$$

式中　g——重力加速度，m/s^2

O_i 在 XOY 坐标系中坐标为（$X_1 - 0.5L_d\cos\beta$，$Y_1 - 0.5L_d\sin\beta$），设点 B 在坐标系 $X_iO_iY_i$ 中坐标（X_{Bi}，Y_{Bi}）为

$$\begin{cases} X_{Bi} = R\cos\theta + V_{Ax}t - (X_1 - 0.5L_d\cos\beta) \\ Y_{Bi} = h + V_{Ay}t - \dfrac{1}{2}gt^2 - (Y_1 - 0.5L_d\sin\beta) \end{cases} \tag{5}$$

土块从点 A 运动到点 B，依机械能守恒定律有

$$\frac{1}{2}mV_B^2 - \frac{1}{2}mV_A^2 = -mg\left(V_{Ay}t - \frac{1}{2}gt^2\right) \tag{6}$$

式中　m——土块质量，g

由图 4、5 可知第 2 阶段土块相对导土板直线运动，而土块从 C 端脱离需满足其动能（E_k）大于从点 B 到 C 的摩擦力（W_f）与重力（W_G）做功（$E_k > W_G + W_f$），设导土板动摩擦因数为 μ，由机械能守恒定律有

$$\frac{1}{2}mV_C^2 - \frac{1}{2}mV_B^2 = -mg(L_d\sin\beta - Y_{Bi}) - \mu mg\cos\beta\left(L_d - \frac{X_{Bi}}{\cos\beta}\right) \tag{7}$$

根据条件 $E_k > W_G + W_f$，整理式（2）、（4）、（7）有

$$V_A > \sqrt{2g[Y_1 + \mu X_1 + 0.5L_d\sin\beta + 0.5L_d\mu\cos\theta - (h + \mu R\cos\theta + \mu V_A t\cos\alpha)]} \tag{8}$$

分析得，V_A 满足式（8）时，土壤可从导土板 C 端脱离到达种膜上；式中抛射角 α、瞬时速度 V_A、距离 h 等变量可控性小，导土板宽度 L_d、动摩擦因数 μ、回转半径 R 在生产作业中不具备可调性，导土板与旋耕刀回转中心水平间距 X_1、导土板回转中心与旋耕刀回转圆最低点竖直间距 Y_1 和安装角度 β 在实际作业中可根据试验调节，且由式（8）分析得出这 3 个变量对土壤是否从导土板 C 端脱离影响最大，故选取 X_1、Y_1、β 作为后续试验的变量，以探明导土式膜上覆土技术在实际生产作业的可行性与科学性。

1.4　旋耕抛-导土式膜上覆土关键技术优化试验台构建

触土部件-土壤间互作的复杂性导致农机理论计算所得作业性能难以在生产中再现，故在理论分析基础上构建关键技术试验台（图 6）与优化试验台（图 7）。单因素试验台由旋耕机组与土壤收集网格板组成（网格尺寸 40 mm × 40 mm，网格数量 4 × 16）；覆土关键技术试验台包含旋耕机和导土装置，旋耕机采用 T195 旋耕刀，正转旋耕的碎土质量更佳、抛土效果更好[18-19]，在稻麦轮作区正转翻埋效果也更好[20]。考虑到切土大抛距及覆膜机构越顶式膜上覆土的技术瓶颈，更换专用旋耕机齿轮箱实现大范围变速（200 ~ 600 r/min）。

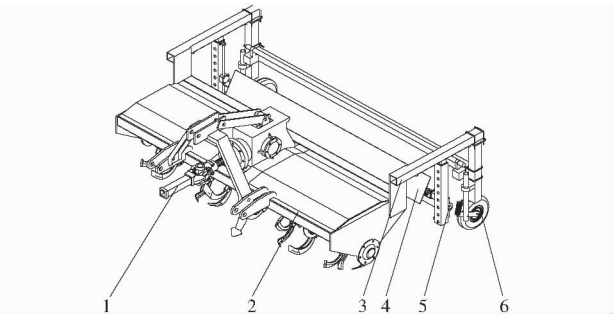

图 6 旋耕抛-导土式膜上覆土关键技术试验台

Fig. 6 Rotary tillage throw-guide type key technology test bed for mulching on film

