doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.016

油菜高速带状微垄联合直播机浅耕犁组阻力模型构建与通过性能分析

杜文斌[1]　廖庆喜[1,2]　廖宜涛[1,2]　张青松[1,2]　林建新[1]　李　林[1]　王培宇[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:针对油菜带状微垄联合直播机高速作业时易产生犁间土壤堵塞、阻力骤增、通过性变差等问题,分析了关键部件浅耕犁组对土壤的破坏形式和阻力来源,构建了阻力模型并引入反映土壤流动状态和堵塞风险的通过性系数,通过不同作业速度下的浅耕犁单体田间试验,分析了土壤动态响应指标,确定了阻力模型修正系数并为犁组配合尺寸提供依据;开展犁组田间试验,分析了作业速度和安装间距对通过性系数和起垄断条率的影响,通过中心复合试验确定了通过性系数与速度及安装间距间的关系,当通过性系数小于等于 0.55 时,起垄断条率小于等于 5%,在保证机具通过性的前提下油菜高速带状微垄联合直播机浅耕犁组适宜安装间距为 1 000 mm。开展了作业速度 10、12 km/h 的整机田间试验并采用三维激光扫描技术对作业后垄形分析处理,结果表明:在阻力模型和通过性系数指导条件下,垄形稳定,作业后微垄种床无断条情况,垄高平均值分别为 138.2 mm 和 141.4 mm,垄距平均值分别为 423.6 mm 和 426.5 mm,垄高及垄距变异系数均不大于 4.96%,表明浅耕犁组通过性能和成垄性能好,出苗效果良好,说明微垄种床满足油菜种植农艺要求。研究结果可为机具动力匹配和犁组配置优化提供参考。

关键词:油菜;联合直播机;高速;微垄;浅耕犁组;阻力模型

中图分类号:S222.19　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)09-0188-11　　**OSID**:

Construction of Resistance Model and Analysis of Passability for Shallow Plow Group of High-speed Strip Micro-ridge Combined Direct Seeding Machines for Rapeseed

DU Wenbin[1]　LIAO Qingxi[1,2]　LIAO Yitao[1,2]　ZHANG Qingsong[1,2]　LIN Jianxin[1]　LI Lin[1]　WANG Peiyu[1]

(1. *College of Engineering*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: In response to issues such as soil blockage between plows, sudden increases in resistance, and poor maneuverability during high-speed operation of the rapeseed strip micro-ridge combined direct seeding machine, poor passability, and other issues, the soil disturbance patterns and resistance sources of the shallow plow group were analyzed, a resistance model was constructed, and a passability coefficient reflecting soil flow state and blockage risk was introduced. Through field trials of single shallow plow units at different operating speeds, the soil dynamic response indicators were analyzed, the resistance model correction coefficients were determined, and a basis for plow group coordination dimensions was provided. Field trials of the plow groups were conducted to analyze the effects of operating speed and installation spacing on the passability coefficient and ridge formation rate. Through central composite experiments, the relationship between the passability coefficient and speed and installation spacing was determined. It was clarified that when the passability coefficient was less than or equal to 0.55, the ridge formation rate was less than or equal to 5%. Under the premise of ensuring machine passability, the appropriate installation spacing for the shallow plow group of the rapeseed high-speed strip micro-ridge combined direct seeding machine was 1 000 mm. Field experiments were conducted at 10 km/h and

收稿日期:2025-05-06　修回日期:2025-06-18

基金项目:财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CASR-12-27)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2662025GXPY009)

作者简介:杜文斌(1996—),男,博士生,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail:duwenbin@webmail.hzau.edu.cn

通信作者:廖庆喜(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事油菜全程机械化生产技术及配套装备研究,E-mail:liaoqx@mail.hzau.edu.cn

12 km/h, and three-dimensional laser scanning technology was used to analyze and process the ridge shape after operation. The results showed that under the guidance of the resistance model and passability coefficient, the machine had good passability, and there were no broken strips on the micro-ridge seedbed after operation. The ridge shape was stable, with average ridge heights of 138.2 mm and 141.4 mm, with average ridge widths of 423.6 mm and 426.5 mm, respectively. The coefficient of variation for both ridge height and width was no greater than 4.96%, indicating that the shallow plow group had good passability and ridge-forming performance. The satisfactory seedling emergence results demonstrated that the micro-ridge seedbed met the agronomic requirements for rapeseed cultivation. The research findings can provide references for optimizing machinery power matching and plow group configuration to enhance operational efficiency.

Key words: rapeseed; combined direct seeding machine; high speed; micro-ridge; shallow plow group; resistance model

0　引言

油菜是中国重要的油料作物[1-2]，冬油菜因抗逆性强、适应范围广而被广泛种植且种植面积多年来持续扩大[3]。近年来生产中发现，随着全球气候变暖加剧，局部地区降雨时空分布不均匀，极端降雨或干旱事件发生频繁[4-7]，而油菜根系忌水，持续降雨易引发渍害导致减产，持续干旱导致种子萌发缺少水分而无法发芽，因此提升油菜种植效率和应对极端气候成为油菜增产稳产亟需解决的问题。

油菜微垄种植[8-9]利用垄沟的保墒能力保证在持续干旱条件下垄沟种子萌发，利用垂直空间优势保证在持续降雨条件下垄沟排涝，垄顶种子萌发，以提高极端条件下油菜出苗、成苗率，实现旱涝保收，稳产增产。针对该农艺方案，文献[10]研制了一种油菜带状微垄联合直播机，可实现高速作业下浅耕抛土成垄、微垄种床整形，同步施肥播种一体化作业。通过前期田间试验分析可得，机具高速作业下犁组易产生土壤堵塞、阻力骤增、通过性变差等问题，因此分析浅耕犁组的通过性能，明析浅耕犁对土壤的破坏形式，建立浅耕犁组阻力模型并探求不同作业速度下的较优安装间距可匹配拖拉机动力，优化犁组配置。针对犁体阻力探究，文献[11-13]开展了土垡在犁上的动力学和犁体受力分析，张青松等[14-15]通过台架和离散元仿真试验分析了犁体比阻，MARI 等[16]通过犁体表面安装传感器分析了犁的力空间分布，AZIMI-NEJADIAN 等[17]采用有限元方法分析了犁的受力模型构建，国内外相关学者采用不同方法和技术开展了犁的受力分析，但分析的犁体均为铧式犁和类铧式犁单体，且没有考虑犁间相互作用对犁组阻力的影响，而浅耕犁属于中柄式耕作犁，其设计方法、作业目的、对土壤的扰动与铧式犁具有本质区别，因此相关受力模型不适用于本研究。文献[18-21]开展了类似于中柄式耕作犁的深松犁阻力研究，分析了深松犁结构参数和作业参数对阻力的影响，但深松犁作业速度较慢且与土壤接触面积较小，作业目的为减少土壤扰动，与本研究中浅耕犁增大土壤扰动实现定向抛土存在较大区别，因此其相关力学模型构建不适用于本研究。综上所述，分析犁组通过性能并构建浅耕犁组阻力模型可为机具动力及犁组参数匹配提供理论依据，并为中柄式耕作犁优化设计提供参考。

为此，本文构建油菜高速带状微垄联合直播机关键部件浅耕犁组阻力模型并引入可反映土壤流动状态和堵塞风险的通过性系数；通过浅耕犁组田间试验，分析作业速度和安装间距对通过性系数及起垄断条率的影响，确定通过性系数与作业速度及安装间距间的关系，以确定在保证犁组通过性前提下不同作业速度的较优安装间距，避免土壤壅堵和阻力骤增，提高微垄种床稳定性。

