

开沟旋耕机渐变螺旋升角轴向匀土刀辊设计与试验

郑侃^{1,2} 李宇飞^{1,2} 夏俊芳^{1,2} 刘国阳¹ 程健¹ 康启新¹

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对长江中下游农业区开厢沟后旋耕作业地表平整度差、土壤轴向分布不均匀等问题,设计了一种渐变螺旋升角轴向匀土刀辊。分析了旋耕刀轴向运土力学条件,建立了匀土刀辊旋耕刀扰土体积参数方程和旋耕刀渐变螺旋升角排列螺旋线方程,并分析确定了影响匀土刀辊轴向匀土性能的关键因素为刀辊转速、旋耕切土节距、初始螺旋升角。运用离散元法模拟匀土刀辊作业过程,以耕后地表平整度为试验指标,以刀辊转速、旋耕切土节距、初始螺旋升角为试验因素,进行了正交试验,建立地表平整度回归方程。利用 Design-Expert 分析软件得到最优参数组合为:刀辊转速 260 r/min、旋耕切土节距 8.3 cm、初始螺旋升角 71°,此时仿真地表平整度为 17.35 mm。在最优参数组合下进行了田间试验,结果表明,匀土刀辊作业后,地表平整度、土壤轴向分布均匀度、耕深稳定性系数、碎土率的均值分别为 14.5 mm、8.82%、92.34%、81.66%,整体耕整效果优于常用旋耕刀辊。

关键词: 小麦种植开沟旋耕联合作业机; 渐变; 螺旋升角; 旋耕; 刀辊

中图分类号: S222.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)05-0063-11

OSID:



Design and Experiment of Land Leveling Blade Roller of Ditching and Rotary Tiller with Gradual Spiral Angle

ZHENG Kan^{1,2} LI Yufei^{1,2} XIA Junfang^{1,2} LIU Guoyang¹ CHENG Jian¹ KANG Qixin¹

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: To solve the problems of poor land leveling and nonuniform axial distribution of soil in rotary tillage after opening drainage ditching in the middle and lower reaches of the Yangtze River, a blade roller for rotary tillage and axial land leveling with gradual spiral angle was designed. The volume parameter equation of soil disturbance of rotary tillage blade roller was established, the mechanical conditions of axial soil transport of rotary tillage blade were analyzed, and the spiral line equation of rotary tillage blade arrangement with gradient spiral angle was established. The key factors affecting the axial uniformity of soil layer were determined as blade roller rotary speed, cutting pitch of rotary tillage and initial spiral angle. The discrete element simulation model of rotary tillage blade roller with gradual spiral angle was established by using distinct element method. The regression equation of soil layer levelness was established by orthogonal test with the blade roller rotary speed, cutting pitch of rotary tillage and initial spiral angle as the test parameters. The Design-Expert analysis software was used, when the blade roller rotary speed, cutting pitch of rotary tillage and initial spiral angle were 260 r/min, 8.3 cm, and 71°, respectively, the optimized soil layer levelness was 17.35 mm. The field test under the optimized parameters showed that the soil layer levelness, soil distribution uniformity, tillage depth stability and soil broken rate were 14.5 mm, 8.82%, 92.34% and 81.66%, respectively, and the comprehensive tillage performance was better than that of the traditional rotary tillage blade roller. The research result could provide a reference for the equipment optimization and upgrading of the combined operation of wheat planting, drainage ditching and rotary tillage in agricultural areas of the middle and lower reaches of the Yangtze River.

Key words: ditching and rotary tillage combined machine for wheat seeding; gradation; spiral angle; rotary tillage; blade roller

收稿日期: 2021-01-19 修回日期: 2021-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(31901412)、湖北省自然科学基金项目(2019CFB130)和中央高校基本科研业务费专项基金项目(2662018QD033)

作者简介: 郑侃(1987—),男,讲师,博士,主要从事稻麦轮作耕播技术与装备研究, E-mail: zhengkan@mail.hzau.edu.cn

0 引言

旋耕是长江中下游农业区小麦种植的主要耕作方式。该农业区雨水充沛,降雨较为集中,需开出厢沟,从而达到明水自流、暗水自降、雨住田干、降低渍害的目的^[1-3]。因此,开沟常与旋耕联合作业。

近年来,国内外旋耕刀辊设计多采用组合式刀辊、等螺旋升角排列,以提高耕整质量。如杨庆璐等^[4]为实现玉米秸秆的有效掩埋,设计了旋耕刀与伸缩杆组合式刀辊,在同一切土小区安装 4 把等螺旋升角排列的旋耕刀;张春岭等^[5]研制了六头螺旋秸秆还田耕整机刀辊,旋耕刀采用四头螺旋线排列,二次切刀采用两头螺旋线排列;LEE 等^[6]基于水稻直播模式,设计了一种圆盘刀与旋耕刀组合式刀辊,提高了种带土壤破碎率;祝英豪等^[7]优化了螺旋横刀与旋耕刀组合排列方式,形成人字型旋埋刀辊;ZHENG 等^[8]根据深松旋耕联合作业机深松后的土壤紧实度分布特征,设计了长短刀组合式旋耕刀辊,降低了机具振动,提高了地表平整度。

在旋耕抛土、运土方面,相关学者通过仿真、台架试验、高速摄像等手段,揭示旋耕作业过程。方会敏等^[9-10]基于离散元法分析得出,提高旋耕转速可增加土壤水平运动位移与侧向运动位移,增大土壤抛撒范围;MATIN 等^[11-12]通过高速摄像分析旋耕刀作业时发现,普通旋耕刀侧向抛土量大,回填量小,而旋耕直刀则相反,并以此为目标优化了旋耕直刀;ZHAO 等^[13]采用离散元法进行土槽试验,对比了不同形状的平面刀片,结果表明,阿基米德螺旋刀片抛土量最大,正弦指数螺旋叶片抛土量最小,两者随着滑切角的增加,抛土量减少;王金峰等^[14]建立了还田刀与土壤间的动力学模型,研究各参数对还田刀抛土能力的影响规律,优化了还田刀结构与运动参数。目前,旋耕机常用旋耕刀辊多为等螺旋升角排列,同一切土小区旋耕刀朝向相反,刀辊抛土性能突出,轴向匀土性能较弱。在长江中下游农业区,厢沟犁开出厢沟后,沟内土壤堆积在厢面两侧,旋耕后厢体两侧土壤高、中部低,地表平整度差,播种镇压后厢体两侧土壤密实、中部松散,轴向土壤分布均匀性差,易造成小麦长势不均匀、雨季厢体中部积水渍害严重。

为提高旋耕刀辊轴向匀土性能,本文结合长江中下游农业区小麦耕种农艺要求,设计一种渐变螺旋升角轴向匀土刀辊。分析旋耕刀轴向运土力学条件,建立旋耕刀扰土体积参数方程和渐变螺旋升角旋耕刀排列螺旋线方程,确定影响匀土性能的关键

因素。基于离散元法获取匀土刀辊最优参数组合,并进行田间试验验证,以期为长江中下游农业区小麦种植开沟旋耕联合作业机设计提供参考。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

如图 1 所示,开沟旋耕联合作业机由厢沟犁、挡土板、悬挂架、机架、变速箱与匀土刀辊组成。左、右匀土刀辊对称安装在整机上,旋耕刀由外侧向内侧按照渐变螺旋升角排列在刀轴上;同一切土小区两把旋耕刀夹角 180°,朝向均向内侧。