1. 传动轴 2. 旋耕机组 3. 机架 4. 可调节导土板 5. 铺膜机 6. 压膜轮



(a) 单因素预试验台 (b) 覆土试验布置

图 7 土槽试验装置

Fig. 7 Soil bin test device

导土装置(图 8)根据作业宽幅设计导土板长、宽为 1 850、255 mm,材料为 45 号钢,厚度 3 mm,短边设置锁紧滑块。可调节导轨由机械臂、锁紧滑块和光滑导轨组成,滑轨长 480 mm,直径 16 mm。由旋耕抛土运动分析,预设可调范围 0 ~ 400 mm;机械臂尺寸(长 × 宽 × 高)为 500 mm × 8 mm × 8 mm,材料为 45 号钢,空心结构,壁厚 3 mm,机械臂打排孔用于调节定位。

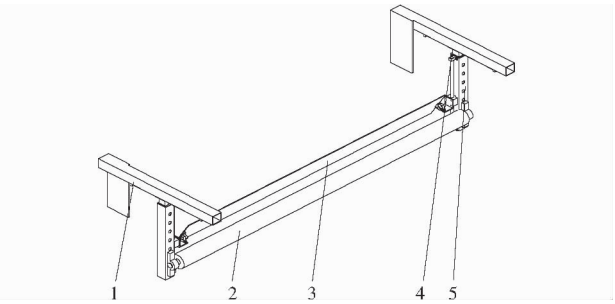

图 8 导土装置结构示意图

Fig. 8 Schematic structure of adjustable soil guide

1. 机架 2. 铺膜机 3. 导土板 4. 可调节导轨 5. 机械臂

1.5 旋耕抛-导土式关键技术土槽试验与优化

土槽试验于 2023 年 10 月在南京农业大学室内土槽实验室进行,土槽台车有前进速度控制、悬挂控制系统(图 7)。土壤为壤黏土质(壤 47%、黏 42%、沙 11%),含水率 20.4%,容重 1.24 g/cm^3。每次试验前刮平压实。

导土板相对于刀轴、地面的空间位置以及水平安装角度是影响覆土质量主要可控变量;但这些变量在试验和计算中较难明确且尚难找到理论依据,故以图 4 运动原理分析中导土板与旋耕刀回转中心水平间距 X_1、导土板回转中心与旋耕刀回转圆最低点竖直间距 Y_1 和安装角度 β 为试验变量,最后对各变量最佳取值进行相应数值换算。由文献资料与机器设计参数确定作业旋耕深度为 30 ~ 70 mm[15-16]、旋耕转速为 200 ~ 600 r/min[17]、前进速度为 3 ~ 6 km/h;为简化试验开展单因素预试验,根据覆土技术原理中导土板发挥功能的前提下计算获得土壤到达网格板水平距离 40 ~ 80 mm 时(图 7,网格板近机端为起始点)满足要求,规定范围内土壤质量占网格板土壤总质量比值(合格土壤质量占比)以及网格板上土壤总质量为指标,试验中人工盖板控制取样,取样时间 2 s。

根据理论计算和试验设计明确水平间距 X_1 取值区间 350 ~ 550 mm,竖直间距 Y_1 取值区间为 180 ~ 280 mm。控制导土板安装角度分别为 20°、30°、40°、50°、60°、70°,为缩小取值区间,在明确这些关键参数及变化范围的基础上开展安装角度预试验,以覆土率、厚度变异系数等指标确定最佳取值范围,并进一步基于响应面试验研究方法明晰各参数间互作效应。

1.6 旋耕抛-导土式膜上覆土关键技术评价指标

抗旱稻宽厢覆膜旱直播技术的评价尚没有统一的标准,因此设计膜上覆土层厚度变异系数、膜上覆土率 2 个核心评价参数。

1.6.1 膜上覆土层厚度变异系数

每次试验以 500 mm × 500 mm 样框随机取样,以 GB/T 5262—2008《农业机械试验条件 测定方法的一般规定》中五点法测试膜上覆土厚度。以覆土层厚度数据计算变异系数