1　整机与浅耕犁组结构

1.1　整机结构与工作过程

油菜高速带状微垄联合直播机主要由浅耕犁组、开畦沟犁组、挤压整形板、碎土压土辊、排肥装置、排种装置组成，其中开畦沟犁组对称布置在机架两侧，由圆盘前犁和类铧式后犁组成，如图 1 所示，主要技术参数如表 1 所示。整机作业时由拖拉机牵引提供动力，采用被动作业形式。先由开畦沟犁组与浅耕犁组配合作业，实现高速作业下土壤定向抛送，初步形成垄坯和垄沟；排肥装置同步将肥料均匀排出；挤压整形板将肥料推移至垄体内部并实现微垄整形；垄体顶部的碎土压土辊将垄顶土壤压碎平整并开沟，为油菜播种提供较优种床；排种装置将油菜种子均匀播至垄顶和垄沟播种带中，最终完成油菜垄顶和垄沟播种作业。

1.2　浅耕犁组结构

浅耕犁组由具有不同抛土方向的浅耕犁组成，

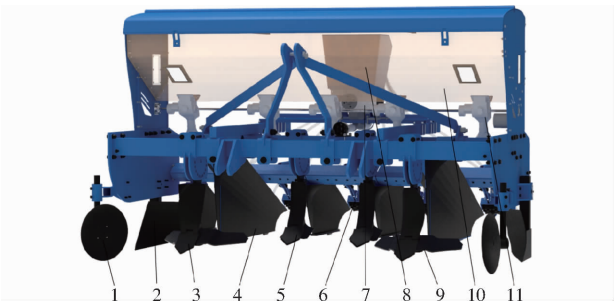

图 1 油菜高速带状微垄联合直播机结构示意图

Fig. 1 Schematic of high-speed strip micro-ridge combined direct seeding machine for rapeseed

1. 圆盘前犁 2. 类铧式后犁 3. 左翻浅耕犁 4. 挤压整形板 5. 中分浅耕犁 6. 碎土压土辊 7. 排种装置 8. 种箱 9. 右翻浅耕犁 10. 肥箱 11. 排肥器

表 1 主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 850×2 400×1 400
整机质量/kg	700
作业速度/(km·h^{-1})	6~14
垄距/mm	350~450
垄高/mm	100~150
耕深/mm	110~130
开畦沟深度/mm	180~200

根据课题组前期研究成果,浅耕犁由犁铧、翼铲、犁体曲面、犁柱组成[10],如图 2 所示。其中犁铧用于土壤抬升,由平面 AB 段和圆弧曲面 BC 段组成;犁体曲面用于土壤进一步破碎、翻转及抛掷,参照螺旋桨设计方法,设计为变螺距扭曲螺旋面,以螺旋面的母线 $C'D$ 为分界线划分为Ⅰ和Ⅱ 2 个区域,土垡在上升过程中经由区域Ⅰ发生破碎并偏转至抛送方向,经由区域Ⅱ发生土垡翻转和抛掷。由微垄断面结构及土壤定向抛送运动学分析[10]可得:犁铧入土角 θ 为 30°,铧刃角 δ 为 120°,犁铧宽度 L_1 为 120 mm,犁铧高度 h_2 为 120 mm,犁体开度 L 为 200 mm,犁体高度 H 为 375 mm,末端螺距角 γ_3 为 40°。

浅耕犁组是高速微垄种床制备的关键部件,高速作业时通过开畦沟犁组、左翻浅耕犁、右翻浅耕犁和 2 个中分浅耕犁配合作业初步形成 5 个垄坯,其配合尺寸包括横向配合尺寸和纵向配合尺寸。由于横向配合尺寸决定垄坯宽,综合考虑垄距范围、起垄数量与机具作业幅宽设计横向配合尺寸为 424 mm,而纵向配合尺寸 L_0 需参考浅耕犁单体作业时对土壤堆积及向后方抛送距离进行设计,如图 3 所示。

2 浅耕犁组阻力模型构建

浅耕犁组作业原理为 4 个浅耕犁犁铧与土壤正

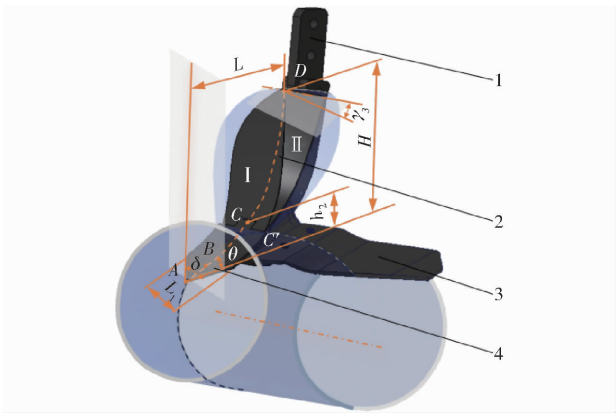

图 2 浅耕犁结构示意图

Fig. 2 Schematic of shallow plow structure

1. 犁柱 2. 犁体曲面 3. 翼铲 4. 犁铧

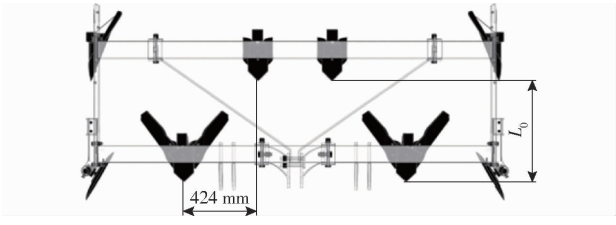

图 3 浅耕犁组结构示意图

Fig. 3 Schematic of shallow plow group structure

交切割并将土壤上移抛送,其阻力主要来源于与土壤的正切作用。由于切削深度 h_2 与切削宽度 L_1 比值为 1,土壤与犁铧作业过程中不仅会发生中心破坏区($ETIJUM$)还会发生 2 个侧向破坏区($ETIF$ 与 $MJUK$)[22],如图 4 所示,基于 Mckyes-Ali 模型及朗肯被动土压力基本理论[23],对其进行分析。

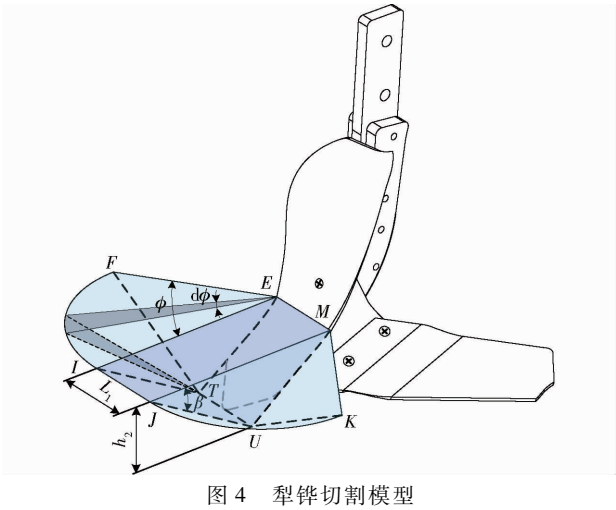

图 4 犁铧切割模型

Fig. 4 Plowshare cutting model

(1)中心破坏区受力分析

作用在中心破坏区上的力如图 5 所示,包括未扰动土壤对滑动面土壤的作用反力 F_r,滑动面土壤内聚力 c,犁铧对土壤的剪切力 F_c,犁铧与土壤间内聚力 c_a,土壤自身重力与上部压力。