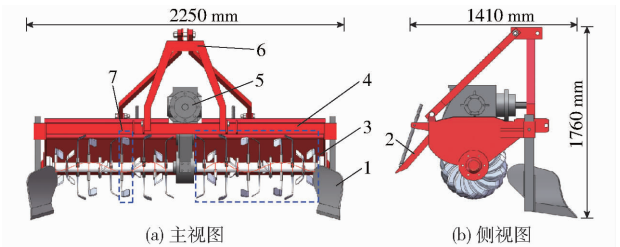


图 1 开沟旋耕联合作业机结构图
Fig. 1 Structure schematics of ditching and rotary tillage combined machine

1. 厢沟犁 2. 挡土板 3. 匀土刀辊 4. 机架 5. 变速箱 6. 悬挂架 7. 同一切土小区

1.2 工作原理

匀土刀辊工作原理图如图 2 所示。工作时,开沟旋耕联合作业机匀速直线运动,两厢沟犁在未耕区开出两条厢沟,并将厢沟土壤扣在厢面两侧;拖拉机通过后输出轴、联合作业机变速箱带动匀土刀辊正转(与拖拉机轮子转向相同),旋耕刀对未耕区与厢沟土壤进行剪切、撕裂、后抛作用,同时因匀土刀辊由外侧向内侧旋耕刀排列的螺旋升角逐渐减小以及同一切土小区两把旋耕刀朝向均向内,使未耕区厢面两侧厢沟土壤不断向机具中部运移;土壤在匀土刀辊、挡土板的作用下运动,最终形成平整、细碎、土壤轴向分布均匀的已耕区。

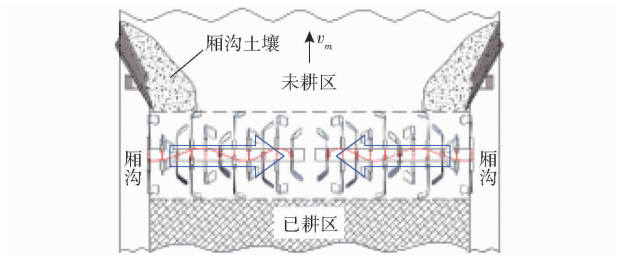


图 2 匀土刀辊工作原理图
Fig. 2 Schematic of designed rotary tillage blade roller

2 力学分析与参数设计

分析匀土刀辊旋耕刀扰土量、作用土壤力学以

及螺旋线排列,得到扰土体积数值解、轴向运动力学条件及渐变螺旋升角排列螺旋线方程,确定影响匀土刀辊匀土性能的关键因素,为优化仿真研究奠定基础。

2.1 匀土刀辊旋耕刀扰土量分析

在耕作过程中,旋耕刀扰土量直接影响刀辊轴向匀土性能,因此需构建旋耕刀扰土体积参数方程,分析旋耕刀单周期内扰土体积影响因素。首先求得同一切土小区单把旋耕刀周期内切土面积,建立刀辊某一瞬时刀轴中心 O 的坐标系,如图 3a 所示, x 轴为机具前进方向、 y 轴为垂直地面方向。为有效切削土壤,旋耕刀运动轨迹为前进与旋转的运动合成,且符合余摆线要求。单把旋耕刀周期内切土面积 S 包括点 P_1 、 P_2 、 P'_1 围成的曲边三角形面积 S_1 ,点 P_1 、 P'_1 、 P'_3 、 P_3 围成的矩形面积 S_2 ,并去除点 P_3 、 P_4 、 P'_3 围成的曲边三角形面积 S_3 。其中点 P_1 为刀端某一周期第 1 次入土点,点 P_2 为刀端两次周期运动交点(第 1 次转动),点 P_3 为刀端相同周期第 2 次入土点,点 P_4 为刀端两次周期运动交点(第 2 次转动), P_1P_2 曲线方程为 $y_1(x)$, P_3P_4 曲线方程为 $y_2(x)$,点 P'_1 、 P'_3 分别为过点 P_1 、 P_3 垂线与沟底线的交点。单把旋耕刀周期内切土面积 S 为

$$S = S_1 + S_2 - S_3 = \int_{x_2}^{x_1} dx \int_{-R}^{y_1(x)} dy + h(x_3 - x_1) - \int_{x_4}^{x_3} dx \int_{-R}^{y_2(x)} dy \tag{1}$$

式中 h ——耕深,mm
 R ——旋耕刀回转半径,mm
 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 ——点 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 x 轴坐标,mm

由图 3a 可知旋耕刀端点轨迹参数方程为

$$\begin{cases} x = R\cos(\omega t) + v_m t \\ y = -R\sin(\omega t) \end{cases} \tag{2}$$

式中 v_m ——机具前进速度,m/s
 ω ——旋耕刀回转角速度,rad/s
 t ——时间,s

联立式(1)得到单把旋耕刀周期内切土面积 S 参数方程为

$$S = \int_{t_2}^{t_1} (R - R\sin(\omega t))(v_m - R\sin(\omega t)) dt + h(R\cos(\omega t_3) + v_m t_3 - R\cos(\omega t_4) - v_m t_4) - \int_{t_4}^{t_3} (R - R\sin(\omega t))(v_m - R\sin(\omega t)) dt \tag{3}$$

其中,旋耕刀通过点 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 的时间 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 计算式为

$$\begin{cases} \omega t_1 = \arcsin\left(1 - \frac{h}{R}\right) \\ R\cos(\omega t_2) + v_m t_2 = \frac{3\pi v_m}{2\omega} \\ t_3 = \frac{2\pi}{\omega} + t_1 \\ t_4 = \frac{3\pi}{\omega} - t_2 \end{cases} \tag{4}$$

其次求得单把旋耕刀周期内切土厚度 T ,由图 3b 所示的旋耕刀切土厚度示意图,根据面积割补法,旋耕刀作业后切土堡片横切面积假设为平行四边形。横截面积随着旋耕刀作业深度的增加逐渐减小,其中旋耕刀正切刃切削长度 L 保持不变,又因正切刃弯折角 θ 为定值,由图 3b 的几何关系求得切土厚度 T 为

$$T = L\sin(\pi - \theta) \tag{5}$$

最后由式(3)~(5)单把旋耕刀切土面积与厚度以及同一切土小区 z 把朝向相同旋耕刀(为保证旋耕刀碎土质量、沟底平整度,同一切土小区 z 把旋耕刀采用等间距分布在刀轴上)旋耕切土节距 s 关系式($s = 2\pi v_m / (\omega z)$)^[15],求得同一切土小区 z 把旋耕刀作业时扰土体积 V 数值解为

$$V = \frac{ST}{z} = hsL\sin\theta + \frac{\pi - 2\omega t_2 - 2\cos(\omega t_2)}{2\pi} RsL\sin\theta + \frac{\pi - 2\omega t_2 - 4\cos(\omega t_2) + \sin(2\omega t_2)}{2z} R^2 L\sin\theta \tag{6}$$