$$C_{Vt} = \frac{\sigma_t}{\overline{X}_t} \times 100\% \tag{9}$$

式中 C_{Vt}——膜上覆土层厚度变异系数,%

σ_t——覆土层厚度标准差,mm

$\overline{X}_t$——覆土层厚度的算术平均值,mm

1.6.2 膜上覆土率

每次以取样框取样时,用数码相机获取样框内各点位图像,以 Python 模型进行图像二值化处理(图 9),计算膜上覆土率式为

$$S_C = \frac{P_W}{P_T} \times 100\% \tag{10}$$

式中 S_C——膜上覆土率,%

P_W——二值化处理后图像中白色部分像素数

P_T——二值化处理后图像中总像素数



(a) 膜上图像取样　　(b) 图像二值化处理

图 9　膜上土壤图像处理

Fig. 9　Image processing of soil on film

2　结果与分析

2.1　土槽试验导土板关键设计参数单因素影响效果

图 10a 是以旋耕转速为变量，重复试验获得的图示数据，图中旋耕转速 500 r/min 与 600 r/min 时土壤总质量与合格占比综合条件下无明显优劣，因节能减排需求以 500 r/min 为后续试验旋耕转速；同理，以旋耕深度为变量设置预试验，为扩大试验差异，以 30、50、70 mm 旋耕深度试验获得图示数据（图 10b），图中耕深 70 mm 下土壤总质量高于 50 mm，但考虑导土板工作机理，以合格土壤质量占比为优先条件选取后续试验耕深为 50 mm；图 10c 中 3.6 km/h 条件下两种指标数值都更优，故后续试验以 3.6 km/h 为机具前进速度。

以转速 500 r/min、耕深 50 mm、前进速度 3.6 km/h 进行安装角度预试验，结果如图 10d 所示，40°时覆土率最大值为 93.14%、膜上覆土层厚度变异系数最小值为 21%，但安装角度为覆土技术设计内容且 30°与 50°时膜上覆土率均满足设计要求，故不取定值，基于试验结果和三因素三水平试验要求取安装角度范围为 30°～50°。

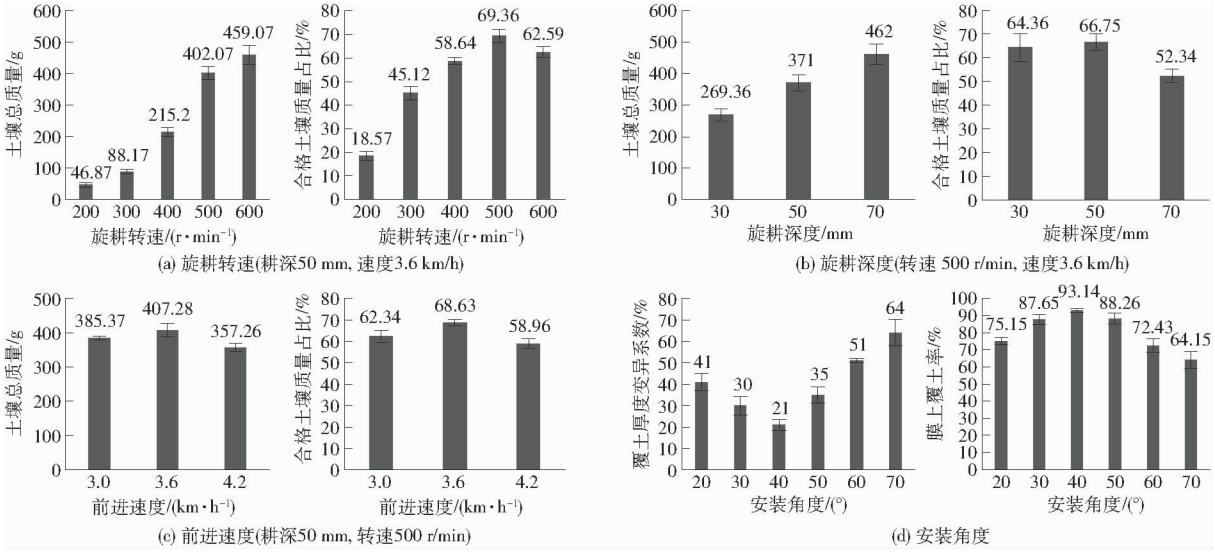

图 10　土槽单因素预试验结果

Fig. 10　Single factor pre-experimental results of soil bin

2.2　旋耕抛-导土式膜上覆土关键技术土槽试验结果

利用 Design-Expert 8.0.6.1 软件对导土板与旋耕刀回转中心水平间距 X_1、导土板回转中心与旋耕刀回转圆最低点竖直间距 Y_1 和安装角度 β 进行三因素三水平正交试验，试验中旋耕深度 50 mm、旋耕转速 500 r/min、前进速度 3.6 km/h，设置因素编码如表 2 所示，试验结果见表 3。