根据水平和垂直方向力平衡,可得

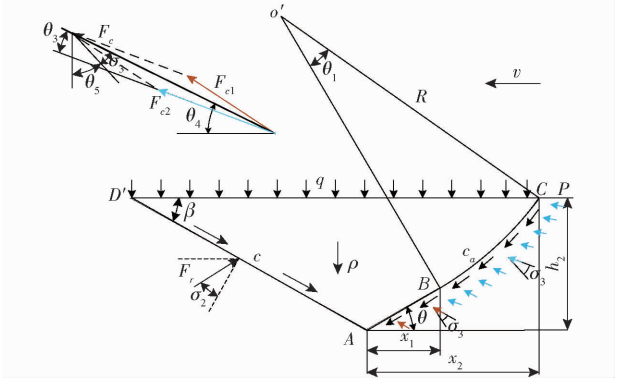

图 5　中心破坏区受力示意图

Fig. 5　Schematic of stress distribution in center destruction zone

$$\begin{cases} F_c\cos\theta_4 + c_a x_2 L_1 + SL_1\rho a = F_r\sin(\beta+\sigma_2) + cL_1h_2\cot\beta \\ F_c\sin\theta_4 + F_r\cos(\beta+\sigma_2) = cL_1h_2 + c_aL_1h_2 + SL_1\rho g + \\ \qquad qL_1(x_2 + h_2\cot\beta) \end{cases} \tag{1}$$

式中　θ_4——犁铧对土壤剪切力与水平面夹角，(°)

x_2——犁铧纵向长度，m

S——中央破坏区土壤面积，m^2

ρ——土壤密度，kg/m^3

a——土壤加速度，m/s^2

β——土壤破坏角，(°)

σ_2——土壤-土壤摩擦角，(°)

q——土壤破坏区上方压力，Pa

由图 5 可得，中央破坏区土壤面积 S 为

$$S = \frac{h_2^2}{2\tan\beta} + h_2x_1 - \frac{x_1^2\tan\theta - (h_2 - x_1\tan\theta)(x_2 - x_1) - R^2(\theta_1 - \sin\theta_1)}{2} \tag{2}$$

式中　R——犁铧圆弧段半径，m

x_1——犁铧平面段纵向长度，m

θ_1——犁铧圆弧段对应的圆心角，rad

由于犁铧由平面 AB 段与圆弧曲面 BC 段组成，因此犁铧对土壤的剪切力 F_c 包括 AB 段对土壤的剪切力 F_{c1}，BC 段对土壤的剪切力 F_{c2}，由图 5 可得犁铧对土壤剪切力与水平面间夹角 θ_4 为

$$\theta_4 = \frac{\pi}{2} - \theta - \frac{\theta_1}{2} - \sigma_3 + \theta_3 \tag{3}$$

其中

$$\begin{cases} \theta_3 = \arctan\dfrac{F_{c1}\sin\dfrac{\theta_1}{2}}{F_{c2} + F_{c1}\cos\dfrac{\theta_1}{2}} \\ F_{c1} = P\dfrac{x_1}{\cos\theta}L_1 \\ F_{c2} = 2L_1\displaystyle\int_0^{\frac{\theta_1}{2}} P\cos\alpha\,\mathrm{d}\alpha \end{cases} \tag{4}$$

式中　σ_3——土壤-犁铧摩擦角，(°)

θ_3——圆弧 BC 段对土壤剪切力 F_{c2} 与犁铧对土壤剪切力合力 F_c 间夹角，(°)

$\mathrm{d}\alpha$——圆心角 θ_1 对应的微单元角度，(°)

P——犁铧对土壤的单位剪切载荷，N/m^2

整理得

$$\theta_3 = \arctan\frac{x_1\sin\dfrac{\theta_1}{2}}{2\sin\dfrac{\theta_1}{2}\cos\theta + x_1\cos\dfrac{\theta_1}{2}} \tag{5}$$

由于土壤从点 C 到点 D' 速度由 0 增加至 v，假设整个加速过程加速度恒定，则土壤加速度为

$$a = \frac{v^2}{2(h_2\cot\beta + x_2)} \tag{6}$$

破坏角根据被动土压力理论获得，即

$$\beta = \frac{1}{2}\left(\frac{\pi}{2} - \sigma_2\right) \tag{7}$$

综合式(1)～(7)可得，中心破坏区剪切力 F_c 为

$$F_c = \frac{L_1h_2\tan(\beta+\sigma_2)(c + c_a + g\cot\beta) + L_1x_2(q\tan(\beta+\sigma_2) - c_a)}{\sin\theta_4\tan(\beta+\sigma_2) + \cos\theta_4} + \frac{SL_1\rho(g\tan(\beta+\sigma_2) - a) + cL_1h_2\cot\beta}{\sin\theta_4\tan(\beta+\sigma_2) + \cos\theta_4} \tag{8}$$

对式(8)进行计算分析，由于土壤物理特性与犁铧结构参数已知，土壤密度 ρ 为 1.56～1.87 g/cm^3，土壤-土壤摩擦角 σ_2 为 25°～35°，土壤-犁铧摩擦角 σ_3 为 22°～28°[24]，计算得土壤破坏角 β 为 27.5°～32.5°，F_c 与水平面间夹角 θ_4 为 21.35°～27.35°，因此由式(8)得，浅耕犁中心破坏区剪切力 F_c 与作业速度平方 v^2、中央破坏区上方的土壤压力 q 成正比。这与前期 REECE[25] 提出的剪切力公式得出的规律相同，即

$$F_c = \rho g h_2^2 N_{\rho1} + ch_2N_{c1} + qdN_{q1} + Cah_2N_{ca1} + \rho v^2h_2N_{a1}$$

其中

$$N_{\rho1} = \frac{\sin(\beta+\theta_5)\sin(\beta+\sigma_2)}{2\sin\theta_5\sin\beta\sin(\theta_5+\beta+\sigma_2+\sigma_3)}L_1$$

$$N_{c1} = \frac{\cos\sigma_2}{\sin\beta\sin(\theta_5+\beta+\sigma_2+\sigma_3)}L_1$$

$$N_{q1} = \frac{\sin(\beta+\theta_5)\sin(\beta+\sigma_2)}{\sin\theta_5\sin\beta\sin(\theta_5+\beta+\sigma_2+\sigma_3)}L_1$$

$$N_{ca1} = -\frac{\cos(\theta_5+\beta+\sigma_2)}{\sin\theta_5\sin(\theta_5+\beta+\sigma_2+\sigma_3)}L_1$$

$$N_{a1} = \frac{\cos(\sigma_2+\beta)}{\sin(\theta_5+\beta+\sigma_2+\sigma_3)}L_1$$

式中　θ_5——犁铧对土壤剪切力的切割角，(°)

$N_{\rho1}$、N_{c1}、N_{q1}、N_{ca1}、N_{a1} 因子为无量纲数，取决于 β、θ、θ_1、θ_5、σ_2、σ_3。

(2)侧向破坏区受力分析

由图 4 可得,侧向破坏区是由犁铧边缘延伸至月牙形边界的 2 个扇形区域组成(*ETIF* 与 *MJUK*),采用微元法分析其力学模型,如图 6 所示,其分析方法与中心破坏区相似。