可通过式(4)与切土节距 s 求出 t_2 关系式为

$$R\cos(\omega t_2) + \frac{sz\omega t_2}{2\pi} = \frac{3sz}{4} \tag{7}$$

综合式(6)、(7)可知,扰土体积 V 与 z 、 h 、 s 、 R 、 ω 、 L 、 θ 等参数有关。实际设计中,匀土刀辊需在满足种植农艺、实用性以及通用参数要求上进行设计。为减小土壤粘附堵塞,且便于安装,旋耕刀辊一般采用双头螺旋排列^[16], z 取 2;依据长江中下游小麦种植农艺,为利于改善土壤耕层结构、加速土壤熟化以及小麦幼苗出土生根^[17],采用旋耕作业时,耕深 h 取 14 cm 为最佳(代入公式计算时均转换成国际单位制,下同);另外为保证耕作质量,水稻收获后通过晒田和灌水造墒方式控制土壤含水率在 20%~35% 之间,此时,旋耕切土节距 s 取值范围为 6~10 cm^[18];稻田旱作旋耕作业常用 IIT245 型旋耕刀,参考 GB/T 5669—2017《旋耕机械刀和刀座》,回转半径 R 为 245 mm、正切刃弯折角 θ 为 120°、正切刃切削长度为 L 为 60 mm;由 $\omega = 2\pi n/60$ 可将旋耕刀回转角速度 ω 转化为刀辊转速 n ,参照 GB/T 5668—2017《旋耕机》, n 取值范围为 150~350 r/min。综合式(6)、(7),并结合上述分析,选取刀辊转速 n (150~

350 r/min)、旋耕切土节距 s (6 ~ 10 cm) 作为匀土刀辊轴向匀土性能试验因素。

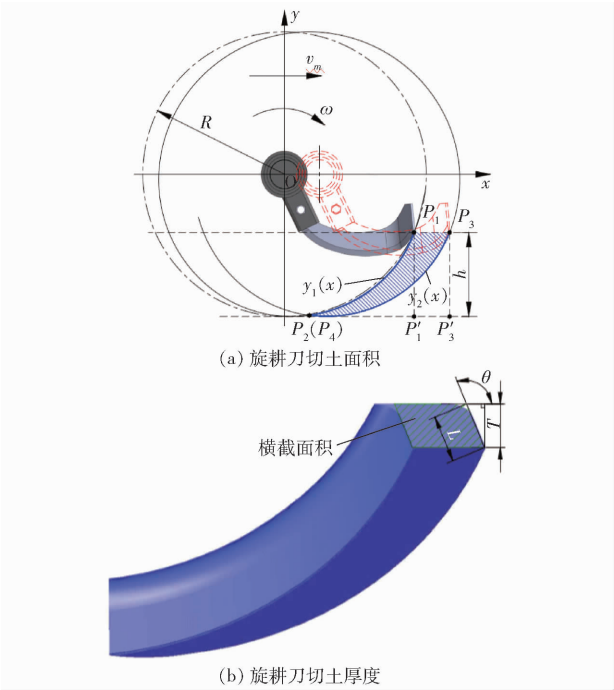


图 3 旋耕刀切土面积与厚度分析

Fig. 3 Analysis of soil cutting area and thickness of rotary tillage blade

2.2 旋耕刀轴向运土力学分析

旋耕刀作用土壤力学影响因素较多, 不仅与旋耕机具结构、参数有关, 而且与工况条件, 如土壤类型、含水率、土壤变形特性相关。为确定土壤轴向运动力学条件, 参考已有研究^[14], 假设土粒在旋耕刀上无相对位移; 土粒间无相互作用力。图 4a 所示为土粒在旋耕刀正切面即将脱离时的空间力学分析, 分别以土粒质心为原点 O_1 、刀轴中心线一点为原点 O_2 , 以刀轴中心线方向为 x_0 、机具前进方向为 y_0 , 垂直地表方向为 z_0 , 建立两坐标系。设土粒脱离旋耕刀正切面运动方向为 A_z , 此时, 土粒受到法向力 F_n 、摩擦力 f 、重力 G 以及离心力 F_c 综合作用。将上述力分解到 $x_0O_1z_0$ 坐标系, 如图 4b 所示, 求得土粒 x_0 方向合力 F_x 为

$$F_x = \frac{F_c \cos \alpha + G}{\cos \delta} \sin \delta - f \cos \delta \sin \beta \quad (8)$$

式中 α ——土粒脱离时刀轴转角, ($^\circ$)
 δ —— $y_0O_1x_0$ 面与旋耕刀正切刃夹角, ($^\circ$)
 β —— A_z 在 $y_0O_1x_0$ 面投影与 y_0 轴夹角, ($^\circ$)
将离心力 F_c 、重力 G 、摩擦力 f 表达式代入式(8)中可得

$$F_x = - (m \omega^2 R' \cos \alpha + mg) \cot \theta - \mu (m \omega^2 R' \cos \alpha + mg) \sin \beta \quad (9)$$

式中 m ——土粒质量, kg

R' ——土粒运动回转半径, mm
 μ ——土壤与旋耕刀面摩擦因数
 g ——重力加速度, m/s^2

式(9)中, 由正切刃弯折角 θ 求得 $y_0O_1x_0$ 面与旋耕刀正切刃夹角 δ ($\delta = \theta - \pi/2$); 土粒脱离时刀轴转角 α 取值范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$; 土壤与旋耕刀面摩擦因数 μ 可通过摩擦系数测定仪求得。为保证土粒能够沿着 x_0 正方向运动, 土壤轴向运动力学条件为 $F_x > 0$, 即 $\beta < \arcsin(-\cot \theta / \mu)$ 。研究表明^[19], 夹角 β 与旋耕刀正切刃形状、切土节距 s 、耕深 h 以及刀辊转速 n 有关, 结合 2.1 节分析, 仍选取刀辊转速 n 、旋耕切土节距 s 作为匀土刀辊土壤轴向运土力学因素。

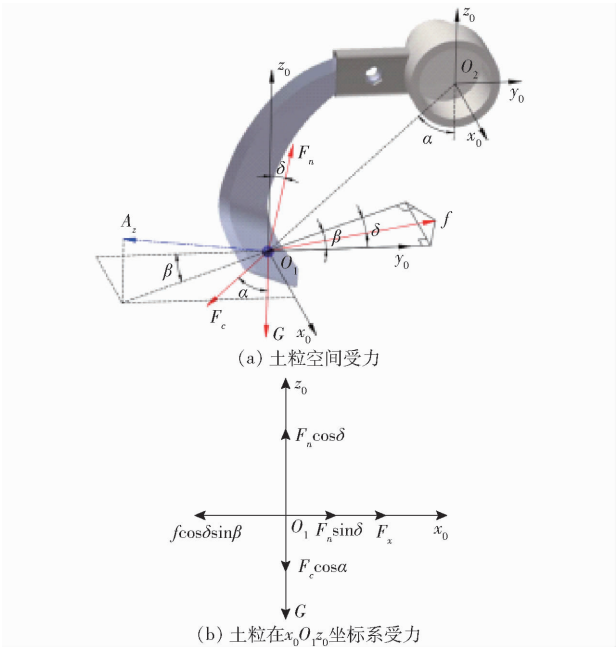


图 4 旋耕刀作用土粒力学分析

Fig. 4 Mechanical analysis of soil particles affected by rotary tillage blade

2.3 渐变螺旋升角旋耕刀排列螺旋线分析

旋耕刀常以螺旋线排列在刀轴上, 以旋耕刀辊作为参照系, 所有旋耕刀作业过程为螺旋运动。参考螺旋输送机与螺旋覆土器设计可知^[20-21], 螺旋升角增加, 导程增大, 运土空间、运土量以及运土速度增大。为此, 依据厢沟地表特点, 构造旋耕刀渐变螺旋升角排列螺旋线方程, 确定影响旋耕刀辊轴向匀土因素。图 5a 为渐变螺旋升角螺旋线运动形成原理, 刀轴圆柱面母线上点 M 沿着轴线 (X 轴) 作直线运动, 与刀轴圆柱面上圆周运动合成为螺旋运动, 若点 M 沿着轴线作等减速直线运动, 点 M 的运动轨迹为渐变螺旋升角螺旋线, 其展开图为抛物线^[22], 如图 5b 所示。此时, 渐变螺旋升角螺旋线参数方程为

$$\begin{cases} x = \int_0^{t_0} [2A (R_0 \omega_0)^2 t_0 + R_0 \omega_0 B] dt \\ y = R_0 \cos(\omega_0 t_0) \\ z = R_0 \sin(\omega_0 t_0) \end{cases} \quad (10)$$

