

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.11.004

小白菜复式播种机犁旋辊压驳岸型种床起垄装置研究

刘 海^{1,2} 张青松^{1,3} 廖宜涛^{1,3} 魏国梁^{1,3} 杜 铮^{1,2} 廖庆喜^{1,3}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 武汉市农业科学院, 武汉 430065;
3. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对长江中下游地区小白菜直播作业时,因土壤含水率波动大导致播种机后托板起垄种床厢面不平整的问题,提出了适应小白菜生长的犁耕开沟、旋耕碎土和主动辊压式起垄与平整结合的联合耕整作业方案,结合小白菜种床合理构建技术及大田旱作耕整作业要求,设计了一种小白菜复式播种机犁旋辊压驳岸型种床成型装置。根据土壤挤压和垄体曲面成型原理,分析了种床辊压成型的动力学原理,确定了起垄辊的主要结构和工作参数。田间起垄试验表明,整机作业速度为2.0~5.0 km/h,作业后垄体的垄高合格率、垄顶宽合格率和垄间距合格率分别为90.00%、93.33%和96.67%;双垄垄顶处的土壤坚实度稳定性系数均不低于92.36%,双垄垄壁处的土壤坚实度稳定性系数均不低于92.53%;垄顶厢面地表粗糙度的最大差值为2.19 mm。采用驳岸型种床装置垄播的小白菜单行苗数变异系数及各行苗数一致性变异系数均低于10%,满足小白菜直播农艺要求。

关键词: 小白菜; 种床; 起垄; 播种机; 辊压; 驳岸

中图分类号: S223.2⁺4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)11-0040-09 OSID: 

Design of Plow-rotary and Roll-forming Revetment Style Seed Bed Ridging Device of Combined Precision Seeder for *Brassica chinensis*

LIU Hai^{1,2} ZHANG Qingsong^{1,3} LIAO Yitao^{1,3} WEI Guoliang^{1,3} DU Zheng^{1,2} LIAO Qingxi^{1,3}

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

2. Wuhan Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430065, China

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

Abstract: In order to solve the problem of uneven seedbed surface caused by the fluctuation of soil moisture content during *Brassica chinensis* direct seeding in the Mid-lower Yangtze River, a combined soil preparation of plowing, rotary tillage, ridging and compaction was proposed to adapt to the growth of *Brassica chinensis*. By combining the cultivation technology of *Brassica chinensis* seedbed and field tillage operation requirements, a plow-rotary and roll-forming revetment style seed bed ridging device of combined precision seeder for *Brassica chinensis* was designed. According to the principle of soil compaction and ridge surface forming, the dynamics of seedbed roll forming was analyzed to determine the main structure and working parameters of the ridging roll. The results showed that the qualified rate of ridge height, ridge top width and ridge spacing were 90.00%, 93.33% and 96.67%, respectively, when the operating speed of the machine was 2.0~5.0 km/h. And the stability coefficient of soil firmness at the tops and sides of the double ridges were no less than 92.36% and 92.53%. The maximum difference in surface roughness of the ridge top surface was 2.19 mm. The variation coefficient single row seedling number and variation coefficient of each row seeding number were both less than 10% when the device was used to achieve precision sowing of *Brassica chinensis*. The operating effects met the agronomic requirements of *Brassica chinensis* direct seeding and provided reference for *Brassica chinensis* sowing mechanization on ridge.

Key words: *Brassica chinensis*; seedbed; ridging; seeder; rolling; revetment

收稿日期: 2020-11-23 修回日期: 2021-01-31
基金项目: 国家自然科学基金项目(51875229、32001427)、财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目和湖北省农业科技创新行动项目
作者简介: 刘海(1982—),男,博士生,主要从事农业装备设计与测控研究,E-mail: lh@whiam.cn
通信作者: 廖庆喜(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究,E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

0 引言

小白菜是长江中下游地区种植面积最大的叶类蔬菜^[1],该区域种植田块土壤黏重板结且雨量充沛,遇连续阴雨天气易遭受淹水胁迫,不利于小白菜种子出苗^[2-4],因此小白菜直播作业时要求构建适宜小白菜种子生长的种床^[5-6]。构建合理种床结构能增加土壤通透性,促进小白菜根系生长发育,减少小白菜渍害,提高小白菜种子成苗率,研制构建长江中下游地区小白菜合理种床的农机配套装置非常必要。

