doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.17.016

基于切抛土运动特性的小麦双轴分层旋耕装置设计与试验

白圣贺[1,2]　苑严伟[1,2]　徐际童[1]　周利明[2,3]　赵　博[2,3]　牛　康[2,3]　刘立晶[1,2]

（1.中国农业大学工学院，北京 100083；2.中国农业机械化科学研究院集团有限公司，北京 100083；
3.农业装备技术全国重点实验室，北京 100083）

摘要：双轴旋耕切抛土过程与双轴配置参数关系决定土壤扰动程度与粒径分布，直接影响地表平整度和碎土能力。本文分析了双轴旋耕运动规律及抛土性能，建立了前后旋耕刀组将土壤颗粒向后抛撒的最大水平距离和高度方程，确定了影响双轴分层旋耕覆土装置工作性能的主要因素为前旋耕刀轴回转半径、后旋耕刀轴回转半径、前后旋耕刀轴水平间距和前后旋耕刀轴垂直间距。运用离散元法模拟双轴分层旋耕作业过程，以功耗、碎土率、回填率为试验指标，以前旋耕刀轴回转半径、后旋耕刀轴回转半径、前后旋耕刀轴水平间距和前后旋耕刀轴垂直间距为试验因素，进行了单因素和正交试验，建立了功耗、碎土率、回填率回归方程。利用 Design-Expert 分析软件得到最优参数组合为：前旋耕刀轴回转半径 268.95 mm，后旋耕刀轴回转半径 244.51 mm，前后旋耕刀轴水平间距 546.04 mm，前后旋耕刀轴垂直间距 54.31 mm，此时仿真功耗为 12.2 kW、碎土率为 97.3%、回填率为 94.0%。在最优参数组合下进行田间试验，结果表明：当前旋耕刀轴回转半径为 269 mm，后旋耕刀轴回转半径为 245 mm，前后旋耕刀轴水平间距为 546 mm，前后旋耕刀轴垂直间距为 54 mm 时，碎土率为 96.8%，耕后地表平整度为 2.4 cm，整体耕整效果优于常用机型。

关键词：小麦；双轴分层旋耕装置；回转半径；水平间距；垂直间距

中图分类号：S222.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)17-0165-12　　**OSID**：

Design and Experiment of Wheat Double-axis Layered Rotary Tilling Device Based on Soil Cutting and Throwing Motion Characteristics

Bai Shenghe[1,2]　Yuan Yanwei[1,2]　Xu Jitong[1]　Zhou Liming[2,3]　Zhao Bo[2,3]　Niu Kang[2,3]　Liu Lijing[1,2]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co.*, *Ltd.*, *Beijing* 100083, *China*
3. *State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The process of double-axis rotary tillage and soil throwing and the relationship between the parameters of the double-axis configuration determine the degree of soil disturbance and the particle size distribution, directly affecting the surface flatness and the ability to break up the soil. The movement law of the double-axis rotary tillage and the discarding performance were analyzed, the equation for the maximum horizontal distance and height at which the soil particles were thrown backward by the front and rear tillage knife groups was established. It determined that the main factors affecting the working performance of the double-axis layered rotary tillage and soil covering device were the rotation radius of the front rotary tillage knife shaft, the rotation radius of the rear rotary tillage knife shaft, the horizontal spacing between the front and rear rotary tillage knife shafts, and the vertical spacing between the front and rear rotary tillage knife shafts. The double-axis layered rotary tillage operation process was simulated by using the discrete element method. The test indicators were power consumption, soil fragmentation rate, and backfill rate. The single-factor and orthogonal experiments were conducted by using the rotation radius of the front rotary tillage knife shaft, the rotation radius of the rear rotary tillage knife shaft, the

收稿日期：2025-11-11　修回日期：2026-03-05

基金项目：北京市科技新星计划项目(20240484577)

作者简介：白圣贺(1996—)，男，博士生，中国农业机械化科学研究院集团有限公司工程师，主要从事农业机械装备研究，E-mail：baishenghe@caams.org.cn

通信作者：刘立晶(1976—)，女，研究员，博士生导师，主要从事种植机械化技术与装备研究，E-mail：xyliulj@sina.com

horizontal spacing between the front and rear rotary tillage knife shafts, and the vertical spacing between the front and rear rotary tillage knife shafts as the test factors. Regression equations for power consumption, soil fragmentation rate, and backfill rate were established. The optimal parameter combination was obtained by using the Design-Expert analysis software: the rotation radius of the front rotary tillage knife shaft was 268.95 mm, the rotation radius of the rear rotary tillage knife shaft was 244.51 mm, the horizontal spacing between the front and rear rotary tillage knife shafts was 546.04 mm, and the vertical spacing between the front and rear rotary tillage knife shafts was 54.31 mm. In this case, the simulation power consumption was 12.2 kW, the soil fragmentation rate was 97.3%, and the backfill rate was 94.0%. Field experiments were conducted under the optimal parameter combination. The results showed that when the rotation radius of the front rotary tillage knife shaft was 269 mm, the rotation radius of the rear rotary tillage knife shaft was 245 mm, the horizontal spacing between the front and rear rotary tillage knife shafts was 546 mm, and the vertical spacing between the front and rear rotary tillage knife shafts was 54 mm, the soil fragmentation rate was 96.8%, the surface flatness of the soil after tillage was 2.4 cm, and the overall tillage effect was better than that of commonly used machines.

Key words: wheat; double-axis layering rotary tillage device; rotation radius; horizontal spacing; vertical spacing

0 引言

精量播种是实现小麦高产稳产的关键。目前播种研究主要集中于排种器结构设计、播种方式对播种效率的影响以及播种过程中功耗等方面,但仍存在播种均匀性差、播深不一致等问题,导致其作业成本增加、出苗不齐不壮等现象,严重影响小麦产量。为保障播种均匀性和播深一致性,双轴旋耕机型逐渐开发应用,郭俊等[1]对比分析了正反转旋耕两种耕作方式下的土壤位移情况,反旋作业位移呈递减趋势、正旋作业位移呈递增趋势;顾宸嘉等[2]设计一种双轴旋耕压槽播种开沟匀覆土作业机,解决播种质量和播深稳定性较差等问题;叶伟伟[3]研制双轴旋耕施肥贴地播种复式作业机,解决了播种深度难以控制、复式作业程度低等问题;潘浩然等[4]为解决小麦播种过程中播深一致难以控制的问题,设计了一种具有播深控制装置的双轴旋耕播种机。

以上设计的双轴旋耕装置总体性能比传统方式有了很大提高,但现阶段旋耕后土壤扰动和土壤粒径规律性理论研究,即双轴旋耕切抛土过程与双轴配置参数关系不明确,仅仅依靠经验决定参数取值,致使地表平整度和碎土能力无法保障[5-6]。为此本文设计一种双轴分层旋耕装置,研究双轴旋耕运动规律及抛土性能,明确双轴参数配置关系。利用离散元仿真和正交旋转回归试验获取最优参数组合,并通过实际试验验证装置作业性能,为基于双轴旋耕的小麦播种机研究提供理论基础,以期提高小麦播种作业质量。

1 双轴分层旋耕装置结构与工作原理

现有双轴旋耕机型主要有 3 类:前轴正旋后轴反旋、前轴反旋后轴正旋、双轴正旋,其中双轴正旋功耗较小,但碎土率与抛土高度较低,易导致壅土现象;前轴反旋后轴正旋主要从灭茬性能考虑,缺点在于湿黏土地通过性差、功耗较大;前轴正旋后轴反转可最大限度降低功率损耗,并兼顾碎土灭茬与回填性能,旋耕质量较好。故本文研究选择前轴正旋后轴反旋,前旋耕组位于机架前方,后旋耕组位于机架后方,两者上下错位布置,联合完成土壤分层耕作[7-8]。

双轴分层旋耕装置由变速传动箱、机架、三点悬挂、前后旋耕刀组、挡土板、镇压辊等组成。装置通过三点悬挂与拖拉机连接,拖拉机后置动力输出轴通过万向节传动轴与变速传动箱连接,为机组提供动力。通过万向节传动轴与前后刀轴传动齿轮箱连接,进行动力传递,驱动前旋耕刀组对深层土壤进行初次旋抛作业;继而驱动后旋耕刀组完成浅层旋抛作业,对前置抛起土垡进行二次旋转破碎和抛起作业。双轴分层旋耕装置结构与工作原理如图 1 所示。