式中 t_0 ——点 M 运动时间, s
 A ——二次项系数
 R_0 ——刀轴半径, mm
 ω_0 ——点 M 圆周运动角速度, rad/s
 B ——一次项系数

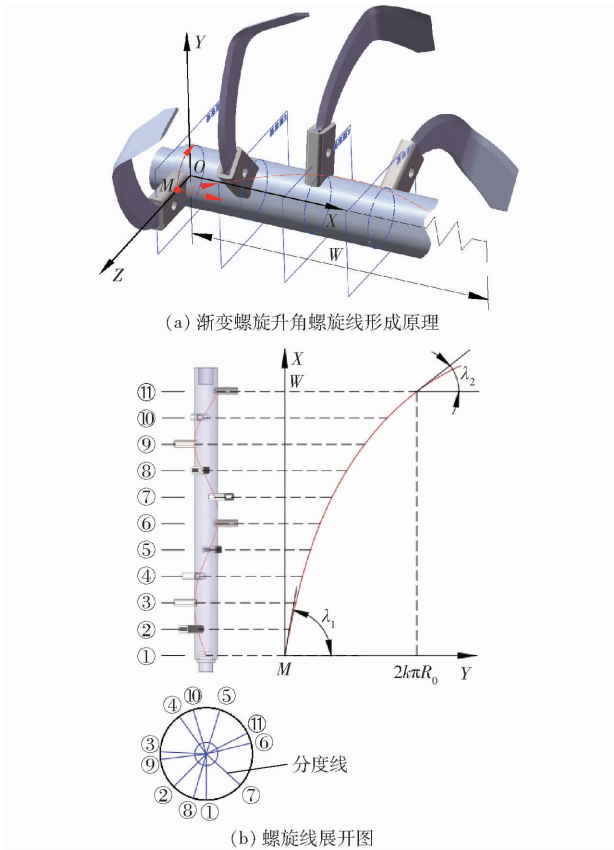


图 5 渐变螺旋升角旋耕刀排列螺旋线分析
Fig. 5 Spiral arrangement analysis of rotary tillage blades with gradual spiral angle

如图 5b 所示,渐变螺旋升角螺旋线在某点的切线与 Y 轴夹角(图 5a 中刀座基准面)为该点的螺旋升角 λ ,其正切值为抛物线函数在该点的一阶导数。由点 M 初始位置与终止位置,求出式(10)中系数 A 、 B 为

$$\begin{cases} A = \frac{\tan \lambda_2 - \tan \lambda_1}{4k\pi R_0} \\ B = \tan \lambda_1 \end{cases} \quad (11)$$

并得到 $k = \frac{W}{\pi R_0 (\tan \lambda_1 + \tan \lambda_2)}$

式中 λ_1 ——点 M 初始位置螺旋升角, ($^\circ$)
 λ_2 ——点 M 终止位置螺旋升角, ($^\circ$)
 k ——母线旋转圈数
 W ——点 M 初始与终止位置沿 X 轴距离, mm

综合式(10)、(11),求得匀土刀辊渐变螺旋升角螺旋线方程表达式为

$$\begin{cases} x = \frac{(\tan^2 \lambda_2 - \tan^2 \lambda_1) R_0^2}{4W} (\omega_0 t_0)^2 + R_0 \omega_0 t_0 \tan \lambda_1 \\ y = R_0 \cos(\omega_0 t_0) \\ z = R_0 \sin(\omega_0 t_0) \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中,匀土刀辊渐变螺旋升角螺旋线形状与 R_0 、 W 、 λ_1 、 λ_2 等参数相关。刀轴半径 R_0 取常用的 70 mm。 W 与相邻旋耕刀间距以及同一条螺旋线旋耕刀数量有关,结合式(5)中旋耕刀切土厚度 T ,并考虑土块易堵塞,相邻旋耕刀轴向间距取 80 mm,同一条螺旋线设置 11 把旋耕刀,则 W 为 800 mm。安装时,将初始与终止螺旋升角代入式(12)中得出匀土刀辊渐变螺旋升角螺旋线方程,然后以 80 mm 为间距计算出同一螺旋线 11 把旋耕刀对应螺旋升角以及刀轴外表面分度线(图 5b),并与图 5a 所示基准面交点作为刀座固接点,按照 1~11 编号依次进行排列,另一条螺旋线则按照同一切土小区两旋耕刀夹角 180° 对应排列。

旋耕刀螺旋升角过大易使旋耕机具产生振动,过小易堵塞土壤,因左、右对称刀辊两外侧对应厢沟土壤、地表高,为增大轴向运土量,提高地表平整度,机具两外侧螺旋升角较大,逐渐向中间减小,同一条螺旋线旋耕刀螺旋升角范围为 $54^\circ \sim 85^\circ$ ^[23],且左侧刀辊螺旋线左旋、右侧刀辊螺旋线右旋(图 1a)。综上,终止螺旋升角 λ_2 取 54° ,选择初始螺旋升角 λ_1 作为匀土刀辊轴向匀土性能关键因素,取值范围 $54^\circ \sim 85^\circ$ 。

3 离散元仿真

采用 EDEM 软件,构建匀土刀辊离散元仿真模型;通过正交试验,建立上述分析得到的匀土刀辊关键因素与作业后地表平整度间的回归方程,分析各因素交互作用对地表平整度的影响,最终得到最优因素组合,为后续刀辊试制试验奠定基础。

3.1 仿真模型建立

采用干筛法测量试验区土壤质地为中黏土(黏粒质量分数 42.46%),使用 TMS-PRO 型质构仪与 ZJ-4L 型应变控制式直剪仪,测定土壤表现为塑性形变与黏聚力均为非线性。因此确定土壤颗粒间模型采用非线性黏结弹性塑性接触模型(Edinburgh elasto-plastic adhesion,EEPA);土壤与部件为 Hertz-Mindlin no Slip 模型^[24]。结合前期标定与相关研究^[25-26],设置土壤颗粒半径为 4 mm;土壤本征参数:泊松比 0.4、密度 $1\,650\text{ kg/m}^3$ 、剪切模量 $2.8 \times$

10^7 Pa;机具本征参数:泊松比 0.3、密度 $7\,800\text{ kg/m}^3$ 、剪切模量 $7\times 10^7\text{ Pa}$;接触参数:颗粒间的恢复系数 0.2、静摩擦因数 0.67、滚动摩擦因数 0.03,土壤与机具间的恢复系数 0.2,静摩擦因数 0.75、滚动摩擦因数 0.1。受到仿真运行时间和存储空间的限制,又因整机以中心面左、右对称,对称两刀辊并无相互影响,仿真只运行整机一侧,建立尺寸为 $3\,000\text{ mm}\times 1\,500\text{ mm}\times 500\text{ mm}$ 虚拟土槽。

依据长江中下游农业区小麦种植农艺^[17],厢沟深度大于 30 cm、沟宽 25 cm 左右,考虑到土壤旋耕后地表线抬高因素^[27],设置厢沟犁作业深度为 25 cm、宽度为 15 cm。为直观反映地表情况,仿真时将挡土板抬高至耕前地表线上方 10 cm 处,结合所需的匀土刀辊参数,运用 SolidWorks 软件同比例创建整机仿真模型导入 EDEM 软件中。为保证机器仿真过程中土壤颗粒连续运动,设定固定时间步长为 $2\times 10^{-5}\text{ s}$,Rayleigh 时间步长的 5%,网格单元尺寸为最小颗粒半径的 3 倍,总仿真时间为 5 s。