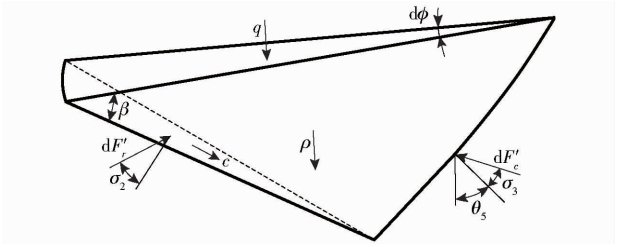

图 6 侧向破坏区受力示意图

Fig. 6 Schematic of lateral failure zone stress

根据水平和垂直方向力平衡,可得

$$\begin{cases} \mathrm{d}F'_c\sin(\theta_5+\sigma_3)=\mathrm{d}F'_r\sin(\beta+\sigma_2)+\\ \quad\frac{1}{2}ch_2\cot\beta(x_2+h_2\cot\beta)\mathrm{d}\phi\\ \mathrm{d}F'_c\cos(\theta_5+\sigma_3)=\mathrm{d}F'_r\cos(\beta+\sigma_2)+\\ \quad\frac{1}{2}ch_2(x_2+h_2\cot\beta)\mathrm{d}\phi+\frac{1}{2}q(x_2+h_2\cot\beta)^2\mathrm{d}\phi+\\ \quad\frac{1}{6}(x_2+h_2\cot\beta)^2\rho h_2g\mathrm{d}\phi \end{cases} \tag{9}$$

式中 $\mathrm{d}F'_c$——犁铧边缘对土壤微元体剪切力,N

$\mathrm{d}F'_r$——未扰动土壤对土壤微元体滑动面的作用反力,N

$\mathrm{d}\phi$——土壤微元体对应的弧度,rad

g——重力加速度,取 9.8 m/s^2

联立力平衡方程(9)可得

$$\mathrm{d}F'_c=\frac{(3ch_2l_2+l_2^2\rho h_2g+3ql_2^2)\tan(\beta+\sigma_2)-3ch_2l_2\cot\beta}{6(\cos(\theta_5+\sigma_3)\tan(\beta+\sigma_2)-\sin(\theta_5+\sigma_3))}\mathrm{d}\phi \tag{10}$$

其中 $$l_2=x_2+h_2\cot\beta$$

式中 l_2——扇形区域半径,m

切削方向 *EI* 与月牙形边界 *EF* 间角度 ϕ 参考文献[26]得出,为

$$\phi=\arccos\frac{\sin\beta\cos\theta_5}{h_2\sin(\theta_5+\beta)} \tag{11}$$

对土壤微元体进行积分并求解侧向破坏区在水平方向与竖直方向上的剪切力,为

$$\begin{cases} F'_{cH}=\int_0^{\phi}F'_c\sin(\theta_5+\sigma_3)\cos\phi\mathrm{d}\phi\\ F'_{cV}=\int_0^{\phi}F'_c\cos(\theta_5+\sigma_3)\mathrm{d}\phi \end{cases} \tag{12}$$

联立式(10)~(12)可得,侧向破坏区水平与竖直方向上的剪切力 F'_{cH}、F'_{cV}为

$$\begin{cases} F'_{cH}=\frac{(3ch_2l_2+l_2^2\rho h_2g+3ql_2^2)\tan(\beta+\sigma_2)-3ch_2l_2\cot\beta}{6(\cos(\theta_5+\sigma_3)\tan(\beta+\sigma_2)-\sin(\theta_5+\sigma_3))}\cdot\\ \quad\sin(\theta_5+\sigma_3)\sin\phi\\ F'_{cV}=\frac{(3ch_2l_2+l_2^2\rho h_2g+3ql_2^2)\tan(\beta+\sigma_2)-3ch_2l_2\cot\beta}{6(\cos(\theta_5+\sigma_3)\tan(\beta+\sigma_2)-\sin(\theta_5+\sigma_3))}\cdot\\ \quad\cos(\theta_5+\sigma_3)\phi \end{cases} \tag{13}$$

(3)总阻力分析

由于犁铧作业产生 1 个中心破坏区与 2 个侧向破坏区,因此犁铧在垂直方向(H_s)和水平方向(V_s)阻力分量为

$$\begin{cases} H_s=F_c\cos\theta_4+2F'_{cH}\\ V_s=F_c\sin\theta_4+2F'_{cV} \end{cases} \tag{14}$$

各分力均与浅耕犁作业速度和堆积土壤量有关,为准确构建理论模型,在模型中引入修正系数 k_d 对理论阻力进行修正,修正后阻力 F_d 为

$$F_d=k_d\sqrt{H_s^2+V_s^2} \tag{15}$$

浅耕犁组阻力模型不是单体阻力叠加,由于浅耕犁组作业时,前排犁对土壤进行了松动,土壤结构发生了变化,造成后排犁作业时阻力也发生变化。同时浅耕犁组安装间距会对土壤流动进行干扰,间距不当时会造成土壤堵塞,进一步引起犁组整体阻力变化,因此引入可反映土壤流动状态和堵塞风险的通过性系数 k_z,浅耕犁组阻力 F_z 模型为

$$F_z=4k_zk_d\sqrt{H_s^2+V_s^2} \tag{16}$$

其中通过性系数 k_z 对浅耕犁组阻力产生影响,由后续浅耕犁组田间试验结果分析计算。

3 浅耕犁单体与犁组田间试验

为明确浅耕犁不同作业速度下堆积土壤量的变化,确定阻力模型参数和修正系数,探究通过性系数对犁组通过性能的影响,于 2024 年 9 月开展了浅耕犁单体田间试验和浅耕犁组田间试验。

3.1 试验条件与方法

浅耕犁单体和浅耕犁组田间试验参照 NY/T 2089—2011《油菜直播机 质量评价技术规范》标准要求,选择代表性冬油菜种植区——湖北省京山市屈家岭管理区华中农业大学高性能播种关键技术集成与智能播种机生产示范基地(30.8°N,112.9°E)开展。该地常年采取两季作物轮作,土壤类型为黏质沙壤土。试验区域地形平坦,上茬作物为黄豆,作物残留物分布均匀,通过五点取样法测取土壤坚实度为 1 834.06 kPa,含水率为 13.36%,容重为 1.10 g/cm^3。

浅耕犁固定于前期研制的三点悬挂机架上,在机架和东方红 954 - LX 型拖拉机间连接负荷传感

器(BK－5 型,量程 0～50 kN,中国航天空气动力技术研究院),高帧率运动相机(Gopro 9 型)同步安装于机架上,浅耕犁单体作业时从犁体侧边拍摄土壤运动及堆积状态;浅耕犁组作业时从犁体后方拍摄堵塞情况及通过性能,如图 7 所示。

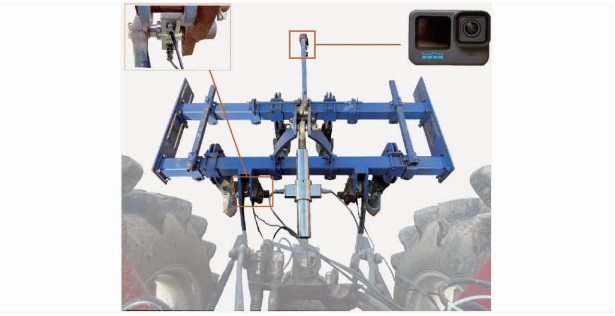

图 7　浅耕犁组田间试验装置

Fig. 7　Field test device for shallow plow group

试验前通过预试验确定浅耕犁工作状态下入土深度为 120 mm 时下悬挂液压控制手柄位置及拖拉机下悬挂高度。试验时机组按照前期预试验结果对作业深度进行调整后在选定地块沿直线作业 150 m,其中前 20 m 为机组加速至设定速度作业区段,后 20 m 为减速作业区段,中间 110 m 为稳定作业区段。