表 2　试验因素编码

Tab. 2　Codes of test factors

编码	水平间距/mm	竖直间距/mm	安装角度/(°)
-1	350	180	30
0	450	230	40
1	550	280	50

表 3　试验方案和结果

Tab. 3　Test scheme and results

试验编号	因素			膜上覆土率/%	膜上覆土层厚度变异系数/%
	水平间距/mm	竖直间距/mm	安装角度/(°)		
1	450	180	30	82.2	20.1
2	350	230	30	80.6	38.2
3	550	180	40	89.0	35.0
4	350	280	40	84.4	29.2
5	550	230	30	87.6	29.8
6	450	280	30	86.1	24.2
7	450	230	40	91.3	14.5
8	450	280	50	86.4	31.3
9	550	230	50	88.0	50.0
10	350	180	40	73.4	24.2
11	350	230	50	71.5	24.3
12	450	230	40	92.8	12.1
13	450	230	40	91.2	16.5
14	450	180	50	78.0	31.2
15	450	230	40	93.4	10.8
16	450	230	40	94.5	15.2
17	550	280	40	92.2	37.0

2.2.1 膜上覆土率分析

(1)膜上覆土率回归分析

以软件 Design-Expert 8.0.6.1 对土槽试验结果二次回归分析,建立水平间距 X_1、竖直间距 Y_1、安装角度 β 回归模型

$$S_C = 92.20 + 6.00A + 3.25B - 1.50C - 2.00AB + 2.50AC + 1.00BC - 4.60A^2 - 3.10B^2 - 6.10C^2 \quad (11)$$

式中 A、B、C——因素编码值

对回归模型进行方差分析,表 4 中模型 P 值小于 0.000 1,回归模型显著性高,失拟项 P 值 0.707 8,模型拟合程度高。对于覆土率 S_C,A、B、C 影响极显著($P<0.01$),根据模型 F 得到对模型影响主次顺序为 A、B、C,AC 影响极显著,AB 影响显著。

表 4 膜上覆土率方差分析

Tab.4 Variance analysis of soil coverage rate

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	752.23	9	83.58	62.91	<0.000 1 **
A	288.00	1	288.00	216.77	<0.000 1 **
B	84.50	1	84.50	63.60	<0.000 1 **
C	18.00	1	18.00	13.55	0.007 9 **
AB	16.00	1	16.00	12.04	0.010 4 *
AC	25.00	1	25.00	18.82	0.003 4 **
BC	4.00	1	4.00	3.01	0.126 3
A^2	89.09	1	89.09	67.06	<0.000 1 **
B^2	40.46	1	40.46	30.46	0.000 9 **
C^2	156.67	1	156.67	117.93	<0.000 1 **
残差	9.30	7	1.33		
失拟项	2.50	3	0.83	0.49	0.707 8
纯误差	6.80	4	1.70		
总和	761.53	16			
R^2	0.972 1				

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

(2)膜上覆土率响应曲面分析

安装角度 40°时水平间距 X_1 和点竖直间距 Y_1 交互作用响应曲面如图 11a 所示。由图 3、4 知,水平间距 X_1 较小时土壤大部分越过导土板(图 3 状态 3)并冲击膜上覆土层而降低覆土率;能到达导土板上的少量土块动能较小,由式(8)可知,土壤集中从导土板 O_i 端脱离,覆土率降低;水平间距 X_1 过大时土壤难以到达导土板,覆土率下降。同理,竖直间距 Y_1 过小,土壤大部分越过导土板,少量到达导土板土壤动能不足从 O_i 端脱离,覆土率下降;竖直间距 Y_1 过大时土壤难以到达导土板,覆土率下降。导土板回转中心与旋耕刀回转圆最低点竖直间距 Y_1 为 230 mm 时水平间距 X_1 和安装角度 β 交互作用响应曲面如图 11b 所示,角度较小时,土壤大部分越过导土板,覆土率下降;角度过大时,土壤从 C 端脱离时重力做功增大,从 C 端脱离土量减少导致覆土率下降。