3.2 试验设计与测量方法

基于 2.1~2.3 节分析,选取刀辊转速 n 、旋耕切土节距 s 、初始螺旋升角 λ_1 为试验因素,根据中心组合试验(CCD)设计原理,设置因素参数进行离散元仿真。其中耕深 h 设置 14 cm,机具前进速度 v_m 可由每组试验对应的刀辊转速 n 与旋耕切土节距 s 求得($v_m = ns/3\,000$)。试验因素编码如表 1 所示。

表 1 试验因素编码

Tab.1 Experimental factors and codes

编码	因素		
	刀辊转速 n / ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	旋耕切土节距 s/cm	初始螺旋升角 $\lambda_1/(^\circ)$
-1.682	150	6.0	54.0
-1	191	6.8	60.3
0	250	8.0	69.5
1	309	9.2	78.7
1.682	350	10.0	85.0

使用耕后地表平整度作为匀土刀辊匀土性能指标。测定方法为:利用 EDEM 软件截断模块(Clipping),在匀土刀辊正后方随机选取一个厚度 100 mm 切片,如图 6 所示。提取该切片地表土壤颗粒稳定后的坐标值,将坐标值导入 CAD 软件中采用样条曲线连接,绘制出旋耕作业后地表线。过最高点作一条水平直线作为基准线,在旋耕作业宽度 800 mm 范围内以 50 mm 等分标记测点。测定各测点水平基准线至地表线垂直距离,记为 a_i 。计算各测点垂直距离平均值 a_m 以及标准差 U 为

$$\begin{cases} a_m = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} \\ U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - a_m)^2}{n-1}} \end{cases} \quad (13)$$

式中 n ——每次测定测点数
每组试验测定 3 次,以标准差平均值 U_m 表示地表平整度。

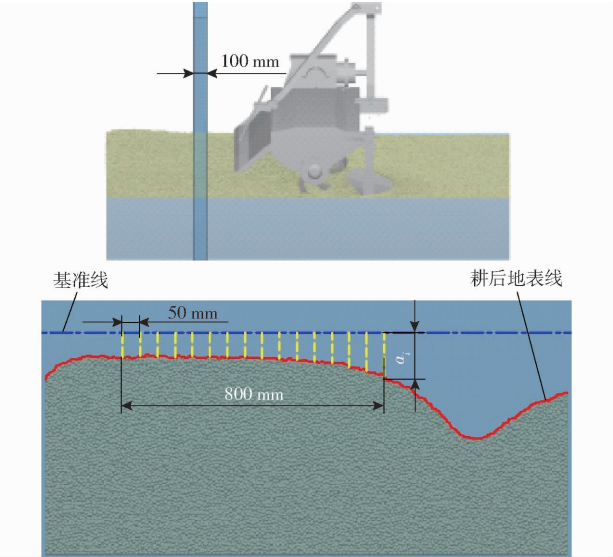


图 6 随机选取切片数据采集方法示意图

Fig.6 Data collection of random selected slice

3.3 仿真结果与分析

3.3.1 仿真结果

通过 EDEM 软件运行试验方案,共进行 20 组,测定结果如表 2 所示,表中 X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。利用 Design-Expert 8.0.6 分析软件对试验结果进行处理,分析刀辊转速 n 、旋耕切土节距 s 、初始螺旋升角 λ_1 对地表平整度 U_m 影响显著性,拟合回归方程获得测定指标的响应模型。

对表 2 试验结果进行显著性和方差分析,选用二次多项式回归方程,并选择逐步回归方法,得到回归模型显著性检验结果如表 3 所示。地表平整度响应面回归模型达到极显著水平($P<0.000\,1$);模型的校正决定系数为 0.990 3,失拟项 P 值为 0.884 3,大于 0.01,模型拟合良好。对各项进行分析, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_2X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 与 X_3^2 对地表平整度影响极显著, X_1X_2 影响显著。剔除不显著项 X_1X_3 得出地表平整度 U_m 回归方程为

$$U_m = 17.11 - 2.46X_1 - 1.88X_2 - 0.91X_3 + 0.62X_1X_2 + 1.12X_2X_3 + 7.29X_1^2 + 3.36X_2^2 + 2.33X_3^2 \quad (14)$$

3.3.2 各因素交互作用对地表平整度影响分析

由地表平整度回归模型显著性分析可知,刀辊

表 2 试验方案与结果
Tab.2 Protocols and results

试验编号	因素			地表平整度 U_m/mm
	X_1	X_2	X_3	
1	-1	-1	-1	37.12
2	1	-1	-1	31.14
3	-1	1	-1	29.99
4	1	1	-1	25.86
5	-1	-1	1	33.45
6	1	-1	1	27.31
7	-1	1	1	30.17
8	1	1	1	27.15
9	-1.682	0	0	41.70
10	1.682	0	0	33.19
11	0	-1.682	0	29.28
12	0	1.682	0	23.40
13	0	0	-1.682	25.31
14	0	0	1.682	21.52
15	0	0	0	16.47
16	0	0	0	15.81
17	0	0	0	17.66
18	0	0	0	16.96
19	0	0	0	17.46
20	0	0	0	18.39

表 3 地表平整度回归模型显著性分析
Tab.3 Significant analysis of regression model
of soil layer levelness

方差来源	平方和	自由度	均方和	F	P
模型	1 049.02	8	131.13	243.13	<0.000 1 **
X_1	82.58	1	82.58	153.11	<0.000 1 **
X_2	48.51	1	48.51	89.94	<0.000 1 **
X_3	11.27	1	11.27	20.89	0.000 8 **
$X_1 X_2$	3.09	1	3.09	5.72	0.035 7 *
$X_1 X_3$	0.11	1	0.11	0.19	0.669 1
$X_2 X_3$	10.06	1	10.06	18.65	0.001 2 **
X_1^2	765.05	1	765.05	1 418.52	<0.000 1 **
X_2^2	162.68	1	161.68	301.64	<0.000 1 **
X_3^2	77.95	1	77.95	144.53	<0.000 1 **
残差	5.93	11	0.54		
失拟项	1.75	6	0.29	0.35	0.884 3
纯误差	4.18	5	0.84		
总和	1 054.95	19			

注：* 表示影响显著 ($P < 0.05$)，** 表示影响极显著 ($P < 0.01$)。

转速 n 与旋耕切土节距 s 、旋耕切土节距 s 与初始螺旋升角 λ_1 对地表平整度有交互影响,绘制交互作用响应曲面如图 7 所示。

由图 7a 可知,在匀土刀辊初始螺旋升角处于中心水平,当旋耕切土截距一定时,地表平整度随着刀辊转速增加呈先降后升趋势;当刀辊转速一定时,地表平整度亦随旋耕切土截距增加呈先减后增趋势。