3.2　试验因素与指标

3.2.1　浅耕犁单体田间试验

由于浅耕犁作业速度会对阻力、土壤抛送及堆积产生较大影响,因此选取浅耕犁作业速度为试验因素。试验前开展浅耕犁作业深度为 120 mm 的预试验,通过调节拖拉机挡位和手油门位置控制机组作业速度并通过车载 GPS 测速仪进行观察,分别在机组稳定作业速度为 6、8、10、12、14 km/h 时对挡位进行记录,对手油门位置进行标记。试验时按照前期预试验所记录和标记的拖拉机挡位及手油门位置对机组作业速度进行设定。

试验指标选取土壤动态响应指标与阻力 F'_d,其中土壤动态响应指标包括土壤上升高度 H_1、堆积距离 L_2及抛送距离 L_3(图 8),以进一步分析土壤堆积和定向抛送变化,明确速度与堆积土壤间的关系,为浅耕犁组参数匹配提供依据,并验证阻力模型的准确性。土壤动态响应指标由高帧率运动相机拍摄视频并对视频随机抓取稳定作业区段内的 10 幅关键帧,将图像导入 Image J 软件中根据像素求取相应数值。

3.2.2　浅耕犁组田间试验

浅耕犁组田间作业是土壤在犁间运移流动,作业速度与安装间距对土壤流动有较大影响,因此选取浅耕犁组作业速度和纵向配合尺寸作为试验因素。作业速度与单体田间试验速度设定值相同,作业前通过预试验记录拖拉机挡位并标记手油门位置,以后续对作业速度进行调节。纵向配合尺寸 L_0 参考浅耕犁单体试验时不同作业速度下的试验指标,以 $L_0 = k_L L_z$ 为基础分别设计为窄间距(k_L = 0.25)、中等间距(k_L = 0.5)和宽间距(k_L = 0.75),其中 k_L为安装间距系数,L_z为



图 8　土壤动态响应指标

Fig. 8　Soil dynamic response index

$$L_z = L_2 + L_3 \tag{17}$$

试验指标选取实际犁组阻力 F'_z、犁组通过性和垄坯形指标。其中实际犁组阻力 F'_z 由传感器获得;犁组通过性指标参考农业部农业机械试验鉴定总站制定的《免耕施肥播种机》推广鉴定大纲和 DB 63/T 1552—2017《机械化起垄铺膜作业质量》等标准要求,设定起垄断条率 A_{sd}对犁组通过性进行量化,以表示犁组被作物残茬堵塞壅土造成垄坯宽度过窄,垄坯高度小于 70 mm,无法通过后续挤压整形方式达到最低垄高要求的情况;垄坯形指标包括垄坯距 W_s、垄坯高 H_s与轮廓重合度指数 $SCRI$。犁组通过性和垄坯形指标均通过 Trimble TX8 型三维激光扫描仪对作业后地表进行扫描,后续导入 Trimble RealWorks 软件,在稳定作业区段中进行测量计算,计算式为

$$\begin{cases} A_{sd} = \dfrac{\sum_{i=1}^{n_1} L_{sdi}}{L_{Z1}} \times 100\% \\ W_s = \dfrac{\sum_{i=1}^{5} w_{si}}{5} \\ H_s = \dfrac{\sum_{i=1}^{5} h_{si}}{5} \\ SCRI = 1 - \dfrac{\sum_{j=1}^{n_3}\sum_{i=1}^{n_2} \left| h_{rij} - h_{tij} \right|}{n_2 n_3 H_t} \end{cases} \tag{18}$$

式中　L_{sdi}——稳定作业区段内垄坯宽过窄,垄坯高度小于 70 mm 作业长度,m

n_1——选取测定垄数量

w_{si}——沟与沟间距离,m

h_{si}——垄坯顶至沟底间距离,m

h_{rij}——垄形截面测量点高程,mm

h_{tij}——理想垄形对应点高程,mm

H_t——理想垄高,mm

L_{Z1}——选取测定垄稳定作业区段总长度,m

n_2——垄划分测量点数

n_3——垄体取样数

3.3 试验结果与分析

3.3.1 单体试验结果与分析

(1)土壤动态响应指标

不同作业速度下土壤动态响应指标变化如图 9 所示。由图 9 可知,随着作业速度提高,土壤上升高度、堆积距离及抛送距离均逐渐增大。当作业速度增大至 12 km/h 时,土壤上升高度为 488.8 mm、土壤堆积距离为 335.1 mm、土壤抛送距离为 825.6 mm,当作业速度继续增大至 14 km/h 时,土壤上升高度、堆积距离及抛送距离急剧增大,试验中发现当作业速度为 6、8 km/h 时,土壤抛送较为平顺;当作业速度为 10 km/h 时,会随机出现土壤抛送至较高位置与机架发生碰撞的情况;当作业速度为 12 km/h 时,土壤抛送至较高位置与机架发生碰撞的频率增加;当作业速度为 14 km/h 时,浅耕犁对土壤冲击载荷较大且一定时间内土壤堆积较多,无法快速抛送导致土壤堆积距离急剧增大,同时由于土壤离开犁面后获得的初速度较大,上升高度较高且持续撞击机架并发生壅堵及回落。

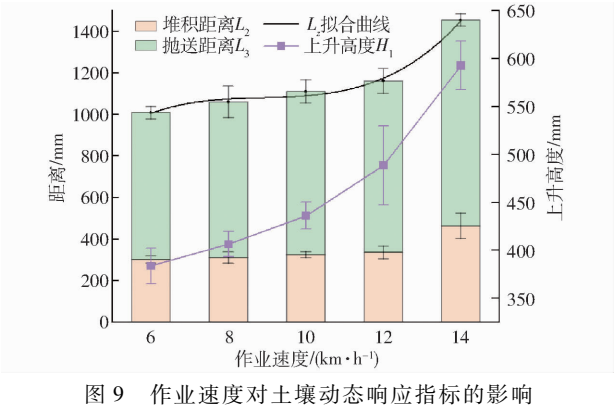

图 9 作业速度对土壤动态响应指标的影响

Fig. 9 Effect of operation speeds on soil dynamic response indicators

浅耕犁安装间距需参考浅耕犁对土壤的堆积及抛送距离,因此对 L_z 方程进行拟合分析,其中决定系数 R^2 为 0.99,说明拟合曲线方程可靠,拟合方程为

$$L_z = -739.20 + 605.13v - 67.67v^2 + 2.54v^3 \tag{19}$$

为求解分析第 2 节浅耕犁组阻力模型中土壤扰动区上方的压力 q,对不同作业速度下的土壤堆积开展分析,如图 10 所示。扰动区上方压力 q 与区域

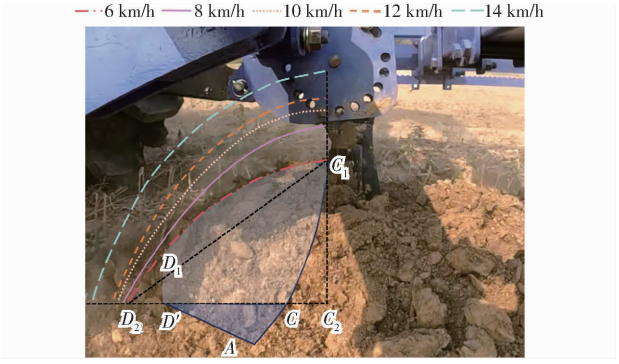

图 10 不同作业速度下土壤堆积轮廓

Fig. 10 Soil accumulation profile at different working speeds

CC_1D_1D' 的土壤质量有关,为求解该区域质量,将其简化为三角形 $D_2C_2C_1$,体积包括浅耕犁正前方宽度为 L_1 的三角体和 2 个绕 C_2C_1 旋转 ϕ 的锥体,因此为确定堆积土壤质量,对 D_2C_2 长度 L_2,C_2C_1 长度 H_1 与作业速度间的关系进行拟合分析,R^2 分别为 0.99 和 0.98,说明拟合曲线方程可靠,具体方程为

$$\begin{cases} H_1 = 515.50 - 41.07v + 3.30v^2 \\ L_2 = -458.36 + 270.66v - 31.11v^2 + 1.18v^3 \end{cases} \tag{20}$$