传统的小白菜直播前种床整理以人工为主,生产成本低、劳动强度大,制约着小白菜生产规模和经济效益。近年来,随着小白菜生产机械化水平的提高,人工开沟起垄作业逐渐被机械化作业所取代^[7-9],同步完成开沟起垄和直播作业的复式播种将成为趋势。小白菜复式播种机种床构建的关键部件为起垄装置,其垄体成型效果直接影响播种机的作业质量^[10]。

目前国内外众多研究机构和学者对农田开沟起垄技术进行了深入研究^[11-24]。现有种床成型装置主要适用于播种油菜、玉米、大豆等作物,且以被动挤压成型方式为主,其作业时土壤流动特性与长江中下游地区有一定差异^[25-26],而适应于辊压成型种床起垄装置的研究较少,因此有必要专门针对小白菜复式播种机型旋辊压驳岸型种床起垄技术进行深入研究。

小白菜直播对种床要求较高,若种床成型后土壤坚实度不高,会导致种床厢面分布土块松散,土块间的缝隙大、土壤水分蒸发过快,土壤墒情下降,严重影响小白菜成苗率,种床合理构建技术是小白菜复式播种机的关键技术之一。本文针对长江中下游地区小白菜种植模式的种床构建技术要求,结合传统种床整理工艺,以驳岸型垄体截面和垄沟截面组合挤压同步成型设计方式,设计犁旋辊压驳岸型种床成型装置,对样机开展田间试验以验证其性能,以期得到适宜南方黏重土壤条件下小白菜垄播的稳定垄体和垄沟。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

小白菜复式播种机型旋辊压驳岸型起垄装置主要包括前犁、主机架、传动部件、旋耕刀、破土整形部件、齿轮箱、包络整形弧板和起垄辊,其结构如图 1 所示。

1.2 工作原理

小白菜复式播种机型旋辊压驳岸型起垄装置触

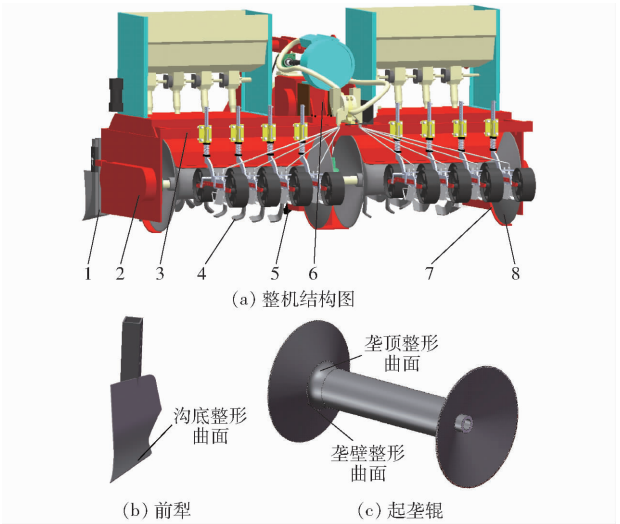


图 1 小白菜复式播种机结构示意图
Fig. 1 Structural diagrams of combined seeder for *Brassica chinensis*

- 1.前犁 2.传动部件 3.主机架 4.旋耕刀 5.破土整形部件
6.齿轮箱 7.包络整形弧板 8.起垄辊

土部件主要包含前犁、主机架、旋耕刀、包络整形弧板以及起垄辊,如图 2 所示。整机通过三点悬挂装置和拖拉机相连接,采用中间传动方式。作业时,拖拉机液压系统分配器手柄处于浮动位置,主机架两侧前犁破土、开沟、翻垡,初步形成垄沟;拖拉机旋转动力输出装置通过齿轮箱传递动力驱动左右刀辊和起垄辊旋转,由刀辊上的旋耕刀完成碎土及定向抛土作业;包络整形弧板随机组前进挤压土壤、平整沟底,同时起垄辊同步压实土壤平整垄壁及垄面,土壤在起垄装置作用下形成垄体。