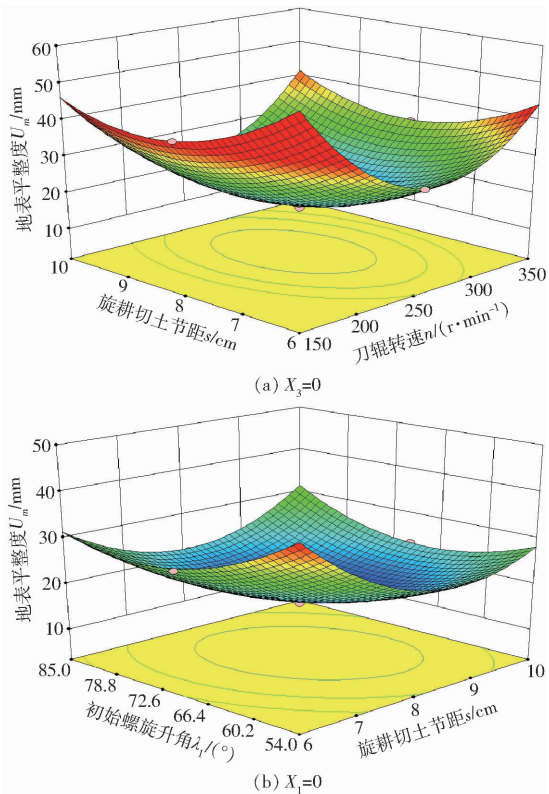


图 7 因素交互作用对地表平整度影响的响应曲面
Fig.7 Response surface of influence on soil layer levelness under factor interaction

刀辊转速较低时(图 8a),土壤颗粒在旋耕刀作用下轴向速度较低,轴向运动位移小,致使覆盖在厢面的厢沟土壤并未及时运移,机具外侧土壤多,降低了地表平整性;刀辊转速过高时(图 8b),轴向速度大、扰土量多、轴向运动位移大,机具中部变速箱两侧位置堆积土壤过多,同样降低了地表平整性。旋耕切土节距小时(图 8c),旋耕刀周期内扰土体积小,导致总体轴向输土量低,地表平整性较低;旋耕切土节距大时(图 8d),旋耕刀周期内扰土体积过大,相应的土壤轴向移动量过多,机具中部位置堆积土壤过剩,地表平整性同样较低。

由图 7b 可知,在刀辊转速处于中心水平下,地表平整度均随着旋耕切土节距、初始螺旋升角增加,呈现先减后增趋势。旋耕切土节距一定时,初始螺旋升角越高,刀辊外侧导程越长,单位时间内螺旋输送土壤量大。当初始螺旋升角从 71° 增加到 85° 时,不仅覆盖在厢面的厢沟土壤全部输送,而且运送了一部分厢沟土壤下部未耕土壤,地表平整性略有降低。

3.3.3 匀土刀辊最优参数组合

为得到匀土刀辊最优参数组合,采用非线性规划理论,对目标函数式(14)优化求解。设置约束条件为:刀辊转速 $150 \sim 350 \text{ r/min}$ 、旋耕切土节距 $6 \sim 10 \text{ cm}$ 、初始螺旋升角 $54^\circ \sim 85^\circ$ 。求得刀辊转速

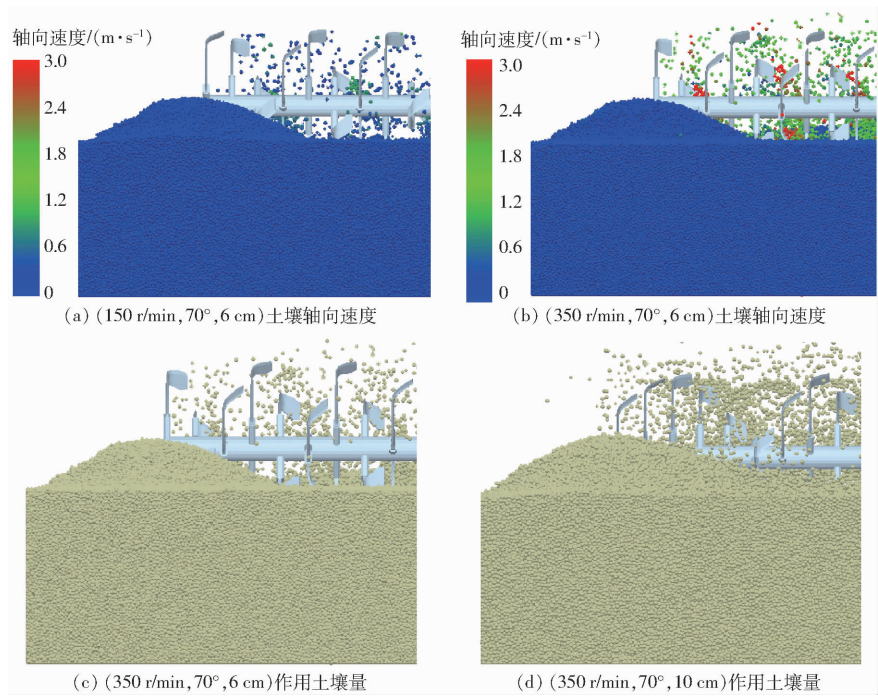


图 8 因素交互作用下仿真分析

Fig. 8 Analysis of factor interaction

259.4 r/min、旋耕切土节距 8.29 cm、初始螺旋升角 70.76°时,地表平整度最优,为 16.62 mm。为验证优化结果的准确性,重新进行仿真。考虑到刀辊转速取 259 r/min 机具变速箱传动比不易设置,因此刀辊转速取 260 r/min,旋耕切土节距 8.3 cm,初始螺旋升角 71°,测定 3 次求平均值,得到最优地表平整度为 17.35 mm,仿真验证与理论结果基本一致,说明回归方程准确。

4 田间试验

4.1 试验条件

为验证匀土刀辊实际作业性能,于 2020 年 12 月 10 日在华中农业大学校内试验田进行田间试验,试验现场如图 9 所示。试验设备主要包括常发 DFF1204 型拖拉机、开沟旋耕联合作业样机机架、匀土刀辊(初始螺旋升角 71°,终止螺旋升角 54°)、常用旋耕刀辊(左、右刀辊共安装 44 把 IIT245 型旋耕刀,同一切土小区两把旋耕刀朝向相反,夹角 135°,旋耕刀螺旋升角均为 54°)、田间作业机具综合性能测试车、环刀(内径 61.8 mm×高 20 mm)、卷尺、钢尺、电子秤、密封袋等。测试区前茬作物为水稻,秸秆离田处理。土壤为中黏土,深度 0~25 cm 土壤容重均值 1.38 g/cm³、含水率均值 20.27%、紧实度均值 1 657.2 kPa。耕作前地表平整度均值 7.17 mm、耕前深度 0~15 cm 土壤均匀度均值 19.92%。

4.2 试验方法

选择地势平坦地块作为测试区,划分 6 个长度



图 9 试验现场

Fig. 9 Test of field

1. 样机 2. 测试车 3. 拖拉机 4. 匀土刀辊

80 m、宽度 3 m 的试验小区,中间 60 m 作为测量区域,两刀辊各进行 3 个行程。依据优化后旋耕切土节距 8.3 cm,计算得出作业速度为 2.59 km/h,通过测试车上位机与拖拉机挡位控制作业速度,使机组作业速度在(2.59±0.2) km/h 范围内;拖拉机后输出 760 r/min,调节测试车多级变速器模块(5 挡位),使刀轴转速稳定在 260 r/min;设定下拉杆长度使旋耕刀作业深度为 14 cm;调界限位螺栓使厢沟犁作业深度为 25 cm。

地表平整度按照 3.2 节仿真测定方法;因挡土板对耕后地表起压实作用,不能真实反映两刀辊地表平整度状况,需测定土壤轴向分布均匀度;耕深稳定性系数、碎土率指标参考 GB/T 5668—2017《旋耕机》。