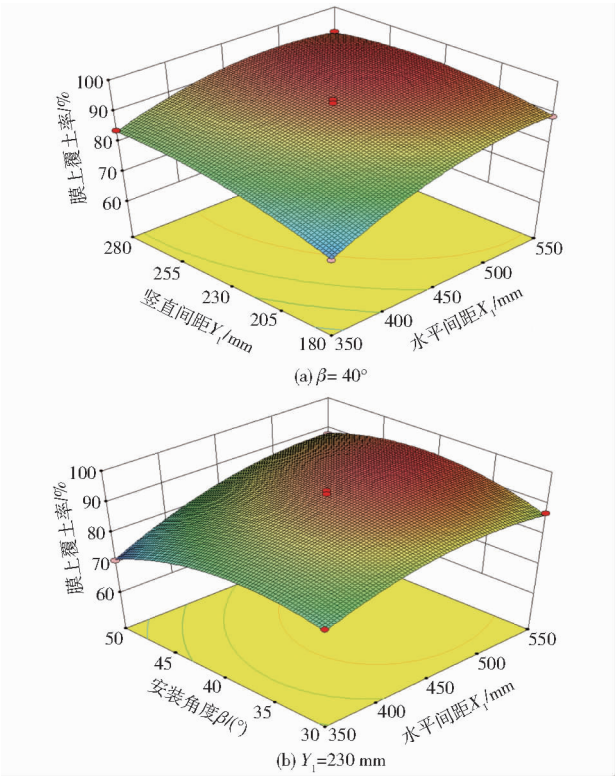

图 11 因素间交互作用时的膜上覆土率响应曲面

Fig.11 Response surface of interaction effects between factors

2.2.2 膜上覆土层厚度变异系数分析

(1)膜上覆土层厚度变异系数回归分析

用软件 Design-Expert 8.0.6.1 对土槽试验结果进行二次回归分析,水平间距、竖直间距、安装角度回归模型为

$$C_V = 13.40 + 4.50A + 1.37B - 3.13C - 0.75AB + 8.75AC - 1.00BC + 13.30A^2 + 4.55B^2 + 8.55C^2 \quad (12)$$

对回归模型方差分析,表 5 中模型 P 值小于 0.000 1,模型显著性高,失拟项 P 值 0.492 0,模型有效且不失拟。对于覆土层厚度变异系数 C_V,A、C 影响极显著($P<0.01$),B 影响不显著;根据模型 F,对模型影响主次顺序为 A、C、B,AC 对覆土层厚度变异系数影响极显著,AB、BC 影响不显著。

(2)膜上覆土层厚度变异系数响应曲面分析

图 12 为导土板回转中心与旋耕刀回转圆最低点竖直间距 Y_1 为 230 mm 时,导土板与旋耕刀回转中心水平间距 X_1 和安装角度 β 间交互作用响应曲面图,由图 3、4 可知,水平间距 X_1 较小,土壤大部分越过导土板并冲击膜上土壤导致覆土厚度变异系数增大;水平间距 X_1 过大,土壤难以到达导土板,从导土板 C 端脱离土壤量减少导致覆土厚度变异系数

表 5　膜上覆土层厚度变异系数方差分析

Tab. 5　Analysis of variance for the coefficient of variation of soil covering thickness on the film

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	1 814.52	9	201.61	35.33	<0.000 1 **
A	162.00	1	162.00	28.39	0.001 1 **
B	15.13	1	15.13	2.65	0.147 6
C	78.13	1	78.13	13.69	0.007 7 **
AB	2.25	1	2.25	0.39	0.550 0
AC	306.25	1	306.25	53.66	0.000 2 **
BC	4.00	1	4.00	0.70	0.430 1
A^2	744.80	1	744.80	130.50	<0.000 1 **
B^2	87.17	1	87.17	15.27	0.005 8 **
C^2	307.80	1	307.80	53.93	0.000 2 **
残差	39.95	7	5.71		
失拟项	16.75	3	5.58	0.96	0.492 0
误差	23.20	4	5.80		
总和	1 854.47	16			
R^2	0.950 8				

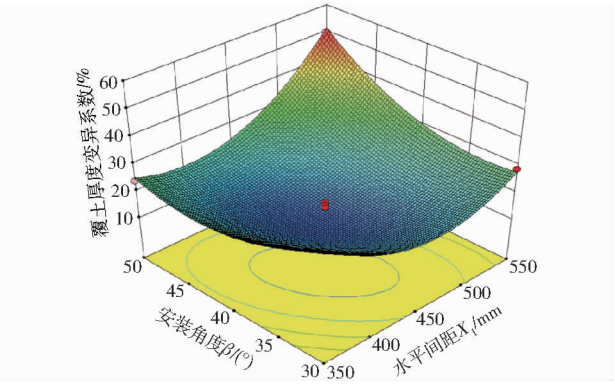

图 12　水平间距 X_1 和安装角度 β 间交互作用膜上覆土层厚度变异系数响应曲面

Fig. 12　Interaction between horizontal spacing X_1 and installation angle β

增大。导土板角度过小，大部分土壤越过导土板导致覆土不均，由式(8)可知，导土板角度过大，土壤从 C 端脱离时重力做功增大，从 C 端脱离土量减少导致覆土不均概率增大，厚度变异系数增大。