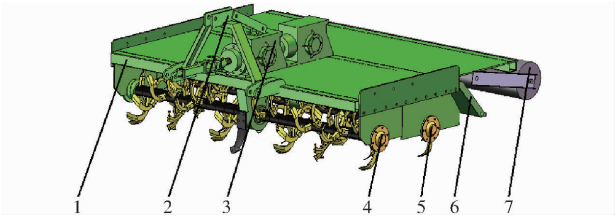

图 1 双轴分层旋耕装置结构图

Fig. 1 Structure of biaxial layered rotary tillage device

1. 机架 2. 三点悬挂 3. 变速传动箱 4. 前旋耕刀组 5. 后旋耕刀组 6. 挡土板 7. 镇压辊

2 旋耕切抛土过程与参数分析

2.1 双轴旋耕运动分析

旋耕刀转动同时,需随着机具前进做水平匀速

运动，即旋耕刀上任一点的绝对运动是旋转运动和机具前进运动的合成[9]。双旋耕刀组作业过程如图 2 所示，以前旋耕刀轴旋转中心为原点建立平面直角坐标系，x 轴正向与机具前进方向一致，z 轴垂直向上，正转旋耕刀旋向为顺时针，反转则为逆时针。对前、后转旋耕刀上任一端点 A、B 进行运动分析，开始时端点位于前方水平位置 A_0、B_0 处，与 x 轴正向一致。

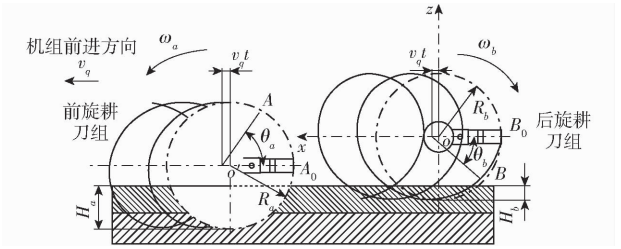

图 2　旋耕刀作业过程示意图

Fig. 2　Sketches of operation process of rotary knife

根据图 2 得

$$\begin{cases}\sin\theta_a = \dfrac{R_a - H_a}{R_a}\\ \sin\theta_b = \dfrac{R_b - H_b}{R_b}\end{cases} \tag{1}$$

其中

$$\begin{cases}\theta_a = \omega_a t\\ \theta_b = \omega_b t\end{cases} \tag{2}$$

式中　R_a——前旋耕刀组回转半径，mm

θ_a——前旋耕刀组转动角或刀齿入土角，rad

ω_a——前旋耕刀组角速度，rad/s

H_a——前旋耕刀组入土深度，mm

R_b——后旋耕刀组回转半径，mm

θ_b——后旋耕刀组转动角或刀齿入土角，rad

ω_b——后旋耕刀组角速度，rad/s

H_b——后旋耕刀组入土深度，mm

t——转动时间，s

据公式(1)、(2)分析可知，影响双轴旋耕刀组绝对运动速度主要参数为机具前进速度、入土深度、回转半径及角速度。其中在工作参数确定条件下，前后刀轴回转半径不仅影响耕深比，而且直接影响前后旋耕刀组抛土颗粒初速度，即旋耕土壤颗粒初速度会随着回转半径增大而增大，土壤颗粒速度越大则碎土率越高，但功耗也会随之增加，则合理配置双轴回转半径参数至关重要[10]。

为确保旋耕刀能够有效地切削土壤，旋耕刀端点运动轨迹为余摆线，即旋耕速度比 $\lambda = R\omega/v_q > 1$，其中 R 为旋耕刀回转半径，mm；ω 为刀轴旋转角速度，rad/s；v_q 为前进速度，mm/s。根据公式(1)化简得前后旋耕刀齿入土角为

$$\begin{cases}\theta_a = \omega_a t = \arcsin\left(\dfrac{R_a - H_a}{R_a}\right)\\ \theta_b = \omega_b t = \arcsin\left(\dfrac{R_b - H_b}{R_b}\right)\end{cases} \tag{3}$$

结合前、后转旋耕刀齿端点 A、B 的分速度得

$$\begin{cases}v_{ax}t = v_q t - \theta_a(R_a - H_a)\\ v_{bx}t = v_q t - \theta_b(R_b - H_b)\end{cases} \tag{4}$$

式中　v_{ax}——前旋耕刀组 x 轴方向速度，mm/s

v_{bx}——后旋耕刀组 x 轴方向速度，mm/s

将 $\omega = n\pi/30$ 代入公式(4)，并进行化简可得旋耕刀组作业转速应满足

$$\begin{cases}n_a \geqslant \dfrac{v_q - v_{ax}}{R_a - H_a}\\ n_b \geqslant \dfrac{v_q - v_{bx}}{R_b - H_b}\end{cases} \tag{5}$$

式中　n_a——前旋耕刀组转速，r/min

n_b——后旋耕刀组转速，r/min

由于旋耕后直接播种，并利用旋耕抛起的土壤进行覆土，因而对碎土质量要求高，则旋耕刀组作业转速为

$$n = 60v_q/(SZ) \tag{6}$$

式中　n——旋耕刀组转速，r/min

S——切土节距，mm

Z——旋耕刀轴在同一安装平面内均匀安装的旋耕刀刀片数，取 2

根据小麦播种农艺要求、查阅《机械设计手册》[11]、上述公式分析可知，本文机具作业速度取 2 ~ 4 km/h，轻中黏度作业 S 为 0.06 ~ 0.09 m，将其代入式(6)可得 n 为 185.19 ~ 555.56 r/min，为保证反转旋耕刀组的抛土性能，确保整体耕作效果，后刀轴反转转速应高于前刀轴正转转速。通过查阅文献[12 - 14]，选择前刀轴正转转速为 260 r/min，后刀轴反转转速为 330 r/min。结合现有双轴旋耕刀组结构参数及研究基础(旋耕刀呈对称螺旋状排列，每一切削平面内旋耕刀安装角度为 142°，相邻旋耕刀安装角度为 56.8°)，小麦播种时旋耕深度一般为 120 ~ 150 mm，播种深度要求为 30 ~ 40 mm[2]，将前旋耕刀组旋耕作业深度设定为 150 mm，后旋耕刀组旋耕作业深度设定为 50 mm。综上，本文需重点研究前后旋耕刀轴回转半径 2 个关键参数。

2.2　旋耕抛土性能分析

双轴旋耕在种带对应的未耕区进行旋切作业，切后土壤需覆盖在种带上，实现表土盖种分流目的，其中前旋耕刀组正旋深耕首次完成碎土，后旋耕刀轴反转浅旋实现二次碎土及抛土。因此，在种带内均能覆盖土壤条件下，有必要对双轴旋耕抛土进行

运动学分析,明确其满足种带覆土效果的运动学基本要求。将土块简化成质点,双旋耕刀组为匀速运动,忽略土块间、土块与空气阻力的相互碰撞[15-17],双旋耕抛土过程土壤运动分析如图 3 所示。设点 a_1 为土壤颗粒与前旋耕刀齿脱离的临界点,即抛撒起始点,刀齿从点 a_1 运动至点 a_4 的过程中,土壤颗