4.2.1 土壤轴向分布均匀度

在已耕厢面以 15 cm 间隔等分,使用环刀测定土壤湿容重,测量深度 0~5 cm、5~10 cm、10~

15 cm,每个行程测定 3 次,求得 3 个行程均匀度平均值 a_u 、均匀度标准差 S_u 、均匀度变异系数 V_u ,并将 V_u 作为衡量旋耕刀辊作业后耕层土壤轴向分布均匀度^[28]。

4.2.2 耕深稳定性系数

在作业后的测量区域内,沿机组前进方向,使用钢尺插入土壤测定旋耕深度,前进方向每隔 2 m 左、右各测定 5 个点,共测量 40 m,求得 3 个行程耕深平均值 h_s 、耕深标准差 S_s 、耕深变异系数 V_s ,计算耕深稳定性系数 U_s 。

4.2.3 碎土率

在作业后的测量区域内随机测定 0.5 m × 0.5 m 面积内的全耕层土块,土块最长边大于等于 4 cm 的土块质量 G_b 及土块总质量 G_t ,计算碎土率

$$C_r = \left(1 - \frac{G_b}{G_t}\right) \times 100\% \tag{15}$$

每个行程测定 2 次,求均值。

4.3 试验结果与分析

两刀辊田间作业后地表平整度、土壤轴向分布均匀度、耕深稳定性系数、碎土率测定结果如表 4 所示。

表 4 试验测定结果

Tab.4 Test measurement results

测试指标	匀土刀辊	常用旋耕刀辊
地表平整度/mm	14.5 ± 3.3	32.5 ± 6.7
土壤轴向分布均匀度/%	8.82 ± 1.93	17.6 ± 3.08
耕深稳定性系数/%	92.34 ± 3.61	85.53 ± 7.35
碎土率/%	81.66 ± 7.71	82.58 ± 9.23

匀土刀辊田间试验与仿真结果对比可知,仿真地表平整度略大于田间试验结果,两者相差 2.85 mm,分析原因为:田间试验中机具挡土板在强力压缩弹簧和自身重力的作用下,对旋耕作业后的表层细碎土壤起到压实和抹平效果;仿真中挡土板不能实现浮动作用,为此抬高了 10 cm。以上原因造成了平整度的误差,仿真基本能反映机具作业后的地表平整度。

两旋耕刀辊田间试验结果表明,匀土刀辊作业后地表平整度、土壤轴向分布均匀度、耕深稳定性系数均值为 14.5 mm、8.82%、92.34%,优于常用旋耕刀辊,且标准差低于常用旋耕刀辊;匀土刀辊碎土率为 81.66%,与常用旋耕刀辊相差不大,并不影响碎土率。经分析两刀辊作业过程可知,当厢沟土壤以垡状覆盖在厢面上时,常用旋耕刀辊旋耕刀采用等螺旋升角排列,作业过程厢沟土壤未及时向内侧输送,造成刀辊被两侧土壤抬高,作业后厢面呈现两侧高中间低(图 10a),地表平整度、土壤轴向分布均匀

度、耕深稳定性较差;当厢沟土壤以碎土状覆盖在厢面上时,常用旋耕刀辊作业后,对应的指标较好,但同一切土小区两把旋耕刀朝向相反,旋耕刀抛土后掩埋了厢沟(图 10a),以上过程使常用旋耕刀辊测定结果浮动较大。匀土刀辊提高了两侧土壤向内的输土量,使机具性能指标、稳定性以及厢沟犁成沟质量较好(图 10b)。

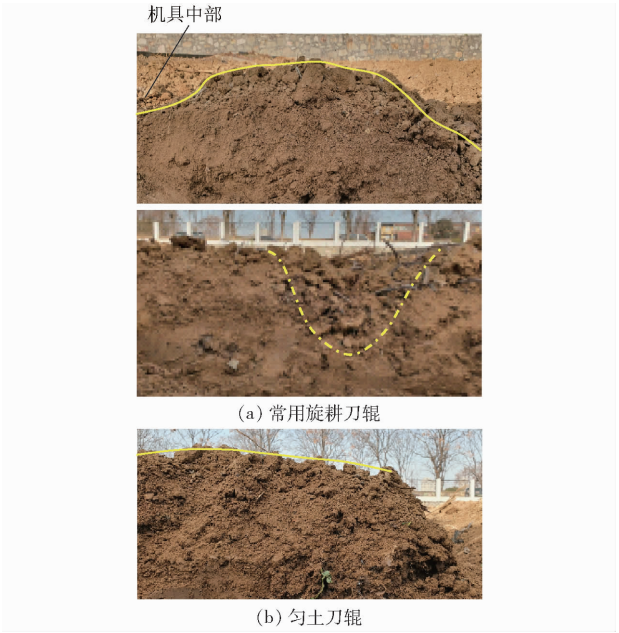


图 10 两旋耕刀辊作业后耕层剖面

Fig.10 Profile of plough layer after operation of two rotary tillage blade rollers

5 结论

(1)设计了一种渐变螺旋升角轴向匀土刀辊,增大了开沟旋耕联合作业机厢体两侧堆积土壤的向内输送量,提高了地表平整度与土壤轴向分布均匀度,降低了厢体中部的积水渍害,利于后续小麦生长。

(2)对匀土刀辊旋耕刀扰土量、轴向运土力学条件以及渐变螺旋升角排列螺旋线进行理论分析,确定影响匀土刀辊轴向匀土性能的关键因素为刀辊转速、旋耕切土节距与初始螺旋升角。

(3)运用离散元仿真,结合中心组合正交试验得出:刀辊转速 260 r/min、旋耕切土节距 8.3 cm、初始螺旋升角 71°为最优参数组合,此时,仿真地表平整度为 17.35 mm。

(4)田间试验表明,匀土刀辊作业后,地表平整度、土壤轴向分布均匀度、耕深稳定性系数的均值分别为 14.5 mm、8.82%、92.34%,优于常用旋耕刀辊,且厢沟犁成沟质量更好;匀土刀辊碎土率为 81.66%,与常用旋耕刀辊碎土率相近,其整体效果更利于长江中下游农业区的小麦种床整备。