2.2.3　参数优化

为获得导土式膜上覆土装置最佳参数，以软件 Design-Expert 8.0.6.1 多目标参数优化 Optimization 模块对回归模型进行约束目标优化求解，根据前文分析得到约束条件为

$$\begin{cases} \max S_C(A,B,C) \\ \min C_V(A,B,C) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant A \leqslant 1 \\ -1 \leqslant B \leqslant 1 \\ -1 \leqslant C \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{13}$$

优化后得最佳参数：水平间距 463 mm、竖直间距 238 mm、安装角度 38.4°，数值换算得到安装角度为 38°、导土板下端离地距离为 111 mm、导土板下端与旋耕刀回转中心水平距离为 362 mm；此时膜上覆土率为 93.47%，覆土层厚度变异系数为 14.2%。为验证模型准确性，以水平间距 460 mm、竖直间距 240 mm、安装角度 38°进行 3 次重复试验，得膜上覆土率 94.2%、覆土层厚度变异系数 14.8%，与模型优化基本一致，可为后续田间试验提供依据。

2.3　整机田间试验验证

土槽试验已证明旋耕抛-导土式膜上覆土技术的可行性、科学性以及关键因素，然而直播机作为农业生产工具需在实际农业生产中保证机具性能稳定与实用，故进行技术集成研制水稻覆膜直播机。于 2023 年 11 月在南京市六合区八百桥村试验田(118°55′E，32°25′N)进行试验(图 13)，该地区稻麦轮作，为壤质粘土。试验时土壤含水率 22.15%，0～50 mm 土壤紧实度 0.49 MPa，50～100 mm 土壤紧实度 0.56 MPa。为检验直播机复杂作业环境的适应性，试验田作物收割后未旋耕且留茬长度大于 200 mm，试验水平间距 460 mm、竖直间距 240 mm、安装角度 38°，重复 3 次，每次结束后在试验区间隔 100 mm 等距取样 3 次并进行覆土率、覆土层厚度测试。



图 13　抗旱稻覆膜旱直播机田间试验效果图

Fig. 13　Field test results of drought-resistant rice mulching and dry seeding machine

田间试验结果如表 6，膜上覆土率最优值 94.5%、膜上覆土层厚度变异系数最小值 14.8%，整机设计中膜上覆土层厚度 10～20 mm，试验最大值 13.7 mm、最小值 12.6 mm。试验结果中各试验指标结果与土槽试验优化结果相近，并满足整机设计要求。

表 6　田间试验结果

Tab. 6　Results of field test

试验组号	膜上覆土率/%	膜上覆土层厚度/mm	覆土层厚度变异系数/%
1	93.2	13.7	14.8
2	92.0	12.7	17.1
3	94.5	12.6	15.3

3 讨论

高建民等[11]开展了土壤精细分层旋耕抛土研究,但采用反旋,0~30 mm、30~60 mm、60~100 mm 土层数据中抛土率最大值仅 55.5%,未聚焦旱直播面临宽厢、膜上均匀覆土、铺膜结构越顶抛撒、机具紧凑、稻麦轮作窗口期短、田间效率高等突出矛盾和苛刻要求。本研究表明正旋控制耕深 50 mm 时抛土率接近 100%、最优转速 500 r/min,非常规旋耕作业参数所能达到。从整机系统角度,相较已有“提-输-覆土”多个功能环节机具设计原理[6](优化后合格率达 95.6%),旋耕抛-导式膜上覆土关键技术可实现相当的覆土率技术指标(94.5%)并达成机械系统最优化,其要点在于突出宽厢种植膜上均匀覆土农艺特征与旋耕机全幅切抛技术特征,规避“集土-输土-分土”所带来的一系列矛盾约束和实现高质量均匀覆土。