扰动区上方土壤质量 M_1 与压力 q 计算式为

$$\begin{cases} q = \dfrac{M_1}{S_1} \\ M_1 = \left(\dfrac{H_1 L_2 L_1}{2} + \dfrac{H_1 L_2^2 \phi}{3} \right) \rho g \\ S_1 = L_1(x_2 + h_2 \cot\beta) + \phi(x_2 + h_2 \cot\beta)^2 \end{cases} \tag{21}$$

式中 S_1——土壤扰动区表面面积,m^2

(2)浅耕犁阻力

由式(14)、(21)求解浅耕犁理论阻力。理论阻力与实际阻力对比如图 11 所示。试验结果表明,随着作业速度增加,理论阻力与实际阻力均逐渐增加,其中实际值大于理论值是由于在模型计算中没有考虑犁翼阻力,同时两者之间存在差异还由于田间试验时土壤质地、容重、坚实度、结构等方面存在空间异质性,而理论模型是将土壤力学行为做了简化处理,将土壤简化为均质、各向同性的连续介质,没有考虑土壤断裂和剪切带造成的阻力波动等问题。

为更好地预测浅耕犁阻力,对阻力模型修正系数 k_d 进行求解,通过对实际阻力与理论阻力比值进行回归拟合分析可得,其回归方程为

$$k_d = -0.4896 + 0.4394v - 0.0235v^2 \tag{22}$$

该拟合方程 R^2 为 0.99,说明拟合曲线方程可信,修正后理论阻力如图 11 所示,结果表明修正后理论阻力模型可以较好地预测浅耕犁阻力。

3.3.2 犁组试验结果与分析

浅耕犁组试验阻力变化如图 12 所示,各安装间

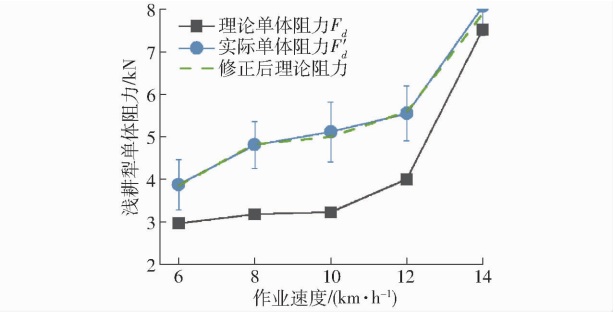

图 11　浅耕犁单体阻力理论值与实际值对比

Fig. 11　Comparison of theoretical and actual values for traction resistance of single shallow plow

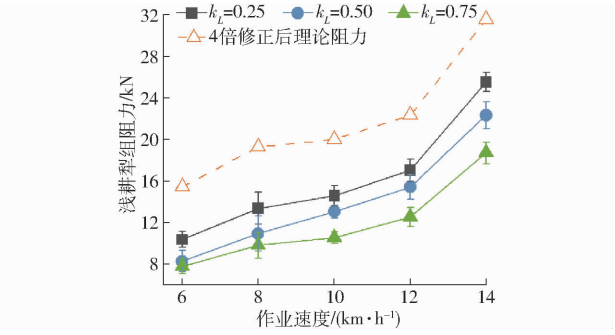

图 12　犁组阻力理论值与实际值对比

Fig. 12　Comparison of theoretical and actual values for shallow plow group traction resistance

距条件下总阻力变化趋势与浅耕犁单体阻力变化趋势较为一致，均随着作业速度增加而变大，且不同安装间距下总阻力且均小于 4 倍修正后理论阻力，两者数值差异较大是由于后排浅耕犁没有安装翼铲，且前排犁对土壤的扰动改变了土壤结构，引起后排犁阻力变小。

由式(16)可得，阻力还与通过性系数 k_z 有关，为量化 k_z 对阻力和土壤流动状态及堵塞风险的影响，对 k_z 进行分析，如图 13 所示。不同纵向尺寸水平下的通过性系数 k_z 与起垄断条率 A_{sd} 均随着作业速度增大而增大；同一速度水平下 k_z 与 A_{sd} 随着安装间距减小而增大。通过图像处理分析可得，通过性系数和断条率提高主要是由于前排犁抛送的土壤与后排犁堆积土壤发生结拱效应而堵土，作业速度越高，土壤获得动量越大，土壤发生碰撞产生塑性变形并粘结频率越高；前后排犁间距越小，发生结拱效应的缝隙越小，前排犁抛送的土壤与后排犁堆积的土壤接触面积更大，碰撞更充分，结拱效应更加频繁。

减小起垄断条率是高速微垄种床制备的首要条件，由上述分析可得，起垄断条率与通过性系数呈现相同变化规律，当通过性系数变大时，因发生结拱效应导致土壤堵塞，引起犁组阻力急剧增大且起垄断条率增大，造成作业后垄坯高度不满足要求的概率增加，因此结合试验结果和 DB 63/T 1552—2017

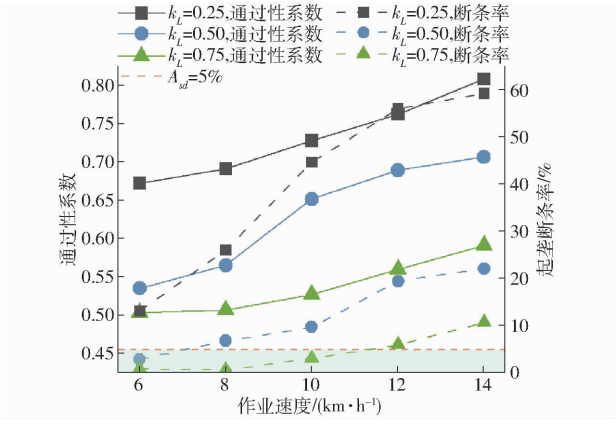

图 13　浅耕犁组通过性系数及起垄断条率变化曲线

Fig. 13　Shallow plow group passability coefficient and ridge formation rate changes

《机械化起垄铺膜作业质量》垄高合格率要求分析可得，以断条率 A_{sd}≤5% 为目标，通过性系数需满足 k_z≤0.55。

由于通过性系数受作业速度与安装间距影响，为量化通过性系数，以寻求不同作业速度下较优安装间距，提高浅耕犁组通过性能。以前期犁组田间试验数据为基础，对通过性系数 k_z 开展关于作业速度 v 与安装间距系数 k_L 的中心复合试验(Central composite face-centered design)。试验因素编码如表 2 所示，试验设计方案与试验结果如表 3 所示。

表 2　试验因素编码

Tab. 2　Factors and codes

编码	因素	
	作业速度 v/(km·h^{-1})	安装间距系数 k_L
-1	6	0.25
0	10	0.50
1	14	0.75

表 3　试验设计方案与试验结果

Tab. 3　Experimental design and results

序号	因素		通过性系数 k_z
	作业速度 v/(km·h^{-1})	安装间距系数 k_L	
1	10	0.50	0.65
2	14	0.75	0.59
3	6	0.25	0.67
4	10	0.25	0.73
5	14	0.50	0.71
6	14	0.25	0.81
7	10	0.50	0.53
8	6	0.75	0.50
9	10	0.75	0.64
10	10	0.50	0.67
11	10	0.50	0.64
12	6	0.50	0.54
13	10	0.50	0.66