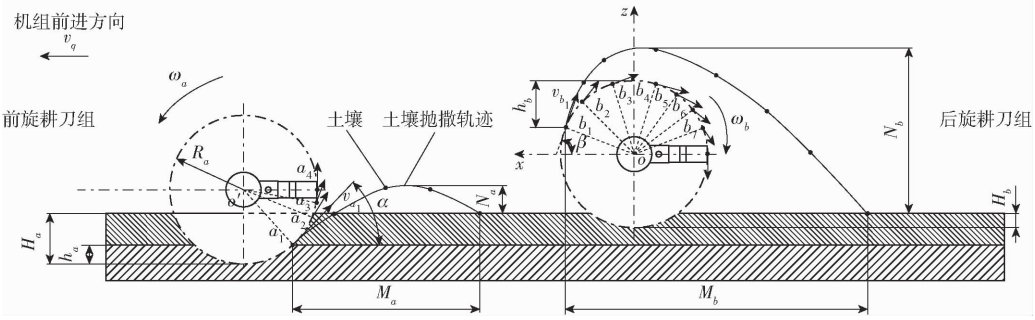

图 3 土壤运动分析图

Fig. 3 Analysis of soil movement

粒沿旋耕刀齿向外滑移,将其抛至后方。则土壤颗粒在点 a_1 的分速度为

$$\begin{cases} v_{a_1x} = -v_{a_1}\cos\alpha = -\omega_a(R_a - h_a) \\ v_{a_1z} = v_{a_1}\sin\alpha = \omega_a\sqrt{2R_ah_a - h_a^2} \end{cases} \tag{7}$$

式中 v_{a_1x}——土壤颗粒在点 a_1 沿 x 方向的运动速度,m/s

v_{a_1z}——土壤颗粒在点 a_1 沿 z 方向的运动速度,m/s

v_{a_1}——土壤颗粒在点 a_1 的运动速度,m/s

α——前旋耕刀齿土壤颗粒抛撒瞬时方向与水平方向的夹角,(°)

h_a——前旋耕刀齿土壤颗粒抛撒起始点与沟底的垂直距离,mm

根据李伯全等[18]研究成果,前旋耕刀组旋耕后土壤比较松软,致使后旋耕刀组整体受土垡支撑力较小。在此条件下,被切土壤颗粒沿旋耕刀正切刃方向发生滑移,从而加快土壤颗粒的抛出速率。设点 b_1 为土壤颗粒与后旋耕刀齿脱离的临界点,即抛撒起始点,刀齿从点 b_1 运动至点 b_7 的过程中,土壤颗粒沿旋耕刀齿向外滑移,将其抛至后方。则土壤颗粒在点 b_1 的分速度为

$$\begin{cases} v_{b_1x} = -v_{b_1}\cos\beta = -\omega_b(R_b - h_b) \\ v_{b_1z} = v_{b_1}\sin\beta = \omega_b\sqrt{2R_bh_b - h_b^2} \end{cases} \tag{8}$$

式中 v_{b_1}——土壤颗粒在点 b_1 的运动速度,m/s

v_{b_1x}——土壤颗粒在点 b_1 沿 x 方向的运动速度,m/s

v_{b_1z}——土壤颗粒在点 b_1 沿 z 方向的运动速度,m/s

β——后旋耕刀齿土壤颗粒抛撒瞬时方向与水平方向的夹角,(°)

h_b——后旋耕刀齿土壤颗粒抛撒起始点与旋耕刀齿顶点的垂直距离,mm

前后旋耕刀组将土壤颗粒抛出后,x 轴方向的匀速直线运动与 z 轴方向的匀变速直线运动合成的斜抛运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x_{a_1} = x_{o'} - \sqrt{2R_ah_a - h_a^2} - (R_a - h_a)\omega_a t \\ z_{a_1} = y_{o'} + h_a - R_a + \omega_a t\sqrt{2R_ah_a - h_a^2} - \dfrac{gt^2}{2} \\ x_{b_1} = \sqrt{2R_bh_b - h_b^2} - (R_b - h_b)\omega_b t \\ z_{b_1} = R_b - h_b + \omega_b t\sqrt{2R_bh_b - h_b^2} - \dfrac{gt^2}{2} \end{cases} \tag{9}$$

式中 x_{a_1}——前旋耕土壤颗粒在 x 轴方向抛出距离,mm

z_{a_1}——前旋耕土壤颗粒在 z 轴方向抛出距离,mm

x_{b_1}——后旋耕土壤颗粒在 x 轴方向抛出距离,mm

z_{b_1}——后旋耕土壤颗粒在 z 轴方向抛出距离,mm

$(x_{o'}, y_{o'})$——前旋耕刀组旋转中心坐标,mm

g——重力加速度,m/s^2

则前后旋耕刀组将土壤颗粒向后抛撒的最大水平距离 $M_{a\max}$、$M_{b\max}$ 和高度 $N_{a\max}$、$N_{b\max}$ 为

$$\begin{cases} M_{a\max} = \dfrac{2v_a^2\sin\alpha\cos\alpha}{g} = \dfrac{2\omega_a^2(R_a - h_a)\sqrt{2R_ah_a - h_a^2}}{g} \\ N_{a\max} = \dfrac{(v_a\sin\alpha)^2}{2g} = \dfrac{\omega_a^2(R_ah_a - h_a^2)}{2g} \\ M_{b\max} = v_b\cos\beta\left(\dfrac{v_b\sin\beta + 2N_{b\max}}{g}\right) = \omega_b(R_b - h_b)\cdot \\ \qquad \left[\omega_b\sqrt{2R_bh_b - h_b^2} + \dfrac{\omega_b^2(R_bh_b - h_b^2)}{g} + 4R_b - 2h_b - 2H_b\right]\Big/ g \\ N_{b\max} = \dfrac{(v_b\sin\beta)^2}{2g} + 2R_b - h_b - H_b = \dfrac{\omega_b^2(R_bh_b - h_b^2)}{2g} + \\ \qquad 2R_b - h_b - H_b \end{cases} \tag{10}$$

根据公式(10)分析可知，前旋耕刀齿从点 a_1 运动到点 a_4 的过程中，不断对土壤颗粒进行抛撒，土壤颗粒抛撒速度 v_{a_1} 大小相同，方向不同。当前旋耕刀齿运动到点 a_4 时，$v_{ax}=0$，土壤颗粒不再向外抛撒。土壤颗粒在水平向后、垂直方向的抛撒距离随 v_a 方向的变化而改变；后旋耕刀齿从点 b_1 运动到点 b_7 的过程中，不断对碎土后的土壤颗粒进行二次碎土并抛撒，土壤颗粒抛撒速度 v_{b_1} 大小相同，方向不同。当后旋耕刀齿运动到点 b_7 时，$v_{bx}=0$，土壤颗粒不再向外抛撒。土壤颗粒在水平向后、垂直方向的抛撒距离随 v_b 方向的变化而改变。影响抛撒距离的主要因素为前后旋耕刀组转速、回转半径、作业深度。另外，前后旋耕刀组的水平间距变化对土壤颗粒碰撞位置和抛撒距离产生影响，过小前后间距会造成壅土，提高阻力，增加功耗；过大则会造成重耕土堆叠，降低工作效率；前后旋耕刀组垂直间距是决定前后刀轴耕深比的关键参数。因此选择合适双轴旋耕刀组空间配置也是重要参数[11]。

3　离散元仿真试验

3.1　土壤仿真模型构建

小麦旋耕作业最大深度为 150 mm，为真实反映田间实际土壤，仅需构建耕作层、犁地层 2 层土壤模型。通过干筛法测量试验区土壤质地为壤土(粘粒质量分数 2.78%)，表明土壤颗粒表面粘附力较小，呈现散粒体物料特性和压缩性，并且可忽略土壤模型中秸秆间的粘聚力。另外，考虑土壤存在轻微板结现象，本文选取 Hertz－Mindlin with Bonding 模型作为颗粒间的接触模型，该模型在 Hertz－Mindlin (no slip)模型的基础上引入 Bonding 键作为颗粒间的粘结键，用于反映土壤结块和受外力破碎的现象。

为减少软件运行时间和存储时间，设定土槽的基本尺寸(长×宽×高)为 2 200 mm×2 000 mm×270 mm。其中，虚拟土槽 0～150 mm 深度的土壤为耕作层，150～270 mm 深度的土壤为犁地层，土壤颗粒均采用半径为 10 mm 的球形颗粒简化替代[19－22]。在虚拟土槽上方建立虚拟颗粒工厂，采用 Dynamic 动态生成方式生成土壤颗粒，颗粒在重力作用下自然沉降，待沉降稳定后在土壤颗粒之间生成 Bonding 键，通过 EDEM 中的 Ruler 直尺测量功能测得土壤层厚度满足预期要求。