不同场景需求及农艺目标决定着不同覆土装置设计,余佳佳等[21]研制的机械直播同步悬摆式覆土装置建立覆土层厚度与覆土板镂空率的关系,建议镂空率为 50%;然而在稻麦轮作制且多数情况土壤粘性较大的华东区,耕后土块大小不一,镂空式板件堵塞严重,机具设计性能难以保障。戴飞等[6]研制的微垄式覆膜覆土联合作业机采用提土装置线速度 1.8 km/h、覆土装置倾角 68°;相较而言,本文集成设计的整机试验样机所需探明的设计参数众多、指标间协调关系复杂,包括导土装置空间相对位置、水平安装角度、覆土率、覆土层厚度变异系数等指标及相互间的联系,因此实现整机的多目标约束及优化设计较为困难,为此本研究采用全因子全范围响应面试验测试的方法获取可靠的最优设计参数,田间的样机整机试验证明了所得关键设计参数的正确性。

4 结论

(1)旋耕抛-导土膜上覆土关键技术基于表土耕深 50 mm、旋耕转速 500 r/min 条件提供最优膜上覆土作业质量,配合导土板实现保护铺膜作业免受影响和破坏的越顶式膜上均匀覆土。根据试验数据分析得最佳安装角度为 38°、导土板下端最佳离地距离为 111 mm、导土板下端与旋耕回转中心最佳水平距离为 362 mm。

(2)本研究探明的旋耕抛-导式膜上覆土技术以旋耕抛土为核心,协调旋耕、覆膜、覆土环节,提升了覆土作业效率;试验中提出的膜上覆土率、覆土厚度变异系数指标一定程度上完成了覆土性能量化,多约束优化后膜上覆土率 94.2%、覆土厚度变异系数 14.8% 证明旋耕抛-导土式膜上覆土技术理论科学性与实际可行性;技术集成的水稻覆膜旱直播机通过提高田间环境的复杂性检验其在整机作业中的稳定与实用,膜上覆土率最佳值 94.5%、覆土厚度变异系数最小值 14.8%、覆土厚度 13.7 mm,证明该技术在旱直播机研究中具备广阔前景。

(3)抗旱稻机械化铺膜旱直播技术面临众多系统约束,本研究的旋耕抛-导土式膜上覆土关键技术仅解决抗旱稻宽厢种植、全幅膜上均匀覆土、南方小地块机具紧凑性、稻麦区茬口轮替窗口期短、田间作业效率高、土壤结构性差的复杂系统边界条件和因子间矛盾难协调的问题。而针对垄作栽培、带状覆土、直播覆膜等不同的农艺变化和机械化技术模式尚需分别针对性研发。本研究成果可为南方抗旱稻机械化铺膜种植技术研发和机具设计提供参考。

参 考 文 献

[1] ZHANG Yanan, LIU Meiju, MICHAEL D, et al. Benefit of using biodegradable film on rice grain yield and N use efficiency in ground cover rice production system[J]. Field Crops Research, 2017,201: 52-59.

[2] 李兴华,汪吴凯,杨特武,等. 节水抗旱稻发展现状、优势及需解决的主要问题[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(1): 84-91.
LI Xinghua, WANG Wukai, YANG Tewu, et al. Development status, advantages and main problems to be resolved of water-saving and drought-resistant rice[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(1): 84-91. (in Chinese)

[3] 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)

[4] 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 Transmission, 2016, 52(7): 38-45. (in Chinese)

[5] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 130-139. (in Chinese)

[6] 戴飞,宋学锋,赵武云,等. 微垄式覆膜覆土联合作业机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 21(3): 97 - 105.
DAI Fei, SONG Xuefeng, ZHAO Wuyun, et al. Design and experiment of operation machine for filming and covering soil on tiny ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 21(3): 97 - 105. (in Chinese)

[7] 唐学鹏,赵武云,戴飞,等. 旱地小麦全膜覆土播种一体机的研制[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(6): 248 - 251.
TANG Xuepeng, ZHAO Wuyun, DAI Fei, et al. Design and manufacture of an integrated machine to spread membrane covering soil and seeding for dry land wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(6): 248 - 251. (in Chinese)

[8] 刘保玲,邱白晶,史春建,等. 基于高速图像处理提取被抛土粒三维运动轨迹[J]. 农业机械学报, 2006, 37(6): 98 - 101.
LIU Baoling, QIU Baijing, SHI Chunjian, et al. 3-D trace of clod thrown by rotary tiller based on high speed image processing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(6): 98 - 101. (in Chinese)