参 考 文 献

- [1] 魏国梁,张青松,刘立超,等. 犁旋组合式油菜直播机扣袋装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(6): 38-46.
WEI Guoliang, ZHANG Qingsong, LIU Lichao, et al. Design and experiment of plowing and rotary buckle device for rapeseed direct seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 38-46. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200604&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.004. (in Chinese)
- [2] 吴崇友. 稻油(麦)轮作机械化技术[M]. 北京: 中国农业出版社,2013.
- [3] 廖庆喜,卜祥利,孙文成,等. 构建油菜种床合理耕层的驱动型犁旋联合耕整机研究[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(11): 74-84.
LIAO Qingxi, BU Xiangli, SUN Wencheng, et al. Development of driven plow rotary combined tillage machine for construction of rational tillage in rape seedbeds[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 74-84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20201108&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.11.008. (in Chinese)
- [4] 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/OL]. 农业机械学报,2020,51(12): 35-45.
YANG Qinglu, CHEN Guibin, XIE Lijuan, et al. Design and experiment of telescopic finger stalk of maize straw burying machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 35-45. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20201204&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.12.004. (in Chinese)
- [5] 张春岭,夏俊芳,张居敏,等. 六头螺旋秸秆还田耕整机刀辊设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(3): 25-34.
ZHANG Chunling, XIA Junfang, ZHANG Jumin, et al. Design and experiment of knife roller for six-head spiral straw returning cultivator[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 25-34. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190303&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.003. (in Chinese)
- [6] LEE K S, PARK S H, PARK W Y, et al. Strip tillage characteristics of rotary tiller blades for use in a dryland direct rice seeder[J]. Soil and Tillage Research, 2003, 71(1): 25-32.
- [7] 祝英豪,张居敏,曾荣,等. 人字型水旱两用旋犁刀辊设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(4): 49-57.
ZHU Yinghao, ZHANG Jumin, ZENG Rong, et al. Design and experiment of herringbone type rotary blade roller for burying stubble in paddy field and dry land[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 49-57. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190406&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.006. (in Chinese)
- [8] ZHENG Kan, CMHUGH A D, LI Hongwen, et al. Design and experiment of anti-vibrating and anti-wrapping rotary components for subsoiler cum rotary tiller[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(4): 47-55.
- [9] FANG Huimin, ZHANG Qingyi, FARMAN A C, et al. Effect of straw length and rotavator kinematic parameter on soil and straw movement by a rotary blade[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2016, 9(3): 235-241.
- [10] 方会敏,姬长英,FARMAN Ali Chandio,等. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(3): 22-28.
FANG Huimin, JI Changying, FARMAN Ali Chandio, et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on distinct element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 22-28. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160304&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.004. (in Chinese)
- [11] MATIN M A, DESBIOLLES J M A, FIELKE J M, et al. Strip-tillage using rotating straight blades: effect of cutting edge geometry on furrow parameters[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 155(3): 271-279.
- [12] MATIN M A, FIELKE J M, DESBIOLLES J M A, et al. Furrow parameters in rotary strip-tillage: effect of blade geometry and rotary speed[J]. Biosystems Engineering, 2014, 118: 7-15.
- [13] ZHAO Hongbo, LI Hongwen, MA Shaochun, et al. The effect of various edge-curve types of plain-straight blades for strip tillage seeding on torque and soil disturbance using DEM[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 202: 1-11.
- [14] 王金峰,陈博闻,姜岩,等. 水稻秸秆全量深埋还田机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(1): 84-93.
WANG Jinfeng, CHEN Bowen, JIANG Yan, et al. Design and experiment on machine for rice straw full quantity deep buried into field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 84-93. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200109&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.009. (in Chinese)
- [15] 贾洪雷,陈忠亮,郭红,等. 旋耕碎茬工作机理研究和通用刀辊的设计[J]. 农业机械学报,2000,31(4): 29-32.
JIA Honglei, CHEN Zhongliang, GUO Hong, et al. Study on working principle of rotary tillage and stubble cutting and design of universal knife roller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(4): 29-32. (in Chinese)
- [16] 肖文芳,舒彩霞,廖庆喜,等. 犁旋组合式稻茬全量还田油菜直播种床整理机设计与试验[J]. 华中农业大学学报,2019,38(6): 139-146.
XIAO Wenfang, SHU Caixia, LIAO Qingxi, et al. Design and test of tillage machine combined with plough and rotary for managing seedbed before planting rapeseed by burying of rice straw incorporated into soil[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(6): 139-146. (in Chinese)
- [17] 程顺和,郭文善,王龙俊. 中国南方小麦[M]. 南京: 江苏科学技术出版社,2012.

[18] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册：上册[M]. 北京：中国农业科学技术出版社,2007.

[19] 陈钧,近江谷和彦,寺尾日出男. 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 Jun, OHMIYA Kazuhiko, TERA0 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)

[20] 米仕鹏. 变螺距螺旋输送机的土塞承压研究[J]. 现代隧道技术,2020,57(4)：119－126.
MI Shipeng. Research on soil plug pressure-bearing characteristics of screw conveyor with variable pitch[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(4)：119－126. (in Chinese)

[21] 杨文武,罗锡文,王在满,等. 轮式拖拉机水田轮辘覆土装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(16)：26－31.
YANG Wenwu, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of track filling assembly mounted on wheeled-tractor for paddy fields[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16)：26－31. (in Chinese)

[22] 高文英,林静,李宝筏,等. 玉米秸秆深埋还田机螺旋开沟装置参数优化与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(9)：45－54.
GAO Wenying, LIN Jing, LI Baofa, et al. Parameter optimization and experiment for spiral type opener device of maize straw deep bury and returning machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9)：45－54. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180905&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.005. (in Chinese)

[23] 秦宽,丁为民,方志超,等. 复式耕整机耕深与耕宽稳定性分析与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(9)：1－8.
QIN Kuan, DING Weimin, FANG Zhichao, et al. Analysis and experiment of tillage depth and width stability for plowing and rotary tillage combined machine[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(9)：1－8. (in Chinese)

[24] THAKUR S C, MORRISSEY J P, SUN J, et al. Micromechanical analysis of cohesive granular materials using the discrete element method with an adhesive elasto-plastic contact model[J]. Granular Matter, 2014, 16(3)：383－400.

[25] 祝英豪,夏俊芳,曾荣,等. 基于离散元的稻板田旋耕功耗预测模型研究[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(10)：42－50.
ZHU Yinghao, XIA Junfang, ZENG Rong, et al. Prediction model of rotary tillage power consumption in paddy stubble field based on discrete element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10)：42－50. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20201006&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.006. (in Chinese)

[26] SUN Jianfeng, CHEN Huaming, WANG Zaiman, et al. Study on plowing performance of EDEM low-resistance animal bionic device based on red soil[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 196：1－15.

[27] 胡红,李洪文,李传友,等. 稻茬田小麦宽幅精量少耕播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(4)：24－32.
HU Hong, LI Hongwen, LI Chuanyou, et al. Design and experiment of broad width and precision minimal tillage wheat planter in rice stubble field[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(4)：24－32. (in Chinese)

[28] 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)

~~~~~

(上接第 201 页)

[23] 何东健,刘建敏,熊虹婷,等. 基于改进 YOLO v3 模型的挤奶奶牛个体识别方法[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(4)：250－260.  
HE Dongjian, LIU Jianmin, XIONG Hongting, et al. Individual identification of dairy cows based on improved YOLO v3 [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4)：250－260. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20200429&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200429&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.029. (in Chinese)

[24] BARBER C B, DOBKIN D P, HUHDANPAA H. The quickhull algorithm for convex hulls[J]. ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS), 1996, 22(4)：469－483.

[25] DENG L, YU D. Deep learning: methods and applications[J]. Foundations & Trends in Signal Processing, 2014, 7(3)：197－387.

[26] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning[J]. Nature, 2015, 521(7553)：436－444.

[27] SZEGEDY C, WEI L, JIA Y, et al. Going deeper with convolutions[C]//2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2015：1－9.

[28] 张敏,赵雪青. 基于 EfficientNets 的织物疵点图像分类方法[J]. 纺织高校基础科学学报, 2020, 33(4)：64－70.  
ZHANG Min, ZHAO Xueqing. EfficientNets-based method for fabric defect image classification[J]. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2020, 33(4)：64－70. (in Chinese)

[29] IMIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2016(95)：51－67.

[30] SHELLY A N. Incorporating machine vision in precision dairy farming technologies[D]. Lexington: University of Kentucky, 2016.

[31] SUN Y, HUO P, WANG Y, et al. Automatic monitoring system for individual dairy cows based on a deep learning framework that provides identification via body parts and estimation of body condition score[J]. Journal of Dairy Science, 2019, 102(11)：10140－10151.

[32] 刘燕. 全自动体况评分与人工评分的对比研究[J]. 中国乳业, 2020(8)：55－60.  
LIU Yan. A comparative study of automatic body condition scoring and manual scoring[J]. China Dairy, 2020(8)：55－60. (in Chinese)