简化双轴分层旋耕覆土装置，去除与工作过程无关的零部件，以 stl 格式导入 EDEM 中，控制旋耕刀组入土深度为 100 mm，为旋耕刀组施加绕轴圆周运动(150 r/min)及线性运动(0.5 m/s)，为其余结构施加线性运动(0.5 m/s)。上述涉及的仿真参数根据文献并结合仿真工况调试确定[23－24]，如表 1 所示。

表 1　接触材料仿真参数

Tab.1　Simulation parameters of contact materials

项目	参数	数值
土壤颗粒	泊松比	0.38
	剪切模量/Pa	1×10^6
	密度/(kg·m^{-3})	1 850
耕作部件	泊松比	0.31
	剪切模量/Pa	7×10^{10}
	密度/(kg·m^{-3})	7 800
耕作层-耕作层	静摩擦因数	0.29
	滚动摩擦因数	0.10
	碰撞恢复系数	0.35
	颗粒间法向刚度/(N·m^{-3})	1×10^6
	颗粒间切向刚度/(N·m^{-3})	1×10^6
	颗粒间法向极限正应力/Pa	1×10^8
	颗粒间切向极限正应力/Pa	1×10^8
	粘结半径	1.2
犁地层-犁地层	静摩擦因数	0.32
	滚动摩擦因数	0.18
	碰撞恢复系数	0.35
	颗粒间法向刚度/(N·m^{-3})	2×10^6
	颗粒间切向刚度/(N·m^{-3})	2×10^6
	颗粒间法向极限正应力/Pa	1.5×10^8
	颗粒间切向极限正应力/Pa	1.5×10^8
	粘结半径	1.2
犁地层-耕作部件	静摩擦因数	0.60
	滚动摩擦因数	0.05
	碰撞恢复系数	0.60
耕作层-耕作部件	静摩擦因数	0.31
	滚动摩擦因数	0.10
	碰撞恢复系数	0.60
土层-土层	静摩擦因数	0.50
	滚动摩擦因数	0.30
	碰撞恢复系数	0.30

3.2　试验方法

为保证装置作业中土壤及秸秆颗粒运动连续性，设定仿真固定时间步为 15%，总仿真时间为 4 s，网格单元尺寸为最小颗粒尺寸的 3 倍。结合每组因素组合方案进行 3 次重复性试验，分别测试每次作业的功耗、碎土率、回填率，取其平均值。仿真过程如图 4 所示。

(1)功耗

旋耕刀组的功耗总和作为机组功耗，通过分别采集机组前、后旋耕刀组的扭矩和转速计算总功耗。在 EDEM 软件中，旋耕转速为恒定值，只需在后处理模块中采集仿真工况中前、后旋耕刀轴的扭矩。各旋耕刀组功耗求和得机组总功耗，功耗计算式为

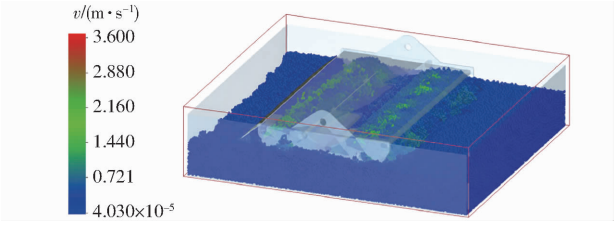

图 4 仿真过程

Fig. 4 Simulation process

$$P=\frac{Tn}{9\,550} \tag{11}$$

式中 P——功耗,kW

T——扭矩,N·m

(2)碎土率

按照旋耕机耕作质量要求[8],碎土率为一定区域内全耕层小于 4 cm 的土块质量占比。但结合本文粒径设置情况及文献[25]研究,在仿真试验中,通过土壤粘结键剩余数量表征土壤破碎情况,因此本文考虑仿真中采用 Bonding 键作为颗粒间的粘结键,粘结键的断裂数量可以直接反映出土壤破碎情况,统计破碎前土槽区域内 Bonding 键总数量与破碎后 Bonding 键断裂数量,碎土率计算式为

$$\eta=\frac{c_2}{c_1}\times 100\% \tag{12}$$

式中 η——碎土率,%

c_1——土槽区域内 Bonding 键总数量,个

c_2——Bonding 键断裂数量,个

(3)回填率

旋耕刀组作业前后种床范围内土壤颗粒数的比值即为回填率,运用 Grid Bin Group 功能框出种床区域,分别计算作业前后土壤颗粒数(静置至模型颗粒不再运动后进行采集),回填率计算式为

$$M=\frac{n_2}{n_1}\times 100\% \tag{13}$$

式中 M——回填率,%

n_1——耕前选定区域内土壤颗粒数,个

n_2——耕后选定区域内土壤颗粒数,个

3.3 单因素试验

根据理论分析结果,选取前旋耕刀轴回转半径、后旋耕刀轴回转半径、前后旋耕刀轴水平间距、前后旋耕刀轴垂直间距为试验因素,研究上述参数对功耗、碎土率、回填率的影响,确定合理参数水平范围,为后续响应面优化试验提供参数水平选取依据。

3.3.1 试验设计

各参数取 5 个水平,其余因素固定在中间水平,试验重复性 3 次取平均值。前旋耕刀轴回转半径选取水平为 120、170、220、270、320 mm;后旋耕刀轴回转半径选取的水平为 140、190、240、290、340 mm;前后旋耕刀轴水平间距选取的水平为 490、520、550、580、610 mm;前后旋耕刀轴垂直间距选取的水平为 -30、0、30、60、90 mm。

3.3.2 试验结果与分析

运用 SPSS 数据分析软件对不同试验因素的仿真结果进行方差分析,并建立模型分析每个试验因素对功耗、碎土率、回填率的影响关系。

(1)前旋耕刀轴回转半径对功耗、碎土率、回填率影响

不同前旋耕刀轴回转半径对功耗、碎土率、回填率单因素方差分析结果如表 2 所示,影响关系曲线如图 5 所示。

表 2 前旋耕刀轴回转半径单因素方差分析结果

Tab. 2 Results of one-way ANOVA analysis for rotation radius of front rotary tiller knife shaft

项目		平方和	自由度	均方	F	P
功耗	组间	30.804	4	7.701	770.100	<0.01
	组内	0.100	10	0.010		
	总计	30.904	14			
碎土率	组间	53.076	4	13.269	1 326.90	<0.01
	组内	0.100	10	0.010		
	总计	53.176	14			
回填率	组间	81.336	4	20.334	2 033.40	<0.01
	组内	0.100	10	0.010		
	总计	81.436	4			

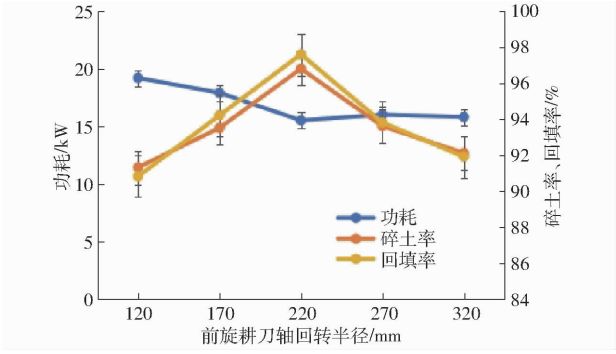

图 5 不同前旋耕刀轴回转半径下功耗、碎土率、回填率变化曲线

Fig. 5 Changes in power consumption, soil fragmentation rate and backfilling rate under different rotational radii of front rotary tiller knife shafts

对于功耗,前旋耕刀轴回转半径增大导致后旋耕刀组抛土时旋耕深度逐渐减小,深层土壤对功耗的影响更为明显,则前旋耕刀轴回转半径增大致使转轴功耗相应减小,当前旋耕刀轴回转半径从 120 mm 增加到 220 mm 时,双轴旋耕功耗下降 19.3%;当前旋耕刀轴回转半径从 220 mm 增加到 320 mm 时,双轴旋耕功耗保持在 15.8 kW 左右波动。