[9] 陈钧近,近江谷和彦,寺尾日出男,等. 高速摄影法研究旋耕刀抛土特性[J]. 农业机械学报, 1994, 25(3): 56 - 60.
CHEN Junjin, OHMIYA Kazuhiko, TERAO Hideo. Studies on the soil-throwing property of the rotary blades with high speed photography[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1994, 25(3): 56 - 60. (in Chinese)

[10] 余佳佳,刘俊安,刘保雨,等. 覆土厚度对直播早稻全苗的影响[J]. 江西农业大学学报, 2020, 42(3): 419 - 428.
YU Jiajia, LIU Jun'an, LIU Baoyu, et al. Effect of covering soil thickness on the full stand of direct seeding early rice[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2020, 42(3): 419 - 428. (in Chinese)

[11] 高建民,刘兴达,齐惠冬,等. 斜置潜土逆转旋耕抛土仿真及试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13): 54 - 63.
GAO Jianmin, LIU Xingda, QI Huidong, et al. Simulation and test of slanting submerged soil reversing rotary tillage casting [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(13): 54 - 63. (in Chinese)

[12] 曲浩,石林榕,辛尚龙,等. 带有蓄土装置的胡麻精量穴播联合作业机的设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(8): 186 - 197.
QU Hao, SHI Linrong, XIN Shanglong, et al. Design and experiment of flax precision hole-seeding combined operation machine with soil storage device[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(8): 186 - 197. (in Chinese)

[13] 丁启朔,尤勇,邢全道,等. 基于精确播深控制目标的播种单体田间台架试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 100 - 107.
DING Qishuo, YOU Yong, XING Quandao, et al. Field bench test of seeding unit based on precise seeding depth control objective[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 100 - 107. (in Chinese)

[14] 郭峰,王小刚,赵考诚,等. 抗旱稻机覆全生物降解膜栽培技术要点[J]. 中国农技推广, 2023, 39(5): 50 - 52.
GUO Feng, WANG Xiaogang, ZHAO Kaocheng, et al. Key points of drought-resistant rice machine-covered full biodegradable film cultivation technology[J]. China Agricultural Technology Extension, 2023, 39(5): 50 - 52. (in Chinese)

[15] 李永磊,宋建农,康建军,等. 带双辊秸秆还田旋耕机试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 45 - 49.
LI Yonglei, SONG Jiannong, KANG Jianjun, et al. Experiment on twin-roller cultivator for straw returning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 45 - 49. (in Chinese)

[16] 方会敏,姬长英,CHANDIO F A,等. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 22 - 28.
FANG Huimin, JI Changying, CHANDIO F A, et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on distinct element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 22 - 28. (in Chinese)

[17] 林静,张桐嘉,陈彬,等. 深松灭茬旋耕起垄联合作业机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 28 - 39.
LIN Jing, ZHANG Tongjia, CHEN Bin, et al. Design and test of subsoiling rotary rilling and rilling combined operating machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 28 - 39. (in Chinese)

[18] 丁为民,王耀华,彭嵩植,等. 反转旋耕刀正切面分析及参数选择[J]. 农业机械学报, 2004, 35(4): 40 - 43.
DING Weimin, WANG Yaohua, PENG Songzhi, et al. Analysis on sidelong portion of a up cut rotary blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(4): 40 - 43. (in Chinese)

[19] 丁为民,王耀华,彭嵩植,等. 正、反转旋耕不同耕作性能的比较[J]. 南京农业大学学报, 2003, 26(3): 106 - 109.
DING Weimin, WANG Yaohua, PENG Songzhi, et al. Comparison on performances of up-cut and down-cut rotary tillage[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2003, 26(3): 106 - 109. (in Chinese)

[20] 陈青春,石勇,丁启朔,等. 正反转旋耕作业的秸秆混埋效果比较[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 13 - 18.
CHEN Qingchun, SHI Yong, DING Qishuo, et al. Comparison of straw incorporation effect with down-cut and up-cut rotary tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 13 - 18. (in Chinese)

[21] 余佳佳,刘俊安,舒金贵,等. 水稻机械直播同步悬摆式覆土装置设计与试验[J]. 江西农业大学学报, 2020, 42(6): 1250 - 1259.
YU Jiajia, LIU Jun'an, SHU Jingui, et al. Design and experiment of synchronous swing-type covering device for mechanical direct seeding of rice[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2020, 42(6): 1250 - 1259. (in Chinese)