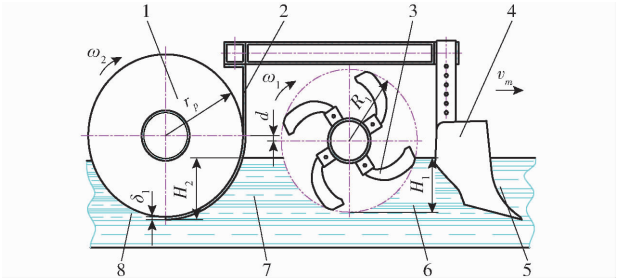


Fig. 2 Processing diagram of ditching and ridging device

- 1.起垄辊 2.包络整形弧板 3.旋耕刀 4.前犁 5.未耕区
6.破土区 7.旋耕区 8.压实区

1.3 主要技术参数

小白菜复式播种机型旋辊压驳岸型起垄装置一次作业行程后形成驳岸型双垄单沟,其主要技术参数如表 1 所示。

2 辊压起垄装置设计

驳岸能保证坡体不受冲刷,通常用于园林工程中保持土壤形状^[27]。为确保播种机作业后垄体不

表 1 旋耕起垄装置技术参数

Tab.1 Technical parameters of ridging device

参数	数值
配套动力/kW	≥60
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 600×2 400×1 300
旋耕深度/mm	120~220
垄数	2
播种行数	8
株距/mm	100~200
行距/mm	100~250
垄高/mm	218
垄顶宽/mm	800
垄底宽/mm	900
沟顶宽/mm	300
沟底宽/mm	200
工作效率/(hm ² ·h ⁻¹)	>0.3

因土壤坍塌而破坏种床,本文基于驳岸结构设计小白菜复式播种机犁旋辊压驳岸型种床起垄装置,作业后的小白菜种床垄体任意一垂直于水平面及前进方向的截面呈双倒驳岸断面,垄体断面如图 3 所示。图中 L 为整机作业幅宽,2 200 mm; L_1 为垄底宽,900 mm; L_2 为垄顶宽,800 mm; l_1 为沟顶宽,300 mm; l_2 为沟底宽,200 mm; S_2 为垄间距,1 100 mm。

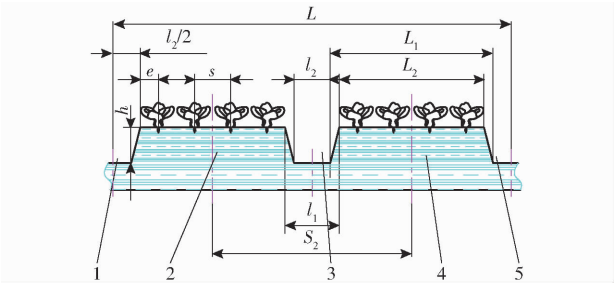


图 3 小白菜播种工艺方案示意图

Fig.3 Schematic of technology scheme for

Brassica chinensis seeding

1. 垄沟 I 2. 垄体 I 3. 垄沟 II 4. 垄体 II 5. 垄沟 III

小白菜复式播种机犁旋辊压驳岸型起垄装置的结构决定了播种机的开沟起垄性能。根据整机作业幅宽及小白菜播种工艺方案,以现有播种行数为基准,小白菜株行距计算式为

$$\begin{cases} L_1 = l_1 - l_2 + L_2 \\ L_2 = 3s + 2e \\ L = 2L_1 + 2l_2 = 2L_2 + 2l_1 \\ S_2 = L_1 + l_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 e ——边距,mm

s ——小白菜机播行距,mm

根据小白菜种植农艺要求^[28-29],小白菜的株行距范围为 100~150 mm。由开沟器结构参数,确定边距 e 的取值范围为 25~250 mm,代入式(1)计算

小白菜机播行距 s 取值范围为 100~250 mm。行距可根据驳岸型种床起垄装置尾部的开沟器横向位置调节,株距可根据排种器转速调节装置调节,株距可调范围为 100~200 mm,满足小白菜精量种植农艺要求。

2.1 起垄取土深度参数分析

小白菜复式播种机犁旋辊压驳岸型起垄装置起垄前需完成破土、开沟、导土、抛土工艺,主要作用是使碎土集中于起垄辊中部,以满足主动辊压起垄种床成型作业,其工作参数直接影响起垄效果,如图 4 所示。