对于碎土率,前旋耕刀轴回转半径变化导致抛

土轨迹改变，在相同转速情况下，前旋耕刀轴回转半径越大，被抛土粒的速度越大，被抛出后撞击到盖板和后旋耕刀轴实现二次破碎，即破碎程度越高；当旋耕刀轴回转半径从 120 mm 增加到 220 mm 时，碎土率提高 5.5 个百分点；当前旋耕刀轴回转半径从 220 mm 增加到 320 mm 时，碎土率降低 4.7 个百分点。

对于回填率，前旋耕刀轴抛起土壤可不受干扰地落回，后旋耕刀轴作业不会破坏前旋耕刀轴抛起土壤的回落过程。前旋耕刀轴回转半径变化，影响着前后旋耕刀轴旋耕深度与抛撒速度变化，均影响回填率。当旋耕刀轴回转半径从 120 mm 增加到 220 mm 时，回填率提高 6.8 个百分点；当前旋耕刀轴回转半径从 220 mm 增加到 320 mm 时，碎土率降低 5.7 个百分点。

根据分析可知，前旋耕刀轴回转半径对功耗、碎土率、回填率具有显著影响（$P<0.01$），即显著性影响顺序由大到小依次为：回填率、碎土率、功耗。综上，前旋耕刀轴回转半径水平选择 170、220、270 mm。

（2）后旋耕刀轴回转半径对功耗、碎土率、回填率影响

不同后旋耕刀轴回转半径对功耗、碎土率、回填率单因素方差分析结果如表 3 所示，影响关系曲线如图 6 所示。

表 3　后旋耕刀轴回转半径单因素方差分析结果

Tab.3　Results of single-factor analysis of variance for rotational radius of rear rotary tiller knife shaft

项目		平方和	自由度	均方	F	P
功耗	组间	78.864	4	19.716	1 197.600	<0.01
	组内	0.100	10	0.010		
	总计	78.964	14			
碎土率	组间	137.676	4	34.419	3 441.90	<0.01
	组内	0.100	10	0.010		
	总计	137.776	14			
回填率	组间	54.636	4	13.659	1 365.900	<0.01
	组内	0.100	10	0.010		
	总计	54.736	14			

对于功耗，后旋耕刀轴回转半径增大，则反转抛土时旋耕深度增大，耕作阻力随之加大，致使转轴功耗对应增大，当后旋耕刀轴回转半径从 140 mm 增加到 240 mm 时，双轴旋耕功耗增大 13.3%；当后旋耕刀轴回转半径从 240 mm 增加到 340 mm 时，双轴旋耕功耗增大 29.4%。

对于碎土率，随后旋耕刀轴回转半径增大，抛土轨迹和抛土量随之增大，提升了土块抛出速度，进一步提升了破碎程度，后旋耕刀轴回转半径从 140 mm 增加到 240 mm 时，碎土率提升 6.1 个百分点；当后旋耕刀轴回转半径从 240 mm 增加到 340 mm 时，碎土率提升 1.4 个百分点。

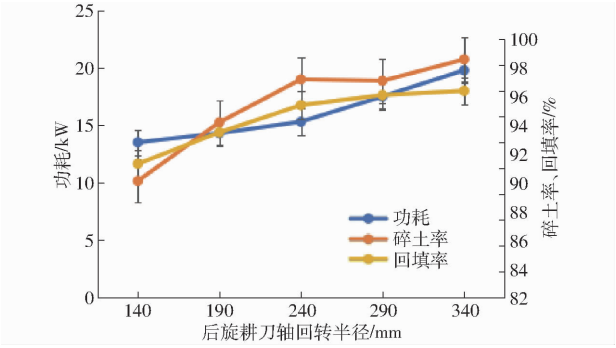

图 6　不同后旋耕刀轴回转半径下功耗、碎土率、回填率变化曲线

Fig.6　Changes in power consumption, soil fragmentation rate and backfilling rate under different rotational radii of rear rotating tiller knife shafts

对于回填率，后旋耕刀轴回转半径变化，则引起旋耕深度和后旋耕抛撒速度变化，均影响回填程度。当后旋耕刀轴回转半径从 140 mm 增加到 240 mm 时，回填率提升 4.1 个百分点；当后旋耕刀轴回转半径从 240 mm 增加到 340 mm 时，回填率提升 1.0 个百分点。

根据分析可知，后旋耕刀轴回转半径对功耗、碎土率、回填率具有显著影响（$P<0.01$），即显著性影响顺序由大到小依次为：碎土率、回填率、功耗。综上，后旋耕刀轴回转半径水平选择 190、240、290 mm。

（3）前后旋耕刀轴水平间距对功耗、碎土率、回填率影响

不同前后旋耕刀轴水平间距对功耗、碎土率、回填率单因素方差分析结果如表 4 所示，影响关系曲线如图 7 所示。

表 4　前后旋耕刀轴水平间距单因素方差分析结果

Tab.4　Result of single-factor variance analysis of horizontal spacing between front and rear rotary tiller knife shafts

项目		平方和	自由度	均方	F	P
功耗	组间	3.144	4	0.786	78.600	<0.01
	组内	0.100	10	0.010		
	总计	3.244	14			
碎土率	组间	48.223	4	12.056	951.763	<0.01
	组内	0.127	10	0.010		
	总计	48.349	14			
回填率	组间	19.884	4	4.971	497.100	<0.01
	组内	0.100	10	0.010		
	总计	19.984	14			

对于功耗，随前后旋耕刀轴水平间距增大，双轴

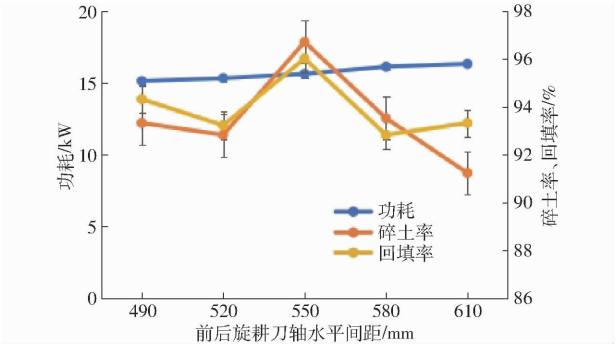

图 7 不同前后旋耕刀轴水平间距下功耗、碎土率、回填率变化曲线

Fig. 7 Changes in power consumption, soil fragmentation rate and backfilling rate with the horizontal spacing of front and rear rotary tiller knife shafts

旋耕阻力变大,导致双轴旋耕功耗增大,当前后旋耕刀轴水平间距从 490 mm 到 550 mm 时,双轴旋耕功耗增大 3.3%;当前后旋耕刀轴水平间距从 550 mm 到 610 mm 时,双轴旋耕功耗增大 4.5%。

对于碎土率,前后旋耕刀轴水平间距变化引起前后旋耕刀轴抛土轨迹交汇位置变化,即被抛土块撞击到盖板速度发生改变,进而影响碎土程度。当前后旋耕刀轴水平间距从 490 mm 到 550 mm 时,碎土率提升了 3.4 个百分点;当前后旋耕刀轴水平间距从 550 mm 到 610 mm 时,碎土率降低了 5.5 个百分点。

对于回填率,随前后旋耕刀轴水平间距变化,前后旋耕刀轴抛土轨迹交汇位置发生改变,影响旋耕抛撒速度和回填程度。当前后旋耕刀轴水平间距从 490 mm 到 550 mm 时,回填率提升 1.7 个百分点;当前后旋耕刀轴水平间距从 550 mm 到 610 mm 时,回填率降低 2.7 个百分点。

根据分析可知,前后旋耕刀轴水平间距对功耗、碎土率、回填率具有显著影响($P<0.01$),即显著性影响顺序由大到小依次为:碎土率、回填率、功耗。综上,前后旋耕刀轴水平间距选择 520、550、580 mm。

(4)前后旋耕刀轴垂直间距对功耗、碎土率、回填率影响

不同前后旋耕刀轴垂直间距对功耗、碎土率、回填率单因素方差分析结果如表 5 所示,影响关系曲线如图 8 所示。

对于功耗,前后旋耕刀轴垂直间距为负值时,参数水平越大,旋耕深度越深,功耗越大,在参数水平为 0 时,总旋耕深度达到最大,即功耗最大;前后旋耕刀轴垂直间距为正值时,参数水平越大后旋耕刀轴深度越浅,功耗逐渐减小;当前后旋耕刀轴垂直间