对试验数据进行回归模型方差分析，如表 4 所示。由表 4 可得，通过性系数 k_z 回归模型显著，说明试验指标与试验因素间存在确定关系，同时失拟项不显著，说明模型拟合效果好。由各因素 P 值可得，交互项与二次项均不显著。对模型剔除不显著项重新进行分析，保证所有因素均达到显著或极显著水平，最终得到各试验指标与因素间回归方程为

$$k_z = 0.634\,215 + 0.016\,450v - 0.313\,668k_L \quad (23)$$

表 4 通过性系数 k_z 方差分析结果

Tab. 4 ANOVA of passability coefficient k_z

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	0.068 2	5	0.013 6	4.88	0.030 6 *
v	0.026 0	1	0.026 0	9.3	0.018 6 *
k_L	0.036 9	1	0.036 9	13.2	0.008 4 **
vk_L	0.000 6	1	0.000 6	0.211 5	0.659 5
v^2	0.001 6	1	0.001 6	0.590 3	0.467 4
k_L^2	0.004 4	1	0.004 4	1.58	0.248 8
残差	0.019 6	7	0.002 8		
失拟项	0.005 7	3	0.001 9	0.555	0.671 9
纯误差	0.013 8	4	0.003 5		
总和	0.087 7	12			

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

满足机具通过性能的前提下还需对作业后形成的垄坯进行分析，以提高后续垄形合格率和稳定性。结合 $k_z \leqslant 0.55$ 的要求，计算在 6 ~ 10 km/h（中速）和 10 ~ 14 km/h（高速）作业下的安装间距临界系数分别为 $0.58 \leqslant k_L \leqslant 0.79$ 和 $k_L > 0.79$。选取前期开展的 $k_L = 0.75$ 进行垄坯分析，如图 14 所示。当安装间距系数 k_L 选取 0.75 时，随着作业速度增大，垄坯距呈现较小幅度增加且均大于目标垄坯距，垄坯高呈现先增大再减小变化规律。通过图像分析及三维激光扫描后点云数据处理可得，由于后排犁会对前排犁抛送的土壤形成扰动，当作业速度较低时，后排犁作业会挤压前排犁抛送的土壤，造成部分土壤回流且回流方向与抛送方向相反，因此垄沟向外侧移动引起垄距增大，同时前排犁抛送作业后的土壤堆积高度也会降低，而后排犁由于速度较小，土壤抛送距离及抛送高度较小，因此堆积高度也较小，造成垄坯形状变成凹形，轮廓重合度指数也降低；当作业速度提升时，后排犁的侧向抛送距离和抛送高度变大，因此不仅会有部分前犁抛送的土壤回流，还会有部分后犁抛送的土壤进入前犁开出的垄沟中，引起垄坯距和垄坯高增大，轮廓重合度指数也变大；当作业速度大于 10 km/h 时，由于犁组通过性变差，会发生结拱效应导致犁间土壤流动不通畅，产生间歇性喷土，垄坯距因土壤侧向运移距离过远导致增大，垄坯高因土壤堵塞而降低，轮廓重合度指数也相应变小。

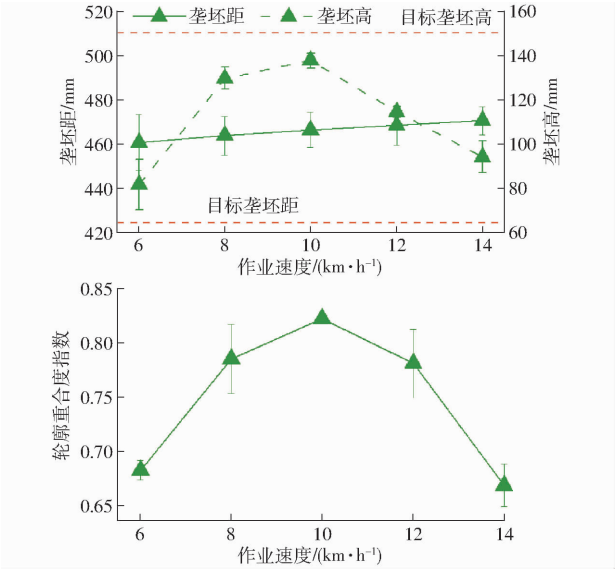

图 14 $k_L = 0.75$ 时垄坯形指标变化曲线

Fig. 14 Changes in preliminary ridge shape indicators when $k_L = 0.75$

综上所述，满足通过性系数 $k_z \leqslant 0.55$ 是保证垄坯形指标的关键，在满足通过性系数要求的前提下，安装间距系数 k_L 的选取越接近相应速度下的安装间距临界系数，所获得的垄坯轮廓重合度指数越高。为提高油菜高速带状微垄联合直播机在 10 ~ 12 km/h 时的通过性能且避免阻力剧增，提供垄形稳定的微垄种床，由式（19）、（23）得出前后排犁安装间距为 976 ~ 1 050 mm。

4 整机田间试验

4.1 试验条件与方法

为检验浅耕犁组在油菜高速带状微垄联合直播机上的微垄种床制备作业性能，根据上述分析选取前后排犁安装间距 1 000 mm 试制加工。参照 NY/T 2089—2011《油菜直播机 质量评价技术规范》标准要求，于 2024 年 10 月在湖北省京山市屈家岭管理区华中农业大学高性能播种关键技术集成与智能播种机生产示范基地开展整机田间试验。试验地块平坦无障碍物，土壤类型为黏质沙壤土，土壤坚实度为 1 790 kPa，含水率为 16.9%，容重为 1.21 g/cm^3。

机具由东方红 954 型拖拉机提供动力，试验前先开展预试验，通过调整下悬挂液压控制手柄调节拖拉机下悬挂高度，以达到浅耕犁作业深度为 120 mm，同时调节拖拉机挡位和手油门位置控制拖拉机作业速度，通过车载 GPS 测速仪观察机组稳定作业速度为 10、12 km/h 时对下悬挂液压控制手柄位置、拖拉机挡位和手油门位置进行记录和标记。试验时按照前期预试验结果调整机具作业深度和速

度。试验机组沿地块长度 200 m 直线行进，每次试验进行往返以代表重复。试验结束后在中间 160 m 稳定作业区段内等距选取 5 m × 5 m 区域采用 Trimble TX8 型三维激光扫描仪对微垄种床进行扫描，后续导入 Trimble RealWorks 软件中获取微垄点云图进行处理。试验指标选取垄高及其变异系数，垄距及其变异系数。

4.2　试验结果与分析

整机田间试验结果表明，油菜高速带状微垄联合直播机在阻力模型和通过性系数指导下，垄形稳定，作业后微垄种床无断条情况（图 15a），作业后地表三维数字化建模如图 15b 所示。试验结果如表 5 所示，2 种作业速度下垄高和垄距变异系数均不大于 4.96%，其中 10 km/h 的垄高及垄距变异系数比 12 km/h 小 0.86、0.81 个百分点，是由于 10 km/h 时挤压整形板和碎土压土辊对微垄作业时间相对较长，定形能力相对较强，且对垄顶土壤的碎土镇压较为充实。整机作业形成的微垄种床满足油菜种植农艺要求，15 d 和 40 d 油菜出苗效果如图 15c、15d 所示。



(a) 整机试验作业效果　(b) 作业后地表三维数字化建模

(c) 油菜15 d出苗效果　(d) 油菜40 d出苗效果

图 15　整机田间试验及油菜出苗效果

Fig. 15　Field experiment of machine and effect of rapeseed seedling emergence

表 5　整机田间试验结果

Tab. 5　Field experiment results for entire machine

试验指标	作业速度/(km·h^{-1})	
	10	12
垄高平均值/mm	138.2	141.4
垄高变异系数/%	3.92	4.78
垄距平均值/mm	423.6	426.5
垄距变异系数/%	4.15	4.96