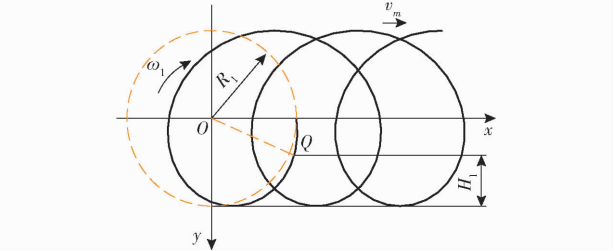


图 4 旋耕取土深度示意图

Fig.4 Schematic of tillage depth

以点 O 为旋耕刀回转中心, x 正向为机组前进方向,旋耕刀正转,整机作业时旋耕刀的运动轨迹为余摆线。以点 Q 为旋耕刀入土点,从最初入土到导土的过程中,为满足旋耕机正常工作条件,计算旋耕刀顶点运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x = R_1 \cos(\omega_1 t) + v_m t \\ y = R_1 - H_1 = R_1 \sin(\omega_1 t) \\ \omega_1 = 2\pi n \end{cases} \quad (2)$$

式中 R_1 ——旋耕刀回转半径

v_m ——机组前进速度,km/h

ω_1 ——旋耕刀辊回转角速度,rad/s

n ——旋耕刀轴转速,r/min

H_1 ——旋耕取土深度,mm

t ——时间,s

为满足起垄辊所需抛土量,旋耕刀端点的水平分速度的必要条件为 $v_x < 0$,根据式(2),可计算旋耕刀端点的绝对速度 v_0 和水平分速度 v_x 为

$$\begin{cases} v_0 = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \\ v_x = \frac{dx}{dt} = v_m - R_1 \omega \sin(\omega_1 t) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

联立式(2)和式(3),得

$$R_1 > H_1 + \frac{v_m}{\omega_1} \quad (4)$$

作业时,机组前进速度 v_m 为 2.0~5.0 km/h,旋耕刀轴转速 n 为 160~340 r/min,对应的旋耕刀辊回转角速度为 16.75~35.59 rad/s,为达到起垄条件

有 $H_1 > 0 \text{ mm}$ 。根据旋耕刀结构参数及其空间位置, 取 $R_1 = 270 \text{ mm}$, 代入式(4)可得 $H_1 < 193.87 \text{ mm}$, 根据整机结构取 $H_1 = 182 \text{ mm}$ 。

2.2 起垄辊设计

播种机作业过程中主要通过起垄辊圆筒和起垄辊圆盘辊压土壤, 使土壤被压实而形成垄体, 实现动态起垄。刚性起垄辊同时以转动角速度 ω_2 做回转运动、以速度 v_m 做直线运动与土壤相互作用时, 被压实土壤颗粒在挤压下由静态转为动态。土壤颗粒在刚性起垄辊挤压的作用下其颗粒之间的空隙及相对位置产生变化, 以相互填充的形式对垄壁、垄顶同时推挤夯实, 降低垄体接触面的粗糙度, 有效预防土壤颗粒回流导致垄体坍塌。起垄辊结构直接影响垄体的几何轮廓, 根据驳岸轮廓设计起垄辊结构, 如图 5 所示。

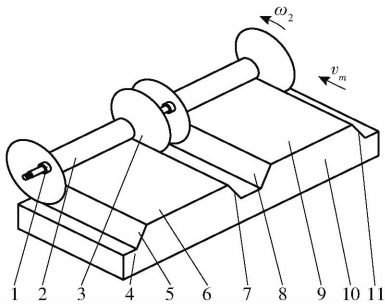


图 5 起垄原理图

Fig. 5 Schematic of ridging principle

- 1. 起垄辊转轴 2. 起垄辊圆筒 3. 起垄辊圆盘 4. 垄体 I
- 5. 垄左壁 I 6. 垄顶 I 7. 垄右壁 I 8. 垄左壁 II 9. 垄顶 II
- 10. 垄体 II 11. 垄右壁 II