表 5 前后旋耕刀轴垂直间距单因素方差分析结果

Tab. 5 Result of single-factor analysis of variance for vertical spacing between front and rear rotary tiller knife shafts

项目		平方和	自由度	均方	F	P
功耗	组间	27.996	4	6.999	699.900	<0.01
	组内	0.100	10	0.010		
	总计	28.096	14			
碎土率	组间	144.444	4	36.111	3 611.100	<0.01
	组内	0.100	10	0.010		
	总计	144.544	14			
回填率	组间	107.604	4	26.901	2 690.100	<0.01
	组内	0.100	10	0.010		
	总计	107.704	14			

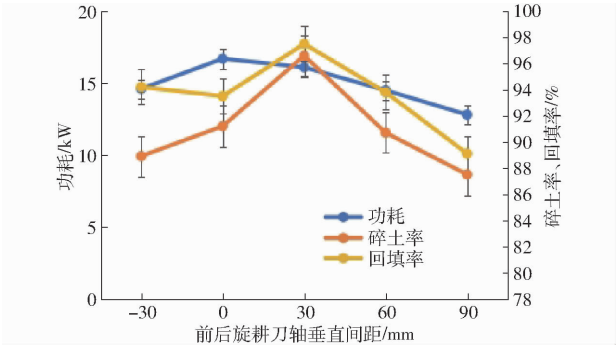

图 8 不同前后旋耕刀轴垂直间距下功耗、碎土率、回填率变化曲线

Fig. 8 Changes in power consumption, soil fragmentation rate and backfill rate with vertical spacing between front and rear rotary tiller knife shafts

距从 -30 mm 到 0 mm 时,功耗增大 3.1%;当前后旋耕刀轴垂直间距从 0 mm 到 90 mm 时,功耗降低 3.9%。

对于碎土率,前后旋耕刀轴垂直间距为负值时,参数增大,前旋耕刀轴深度由浅变深,后刀轴旋耕深度保持不变;参数为正值时,前旋耕刀轴深度保持不变,后旋耕刀轴深度由深变浅,在参数为 0 值时,两刀轴旋耕深度均达到最深,进一步加大碎土程度。当前后旋耕刀轴垂直间距从 -30 mm 到 30 mm 时,碎土率提升 7.7 个百分点;当前后旋耕刀轴垂直间距从 30 mm 到 90 mm 时,碎土率降低 9.1 个百分点。

对于回填率,前后旋耕刀轴垂直间距参数变化,引起前后旋耕刀轴抛撒轨迹交汇位置发生改变,进而影响旋耕抛撒速度和深度,对回填程度产生影响。当前后旋耕刀轴垂直间距从 -30 mm 到 30 mm 时,回填率提升 3.3 个百分点;当前后旋耕刀轴垂直间距从 30 mm 到 90 mm 时,回填率降低 8.4 个百分点。

根据分析可知,前后旋耕刀轴垂直间距对功耗、

碎土率、回填率具有显著影响($P<0.01$)，即显著性影响顺序由大到小依次为：碎土率、回填率、功耗。综上，前后旋耕刀轴垂直间距选择 0、30、60 mm。

3.4　响应面优化试验

基于 Box－Behnken 方法进行试验设计，以前旋耕刀轴回转半径、后旋耕刀轴回转半径、前后旋耕刀轴水平间距、前后旋耕刀轴垂直间距为因素进行仿真试验，探究功耗、碎土率、回填率指标最优参数组合。

3.4.1　试验设计

根据理论分析结果，结合单因素试验确定因素水平优选范围，试验因素编码如表 6 所示。试验方案与试验结果如表 7 所示(表中 x_1、x_2、x_3、x_4 为因素编码值)，每组试验重复 3 次取平均值。

表 6　试验因素与编码

Tab.6　Test factors and coding　　mm

编码	因素			
	前旋耕刀轴回转半径	后旋耕刀轴回转半径	前后旋耕刀轴水平间距	前后旋耕刀轴垂直间距
－1	170	190	520	0
0	220	240	550	30
1	270	290	580	60

3.4.2　试验结果与分析

通过对表 7 试验数据进行多元回归拟合分析，得到各因素对功耗、碎土率、回填率影响的回归模型

$$\begin{cases} Y_1 = 3.95 - 0.042x_1 + 0.108x_2 + 0.046 9x_3 - 0.037 3x_4 + \\ \quad 0.010 3x_1x_2 - 0.008 9x_1x_3 + 0.003 3x_1x_4 - \\ \quad 0.008 0x_2x_3 + 0.008 6x_2x_4 + 0.011 2x_3x_4 - 0.063 2x_1^2 - \\ \quad 0.052 6x_2^2 - 0.040 2x_3^2 - 0.526 8x_4^2 \\ Y_2 = 96.58 + 1.12x_1 + 0.925 0x_2 + 0.725 0x_3 + 1.01x_4 + \\ \quad 0.075 0x_1x_2 - 0.150 0x_1x_3 + 0.500 0x_1x_4 - \\ \quad 0.950 0x_2x_3 - 0.250 0x_2x_4 - 0.225 0x_3x_4 + 0.647 5x_1^2 + \\ \quad 0.122 5x_2^2 - 1.20x_3^2 - 3.38_4^2 \\ Y_3 = 96.62 + 0.391 7x_1 + 1.47x_2 - 0.458 3x_3 + 0.466 7x_4 - \\ \quad 0.175 0x_1x_2 + 0.975 0x_1x_3 + 0.375 0x_1x_4 + \\ \quad 1.15x_2x_3 - 0.175 0x_2x_4 - 1.20x_3x_4 - 0.197 5x_1^2 - \\ \quad 1.28x_2^2 - 2.05x_3^2 - 5.56x_4^2 \end{cases} \tag{14}$$

根据表 8 方差分析可知，功耗、碎土率、回填率误差模型 P 均小于 0.01，表明回归模型高度极显著；失拟项 P 分别为 0.245 2、0.264 3、0.082 5，表明回归模型拟合程度高；决定系数 R^2 分别为 0.981 4、0.943 8、0.882 6，表明模型可分别解释 98.14%、94.38%、88.26%以上的评价指标，因此回归模型极显著，失拟项不显著，决定系数接近 1，表明该回归方程拟合较好。利用 Design-Expert 软件进行中心复合试验时，精确度大于 4 模型才具有较好的预测性，该模型的精确度分别为 20.803 4、16.908 5 和 6.324 1，表明该模型可以较好地预测旋耕刀组的功耗、碎土率、回填率。去除不显著回归项优化后的方程为

表 7　试验方案及结果

Tab.7　Test protocol and results

序号	因素				功耗	碎土率	回填率
	x_1	x_2	x_3	x_4	Y_1/kW	Y_2/%	Y_3/%
1	0	0	－1	1	11.2	92.8	91.7
2	1	0	1	0	14.6	97.3	95.2
3	0	0	0	0	15.5	96.8	97.6
4	1	－1	0	0	13.6	97.7	96.5
5	0	－1	0	－1	11.3	91.5	87.0
6	0	0	1	1	11.8	94.6	88.6
7	1	0	0	1	10.6	95.6	90.4
8	0	0	0	－1	11.9	91.5	89.9
9	0	－1	－1	0	13.4	92.7	93.2
10	0	－1	0	1	10.4	93.8	89.2
11	1	1	0	0	16.0	99.7	98.1
12	－1	0	－1	0	14.7	94.4	93.2
13	0	0	0	0	15.4	97.2	95.4
14	1	0	0	－1	11.0	93.9	89.8
15	0	1	0	－1	12.1	93.3	88.4
16	0	1	1	0	15.9	96.6	96.8
17	－1	－1	0	0	14.0	95.0	93.0
18	0	－1	1	0	14.3	96.1	88.7
19	0	1	－1	0	15.2	97.0	96.7
20	0	0	0	0	16.1	95.6	95.5
21	1	0	－1	0	13.9	97.0	93.1
22	0	0	－1	－1	11.6	88.8	88.2
23	0	0	0	0	15.6	96.7	97.1
24	0	1	0	1	11.4	94.6	89.9
25	－1	0	1	0	15.7	95.3	91.4
26	0	1	0	0	15.3	96.6	97.5
27	－1	0	0	－1	11.7	93.3	93.2
28	－1	1	0	0	16.1	96.7	95.3
29	－1	0	0	1	11.2	93.3	92.3

$$\begin{cases} Y_1 = 3.92 - 0.042x_1 + 0.108x_2 + 0.046 9x_3 - \\ \quad 0.037 3x_4 - 0.055 6x_1^2 - 0.045 0x_2^2 - 0.519 2x_4^2 \\ Y_2 = 97.00 + 1.12x_1 + 0.925 0x_2 + 0.725 0x_3 + \\ \quad 1.01x_4 - 0.950 0x_2x_3 - 1.33x_3^2 - 3.50x_4^2 \\ Y_3 = 95.81 + 0.391 7x_1 + 1.47x_2 - 0.458 3x_3 + \\ \quad 0.466 7x_4 - 1.81x_3^2 - 5.32x_4^2 \end{cases} \tag{15}$$