5　结论

（1）针对油菜带状微垄联合直播机高速作业时易产生犁间土壤堵塞、阻力骤增、通过性变差等问题，分析了关键部件浅耕犁组对土壤的破坏形式和阻力来源，构建了阻力模型并引入反映土壤流动状态和堵塞风险的通过性系数。

（2）通过不同作业速度下的浅耕犁单体田间试验，分析了土壤动态响应指标，确定了阻力模型修正系数并为犁组配合尺寸提供依据；开展了犁组田间试验并分析了作业速度和安装间距对通过性系数和起垄断条率的影响，通过中心复合试验确定了通过性系数与速度及安装间距间的关系，明确当通过性系数小于等于 0.55 时，起垄断条率小于等于 5%，在保证机具通过性的前提下油菜高速带状微垄联合直播机浅耕犁组的适宜安装间距为 1 000 mm。

（3）开展了油菜高速带状微垄联合直播机在作业速度为 10、12 km/h 田间试验并采用三维激光扫描技术对作业后垄形分析处理，结果表明：在阻力模型和通过性系数指导条件下，垄形稳定，作业后微垄种床无断条情况，垄高平均值分别为 138.2 mm 和 141.4 mm，垄距平均值分别为 423.6 mm 和 426.5 mm，垄高及垄距变异系数均不大于 4.96%，表明浅耕犁组通过性能和成垄性能好，出苗效果良好，说明微垄种床满足油菜种植农艺要求。

参　考　文　献

[1]　陈慧，高丽萍，陈勇，等. 机械直播同步深施肥对冬油菜茎秆抗倒性和产量的影响[J]. 农业工程学报，2022，38(5)：20－27.
CHEN Hui，GAO Liping，CHEN Yong，et al. Effects of mechanical direct seeding synchronous deep fertilization on winter rapeseed stem lodging resistance and yield[J]. Transactions of the CSAE，2022，38(5)：20－27.(in Chinese)

[2]　高丽萍，陈慧，刘嘉诚，等. 油菜机械直播同步分层施肥对根系构型和抗倒伏能力影响[J]. 农业工程学报，2023，39(11)：87－97.
GAO Liping，CHEN Hui，LIU Jiacheng，et al. Effects of synchronous layered fertilization with machinery on the root architecture and lodging resistance of rape[J]. Transactions of the CSAE，2023，39(11)：87－97.(in Chinese)

[3]　中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京：中国统计出版社，2023.

[4]　TRENBERTH K E. Changes in precipitation with climate change[J]. Climate Research，2011，47(1)：123－138.

[5]　ASADIEH B，KRAKAUER N Y. Global change in streamflow extremes under climate change over the 21st century[J].

Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(11): 5863 – 5874.
[6] CHRISTIAN J, CHRISTIAN K, BASARA J B. Drought and pluvial dipole events within the great plains of the United States [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2015, 54(9): 1886 – 1898.
[7] TABARI H. Author correction: climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 16969.
[8] WANG X, EL-BADRI A M, LI M, et al. Micro-ridge-furrow soil moisture regulation technology improves seedling quality and yield of winter rapeseed[J]. Soil and Tillage Research, 2024, 237: 105960.
[9] WANG X L, LI L, WANG C Y, et al. Micro-ridge-furrow planting increases rapeseed yield and resource utilization efficiency through optimizing field microenvironment and light-nitrogen matching[J]. The Crop Journal, 2025, 13(2): 587 – 596.
[10] 杜文斌, 林建新, 李晓冉, 等. 油菜高速带状微垄联合直播机浅耕犁设计与试验[J]. 农业工程学报, 2025, 41(12): 38 – 48.
DU Wenbin, LIN Jianxin, LI Xiaoran, et al. Design and experiments of the shallow plow for the high-speed strip micro-ridge combined direct seeding machine for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(12): 38 – 48. (in Chinese)
[11] 吕金庆, 刘齐卉, 李紫辉, 等. 犁铧式马铃薯中耕机培土装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 71 – 82.
LÜ Jinqing, LIU Qihui, LI Zihui, et al. Design and experiment of soil cultivating device of plowshare potato field cultivator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 71 – 82. (in Chinese)
[12] 魏国梁, 张青松, 刘立超, 等. 犁旋组合式油菜直播机扣垡装置设计与试验[J]. 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 tillage buckle device for rapeseed direct seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 38 – 46. (in Chinese)
[13] 史宇亮, 陈新予, 陈明东, 等. 甘薯起垄整形机犁铧式开沟起垄装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 16 – 25.
SHI Yuliang, CHEN Xinyu, CHEN Mingdong, et al. Design and experiment on ploughshare furrowing ridging device of sweet potato ridging shaping machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 16 – 25. (in Chinese)
[14] 张青松, 汲文峰, 廖宜涛, 等. 油菜直播机铧式开畦沟前犁曲面分析与阻力特性试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 130 – 135.
ZHANG Qingsong, JI Wenfeng, LIAO Yitao, et al. Surface analysis and resistance characteristics experiment on ditch plow ahead of direct rapeseed seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 130 – 135. (in Chinese)
[15] 张青松, 廖庆喜, 汲文峰, 等. 油菜直播机开沟犁体曲面优化与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 53 – 59.
ZHANG Qingsong, LIAO Qingxi, JI Wenfeng, et al. Surface optimization and experiment on ditch plow of direct rapeseed seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 53 – 59. (in Chinese)
[16] MARI I A, JI C, CHANDIO F A, et al. Spatial distribution of soil forces on moldboard plough and draft requirement operated in silty-clay paddy field soil[J]. Journal of Terramechanics, 2015, 60: 1 – 9.
[17] AZIMI-NEJADIAN H, KARPARVARFARD S, NADERI-BOLDAJI M, et al. Combined finite element and statistical models for predicting force components on a cylindrical mouldboard plough[J]. Biosystems Engineering, 2019, 186: 168 – 181.
[18] 王学振, 岳斌, 高喜杰, 等. 深松铲不同翼铲安装高度时土壤扰动行为仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 124 – 136.
WANG Xuezhen, YUE Bin, GAO Xijie, et al. Discrete element simulations and experiments of disturbance behavior as affected by mounting height of subsoiler's wing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 124 – 136. (in Chinese)
[19] LIU K H, SOZZI M, GASPARINI F, et al. Combining simulations and field experiments: effects of subsoiling angle and tillage depth on soil structure and energy requirements[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 214: 108323.
[20] JIANG X H, TONG J, MA Y H, et al. Development and verification of a mathematical model for the specific resistance of a curved subsoiler[J]. Biosystems Engineering, 2020, 190: 107 – 119.
[21] WANG Y M, LI N, MA Y H, et al. Field experiments evaluating a biomimetic shark-inspired (BioS) subsoiler for tillage resistance reduction[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 196: 104432.
[22] ZHANG Y L, WU R Y, LONG Z W, et al. Experimental investigation and theoretical modeling of cutting mechanics using serrated tines in drilling lunar regolith simulant[J]. Advances in Space Research, 2024, 74(8): 3925 – 3944.
[23] SHEN X, YUAN D J, JIN D L, et al. Model test on cutterhead-soil interaction during shield tunneling and its theoretical model[J]. Underground Space, 2025, 20: 46 – 68.
[24] 曾德超. 机械土壤动力学[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1995.
[25] REECE A. The fundamental equation of earth-moving mechanics[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1964, 11:16 – 22.
[26] GODWIN R, SPOOR G. Soil failure with narrow tines[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1977, 22: 213 – 228.