根据弹性力学和土力学理论, 土壤受外力挤压产生的变形主要由垂直力引起。结合起垄辊结构的对称性确定起垄辊的结构参数和工作参数, 分析土壤运动规律时忽略土壤颗粒之间的相互作用力, 建立如图 6 所示的倒驳岸型垄体截面图, 开沟起垄作业中, 单位截面积内的土壤总量前后平衡。图中虚线部分表示垄体成型前对应的取土截面, A_1 为取土截面面积, m^2 ; A_2 为垄体 I 截面面积, m^2 ; A_3 为垄体 II 截面面积, m^2 。

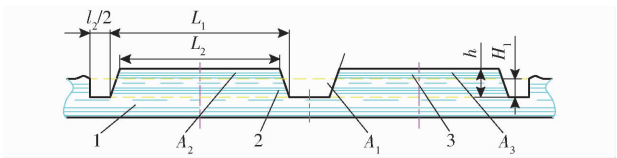


图 6 垄体截面示意图

Fig. 6 Schematic of ridge section

- 1. 未耕地 2. 起垄地 3. 垄体

因对称关系设垄体 I 截面面积 A_2 与垄体 II 截面面积 A_3 相等。在播种机实际作业过程中, 考虑到

土壤坚实度系数得垄体参数方程为

$$\begin{cases} kA_1 = A_2 + A_3 \\ A_1 = (2l_2 + 2L_1)H_1 \\ A_2 = (L_1 + L_2)h/2 \\ \tan\theta = \frac{2h}{L_1 - L_2} \end{cases} \quad (5)$$

式中 k ——土壤坚实度系数^[30], 取 0.9

θ ——起垄坡度, ($^\circ$)

h ——垄高, mm

根据小白菜垄播种模式, 将垄顶宽、垄底宽、沟顶宽等参数代入式(5), 求出 θ 、 h 、 A_1 、 A_2 和 A_3 分别为 76.73° 、 212 mm 、 0.4 m^2 、 0.18 m^2 和 0.18 m^2 。

2.3 起垄辊受力分析

小白菜复式播种机型旋压驳岸型起垄装置起垄辊为主动驱动, 土壤的相互作用为辊压方式, 其受力过程如图 7 所示。

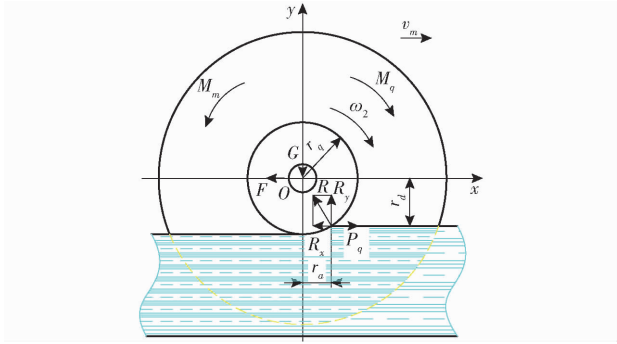


图 7 起垄辊圆筒受力分析图

Fig. 7 Force analysis diagram of ridging roll

当刚性驱动轮与土壤接触时, 起垄圆筒同时受负载 G 、水平力 F 和驱动扭矩 M_q 作用, 支承面上存在切向反力和法向反力作用。由此衍生了行走阻力 R_x 、土壤推力 P_q 及支承反力 R_y , 为使起垄辊稳定运动, 平衡方程为

$$\begin{cases} F + R_x = P_q \\ G = R_y \\ M_q + R_x r_d = M_m + P_q r_q + R_y r_a \end{cases} \quad (6)$$

式中 r_a ——垂直动力半径, mm

r_d ——水平动力半径, mm

M_m ——起垄辊内摩擦阻力力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$

r_q ——起垄辊圆筒半径, mm

考虑到起垄时的土壤坚实度系数^[31], 令 $r_d = r_q$, 则由式(6)可得

$$P_q = \frac{M_q}{r_q} + R_x - G - \frac{M_m}{r_q} \quad (7)$$

由式(7)可知, 土壤推力 P_q 不等于切线牵引力。因起垄辊为主动驱动型, 其支承面下端的绝对速度不为零, 且方向朝后, 因起垄辊随机组前进, 起垄辊

转动所前进的距离比计算距离小。根据文献[32]中对刚性接触面与土壤相互作用力的分析,最大法向反力的位置有随起垄辊圆筒滑转的增大而向后移动的趋势,切向反力则始终指向前方,这与上述分析结果基本一致。