3.4.3　参数优化

为得到各因素最优工作参数，利用 Design-

表 8 功耗、碎土率、回填率方差分析

Tab. 8 Analysis of variance for power consumption, soil breakage rate, and backfill rate

方差来源	功耗				碎土率				回填率			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	2.04	14	52.71	<0.000 1	141.42	14	16.79	<0.000 1	263.04	14	4.64	0.003 5
x_1	0.021 5	1	7.77	0.014 5	15.19	1	25.24	0.000 2	1.84	1	0.454 4	0.511 2
x_2	0.139 9	1	50.51	<0.000 1	10.27	1	17.06	0.001 0	25.81	1	6.37	0.024 3
x_3	0.026 4	1	9.54	0.008 0	6.31	1	10.48	0.006 0	2.52	1	0.622 3	0.443 4
x_4	0.016 7	1	6.02	0.027 8	12.20	1	20.28	0.000 5	2.61	1	0.645 1	0.435 3
x_1x_2	0.000 4	1	0.154 4	0.700 3	0.022 5	1	0.037 4	0.849 5	0.122 5	1	0.030 2	0.864 4
x_1x_3	0.000 3	1	0.114 0	0.740 6	0.090 0	1	0.149 6	0.704 8	3.80	1	0.938 7	0.349 1
x_1x_4	0.000 0	1	0.015 3	0.903 3	1.000 0	1	1.66	0.218 3	0.562 5	1	0.138 9	0.715 0
x_2x_3	0.000 3	1	0.093 4	0.764 4	3.61	1	6.00	0.028 1	5.29	1	1.31	0.272 3
x_2x_4	0.000 3	1	0.107 6	0.747 7	0.250 0	1	0.415 4	0.529 6	0.122 5	1	0.030 2	0.864 4
x_3x_4	0.000 5	1	0.180 5	0.677 4	0.202 5	1	0.336 5	0.571 1	5.76	1	1.42	0.252 9
x_1^2	0.025 9	1	9.35	0.008 5	2.72	1	4.52	0.051 8	0.253 0	1	0.062 5	0.806 3
x_2^2	0.018 0	1	6.49	0.023 2	0.097 3	1	0.161 8	0.693 6	10.71	1	2.64	0.126 2
x_3^2	0.010 5	1	3.78	0.072 2	9.38	1	15.59	0.001 5	27.19	1	6.71	0.021 4
x_4^2	1.80	1	650.09	<0.000 1	73.99	1	122.96	<0.000 1	200.52	1	49.50	<0.000 1
残差	0.038 8	14			8.42	14			56.71	14		
失拟项	0.032 6	10	2.11	0.245 2	7.02	10	1.99	0.264 3	52.00	10	4.42	0.082 5
纯误差	0.006 2	4			1.41	4			4.71	4		
总和	2.08	28			149.85	28			319.75	28		

注：$P<0.01$ 为影响极显著；$P<0.05$ 为影响显著。

Expert 数据分析软件对所建立的三元二次正交回归试验进行参数最优化。本文采用 NSGA－Ⅱ优化算法，该算法所特有的精英保留策略和多样性维持机制可以确保其计算结果的收敛性与多样性。以最小功耗、最大碎土率和回填率为优化目标，以前旋耕刀轴回转半径、后旋耕刀轴回转半径、前后旋耕刀轴水平间距和前后旋耕刀轴垂直间距为优化对象进行研究。基于上述试验基础，确定前旋耕刀轴回转半径为 170～270 mm，后旋耕刀轴回转半径为 190～290 mm，前后旋耕刀轴水平间距为 520～580 mm，前后旋耕刀轴垂直间距为 0～60 mm。

对于多目标优化问题，不可能使每个目标同时最优。但可以在目标之间进行协调和权衡，以尽可能地满足每个目标，这意味着最优边界上的所有解都可以用于方案优化。在兼顾功耗最小、碎土率最大和回填率最大的原则下，选取前旋耕刀轴回转半径为 268.95 mm，后旋耕刀轴回转半径为 244.51 mm，前后旋耕刀轴水平间距为 546.04 mm，前后旋耕刀轴垂直间距为 54.31 mm，此时功耗为 12.2 kW，碎土率为 97.3%，回填率为 94.0%。

4 田间试验

4.1 试验条件

为验证双轴分层旋耕装置的播种均匀性和播深一致性，于 2025 年 6 月，在山东省菏泽市牡丹区田间试验地进行田间验证试验，试验土壤类型为沙壤土，土壤平均含水率为 14.5%，0～50 mm 处土壤平均坚实度为 208 kPa、50～150 mm 处为 797 kPa。

4.2 试验指标与方法

根据 GB/T 5668—2008《旋耕机》、GB/T 5262—2008《农业机械试验条件测定方法的一般规定》性能试验要求，结合仿真试验分析研究，田间试验选取碎土率和耕后地表平整度为试验指标进行装置性能测定。试验现场如图 9 所示（试验过程把镇压结构锁住，不与土壤发生互作）。



图 9 田间试验现场

Fig. 9 Field test site

（1）碎土率

机组旋耕过后，分别选取 5 个旋耕行程，每个行程选择一个测量区域（0.5 m×0.5 m），使用钢尺测量各个土块的最长边并进行分类，再通过电子秤称量 0～4 cm、4～8 cm、≥8 cm 3 类土块质量并记录，取其平均值。计算公式为

$$S' = \frac{m_2'}{m_1'} \times 100\% \tag{16}$$

式中　S'——碎土率，%

m_2'——最长边小于等于 4 cm 的土块质量，kg

m_1'——测量区域内的全耕层土壤质量，kg

（2）耕后地表平整度

作业前选取水平基准线（距离地面基准距离 10 cm），机组旋耕过后，选取 3 个行程，每个行程选择 10 个测量区位，每个测量区位间隔 2 m，其中测量点使用土铲将垂直方向上耕过的土壤清理，再通过钢尺与卷尺测量到水平基准线的距离，记录测量结果。计算公式为

$$\begin{cases} K_j = \sqrt{\dfrac{\sum\limits_{i=1}^{n_j} (b_{ji} - b_j)^2}{n_j - 1}} \\ K = \dfrac{\sum\limits_{j=1}^{N} K_j}{N} \end{cases} \tag{17}$$

式中　K_j——第 j 个行程各点与水平基准线垂直标准差，cm

b_j——第 j 个行程各点与水平基准线垂直距离平均值，cm

b_{ji}——第 j 个行程第 i 个点与水平基准线垂直距离，cm

K——耕后地表平整度，cm

n_j——样本数量，个

N——行程各点与水平基准线垂直标准差的个数，个

4.3　试验结果与分析

结合实际田间试验情况，将选定仿真的优化结果圆整，前旋耕刀轴回转半径为 269 mm，后旋耕刀轴回转半径为 245 mm，前后旋耕刀轴水平间距为 546 mm，前后旋耕刀轴垂直间距为 54 mm。按照上述试验方法进行 3 次重复性试验，结果表明：当前旋耕刀轴回转半径为 269 mm，后旋耕刀轴回转半径为 245 mm，前后旋耕刀轴水平间距为 546 mm，前后旋耕刀轴垂直间距为 54 mm 时，碎土率为 96.8%，耕后地表平整度为 2.4 cm，满足小麦播种作业标准，可为小麦精量播种装置的设计优化提供技术支撑。仿真得到优化结果满足实际田间要求，说明该仿真模型可靠，但与田间试验相比会产生误差，主要受栽植密度、人为因素、地面起伏、装置安装等方面影响。