2.4 包络整形弧板参数分析

包络整形弧板结构曲线如图 8 所示,其沿机组前进方向触土部分主要为 AB 段和 BC 段,支撑部分为 CD 段。工作时,整形弧板与起垄辊随机组前进,整形弧板通过滑压土壤形成规则沟底轮廓,ABC 段包络圆弧与起垄辊回转中心同心,AB 段根据整形弧板厚度与起垄辊参数确定,BC 段根据整形弧板与起垄辊的间隙确定,间隙太小导致土壤堵塞,影响种床平整度;间隙过大则导致整机结构尺寸过大,重心后移。

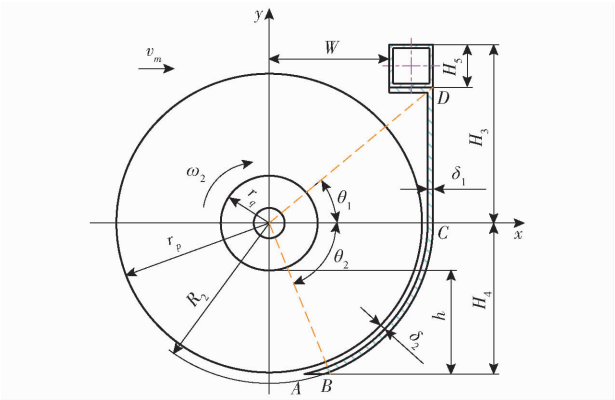


图 8 包络整形弧板曲线
Fig.8 Curve of envelope arc plate

包络整形弧板各参数之间的结构关系为

$$\begin{cases} H_4 = (r_p + \delta_2) \cos \theta_2 \\ W + H_2 = R_2 \\ R_2 = r_p + \delta_1 + \delta_2 \\ H_3 = R_2 \tan \theta_1 + H_5 \\ r_q + h = H_4 \end{cases} \quad (8)$$

式中 R_2 ——包络整形弧板触土面半径,mm
 r_p ——起垄辊圆盘半径,mm
 W ——起垄辊回转中心至方管水平距离,mm
 H_2 ——起垄深度,mm
 H_3 ——起垄辊回转中心至方管顶端高度,mm
 H_4 ——包络整形弧板 BC 段垂直高度,mm
 H_5 ——支架方管宽度,mm
 δ_1 ——包络整形弧板厚度,mm
 δ_2 ——包络整形弧板与起垄辊的间隙,mm
 θ_1 ——点 D 和点 C 到起垄辊回转中心的夹角, (°)
 θ_2 ——包络整形弧板 BC 段圆心角, (°)
为确保垄沟底部平整,令 $H_4 = r_p$,包络整形弧板

厚度取 $\delta_1 = 12\text{ mm}$,根据整机结构得知 $W = 230\text{ mm}$, $H_3 = 400\text{ mm}$, $H_5 = 80\text{ mm}$, $r_p = 280\text{ mm}$,代入式(8)得 $R_2 = 310\text{ mm}$, $H_4 = 280\text{ mm}$, $\delta_2 = 18\text{ mm}$, $\theta_1 = 46^\circ$, $\theta_2 = 70^\circ$, $r_q = 68\text{ mm}$ 。

2.5 起垄装置参数匹配

犁旋辊压驳岸型种床成型装置作业后,可实现种床成型和厢面平整,为满足小白菜垄播厢面平整的要求,犁旋辊压驳岸型种床成型装置起垄深度参数需要合理匹配,结合图 2 可得

$$d = R_1 + H_2 - H_1 - \delta_1 - r_p \quad (9)$$

式中 d ——起垄辊转轴与旋耕刀轴间的高度差,mm
根据起垄装置起垄条件有 $H_2 > H_1$,代入式(9),得

$$d < R_1 + \delta_1 - r_p \quad (10)$$

根据前述起垄成型装置参数,计算得起垄辊转轴与旋耕刀轴之间的高度差 d 为 22 mm。

3 起垄性能试验

3.1 试验方法

小白菜复式播种机犁旋辊压驳岸型起垄装置的工作质量主要与土壤状况、旋耕导土装置和起垄辊的结构参数有关。为确保作业效果达到设计的技术要求,2020 年 9 月 9 日于武汉市农业科学院农业机械化研究所蔬菜机械化展示区示范田开展田间开沟起垄性能试验,如图 9 所示。试验前需对田块特性进行测定,其特性参数见表 2。