5　结论

（1）设计了一种双轴分层旋耕装置，分析了旋耕切抛土机理，明确了双轴旋耕运动规律及抛土性能，确定了影响双轴分层旋耕覆土装置工作性能的主要因素为前旋耕刀轴回转半径、后旋耕刀轴回转半径、前后旋耕刀轴水平间距和前后旋耕刀轴垂直间距。

（2）运用离散元仿真，结合单因素与中心组合正交试验得出最优参数组合为：前旋耕刀轴回转半径 268.95 mm，后旋耕刀轴回转半径 244.51 mm，前后旋耕刀轴水平间距 546.04 mm，前后旋耕刀轴垂直间距 54.31 mm，仿真功耗为 12.2 kW，碎土率为 97.3%、回填率为 94.0%。

（3）田间试验表明：当前旋耕刀轴回转半径为 269 mm，后旋耕刀轴回转半径为 245 mm，前后旋耕刀轴水平间距为 546 mm，前后旋耕刀轴垂直间距为 54 mm 时，碎土率为 96.8%，耕后地表平整度为2.4 cm，满足小麦播种作业标准，利于提升播种质量。

参　考　文　献

[1] 郭俊，姬长英，方会敏，等. 正反转旋耕后土壤和秸秆位移试验分析[J]. 农业机械学报，2016，47(5)：21－26.
Guo Jun，Ji Changying，Fang Huimin，et al. Experimental analysis of soil and straw displacement after up-cut and down-cut rotary tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(5)：21－26.（in Chinese）

[2] 顾宸嘉，奚小波，韩连杰，等. 双轴旋耕压槽播种开沟匀覆土作业机设计与试验[J]. 中国农机化学报，2021，42(11)：17－22.
Gu Chenjia，Xi Xiaobo，Han Lianjie，et al. Design and experiment research of double-axis rotary tillage machine for sowing，ditching and covering soil[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2021，42(11)：17－22.（in Chinese）

[3] 叶伟伟. 双轴旋耕施肥贴地宽带播种复式作业机设计及试验研究[D]. 扬州：扬州大学，2019.
Ye Weiwei. Design and experimental research on dual-axis rotary tilling，fertilizing，close-to-ground broad-band seeding combined machine[D]. Yangzhou：Yangzhou University，2019.（in Chinese）

[4] 潘浩然，胡建平，骆佳明，等. 小麦双轴旋耕播深控制装置设计及试验研究[J]. 农机化研究，2021，43(6)：58－65.
Pan Haoran，Hu Jianping，Luo Jiaming，et al. Design and experimental study on sowing depth control device of double-axis rotary tiller of wheat drill[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2021，43(6)：58－65.（in Chinese）

[5] 杨庆璐，陈桂斌，谢立娟，等. 伸缩指杆式玉米秸秆旋耕掩埋机设计与试验[J]. 农业机械学报，2020，51(12)：35－43.
Yang Qinglu，Chen Guibin，Xie Lijuan，et al. Design and experiment of telescopic finger stalk of maize straw burying machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(12)：35－43.（in Chinese）

[6] 胡建平，赵军，潘浩然，等. 基于离散元的双轴旋耕机功耗预测模型[J]. 农业机械学报，2020，51(增刊 1)：9－16.

Hu Jianping, Zhao Jun, Pan Haoran, et al. Prediction model of double axis rotary power consumption based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S1): 9 - 16. (in Chinese)

[7] 管春松. 双轴分层旋耕碎土起垄技术基础研究[D]. 镇江:江苏大学, 2021.
Guan Chunsong. Basic research on the layered tillage technology by biaxial rotary tillage component for vegetable bed former [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021. (in Chinese)

[8] 潘浩然. 基于离散元的双轴旋耕灭茬机设计及参数优化[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
Pan Haoran. Design and parameter optimization of double axis rotary tillage stubble extinguisher based on discrete element method[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020. (in Chinese)

[9] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018.

[10] 田华. 影响旋耕机作业质量和功耗的主要因素[J]. 当代农机, 2010(5): 74 - 75.
Tian Hua. The main factors affecting the operation quality and power consumption of rotary tillers[J]. Contemporary Farm Machinery, 2010(5): 74 - 75. (in Chinese)

[11] 闻邦椿. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

[12] 骆佳明. 小麦匀播播种机设计及试验研究[D]. 镇江:江苏大学, 2019.
Luo Jiaming. Design and experimental study of wheat uniform seeder[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019. (in Chinese)

[13] 薛冰. 小麦双轴旋耕播种机播种深度测控系统研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院, 2024.
Xue Bing. Research on sowing depth measurement and control system of wheat twin-shaft rotary planter[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2024. (in Chinese)

[14] 丁为民, 王耀华, 彭嵩植. 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. 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)

[15] 郑侃, 刘国阳, 国立伟, 等. 土壤分流式宽苗带小麦少耕播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 128 - 138.
Zheng Kan, Liu Guoyang, Guo Liwei, et al. Design and experiment of wide-boundary seldom-tillage wheat planter with soil-shunting function[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 128 - 138. (in Chinese)

[16] 黄玉祥, 高鹏洋, 张庆凯, 等. 免耕播种机切茬导草组合式草土分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 67 - 78.
Huang Yuxiang, Gao Pengyang, Zhang Qingkai, et al. Design and experiment of grass soil separation device with combination of stubble cutting and grass guiding used for no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 67 - 78. (in Chinese)

[17] 郑慧慧,杜宁,魏宸博,等.基于地块面积和形状的土地整治机械旋耕效率研究[J].农业机械学报,2024,55(7):232 - 240,259.
Zheng Huihui, Du Ning, Wei Chenbo, et al. Mechanical tillage efficiency of land consolidation based on plot area and shape [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(7):232 - 240,259. (in Chinese)

[18] 李伯全,陈翠英.潜土逆转旋耕被抛土粒与罩壳碰撞分析[J]. 农业机械学报, 1999, 30(6):44 - 45,55.
Li Boquan, Chen Cuiying. An analysis on collision of throwing soil with cover of latent soil of up-cut rotary cultivation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1999,30(6):44 - 45,55. (in Chinese)

[19] 方会敏, 姬长英, Ahmed Ali Tagar, 等. 秸秆土壤旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 60 - 67.
Fang Huimin, Ji Changying, Ahmed Ali Tagar, et al. Simulation analysis of straw movement in straw soil rotary blade system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 60 - 67. (in Chinese)

[20] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 62 - 72. (in Chinese)

[21] 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 反旋深松联合作业耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 61 - 71.
Zheng Kan, He Jin, Li Hongwen, et al. Design and experiment of combined tillage implement of reverse-rotary and subsoiling [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 61 - 71. (in Chinese)

[22] Mustafa U, John M, Chris S. Three dimensional discrete element modeling DEM of tillage accounting for soil cohesion and adhesion[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 298 - 306.

[23] 郑侃. 深松旋耕作业次序可调式联合作业机研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
Zheng Kan. Study on subsoiling and rotary tiilage operation adjustble combine machine[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[24] 常增村, 王东伟, 赵泽龙, 等. 盐碱地土壤切挤组合式花生挖掘收获装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(12): 331 - 342.
Chang Zengcun, Wang Dongwei, Zhao Zelong, et al. Design and testing of cutting and squeezing combination peanut digging and harvesting device for saline soils[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12): 331 - 342. (in Chinese)

[25] 吴正阳,李洪文,何进,等.抛扬式秸秆促腐还田复式作业机设计与试验[J].农业机械学报,2026,57(6):45 - 54,175.
Wu Zhengyang, Li Hongwen, He Jin, et al. Design and test of combination machine for accelerated decomposition of straw and field returning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026,57(6):45 - 54,175. (in Chinese)