图 9 起垄装置田间作业

Fig.9 Operation of ridging device in field

表 2 田块特性参数

Tab.2 Characteristics parameters of experimental field		
深度/mm	坚实度/kPa	含水率/%
0 ~ 100	216	17
100 ~ 200	482	20
200 ~ 300	647	25

田间试验的配套动力为东风井关 T954 型拖拉机,经预试验确定拖拉机液压手柄挡位与机具作业高度之间的关系,手油门调至最大挡位以保证机具作业参数一致。试验机组确保直线方向前进,作业距离为 30 m,作业速度分别为 2.0、3.5、5.0 km/h,测距雷达安装位置与地表垂直距离约为 0.8 m,扫描

采样频率设置为 70 Hz,角度分辨率设置为 0.881 2°,采样角度范围为 90°~180°。

3.2 试验设备与仪器

试验机具为华中农业大学自行研制的工作幅宽为 2 200 mm 的小白菜复式播种机。试验器材包括:卷尺(3 m)、直尺(500 mm)、土壤水分检测仪(浙江托普仪器有限公司,精度 0.01%)、土壤坚实度检测仪(浙江托普仪器有限公司,0.5% FS)、自制垄型测绘装置(图 10)和小白菜种子(中箕青 605)。

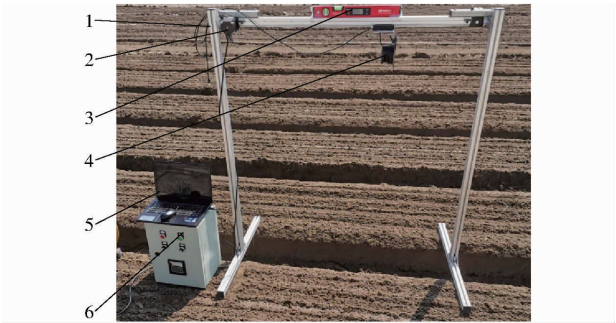


图 10 垄型测绘装置

Fig. 10 Mapping device for ridge section

1. 支撑架 2. 步进电机 3. 水平尺 4. 测距雷达 5. 便携式计算机 6. 控制箱

3.3 评价指标

3.3.1 土壤坚实度及稳定性系数评价指标

起垄装置作业后的垄体土壤坚实度是确保种床抵抗自然侵蚀而保持稳定的关键因素,影响小白菜种子的出苗率。根据试验方法,利用小白菜复式播种机犁旋辊压驳岸型起垄装置在未耕土壤区域进行开沟起垄作业,作业后立即测量垄体坚实度,沿机组前进方向每隔 4 m 进行垄体土壤坚实度测量,每一截面测量位置如图 11 所示。

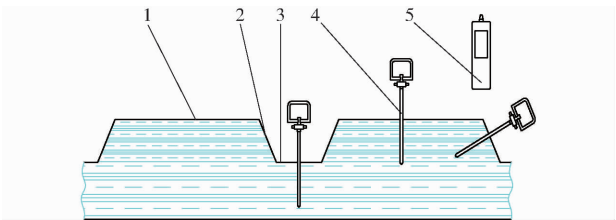


图 11 测定点示意图

Fig. 11 Diagram of measuring points

1. 垄顶 2. 垄壁 3. 沟底 4. 探头 5. 测定仪

依据标准 JB/T 8401.2—2017《旋耕联合作业机械 第 2 部分:旋耕深松灭茬起垄机》要求以垄体土壤坚实度、垄体土壤坚实度稳定性系数为评价指标^[33]。

3.3.2 垄高、垄顶宽及垄间距合格率评价指标

垄高、垄顶宽及垄间距合格率是衡量起垄质量的重要指标,本试验分别取垄高 h 为 212 mm,垄顶

宽 L_2 为 800 mm,垄间距 S_2 为 1 100 mm。作业后,基于自制垄型测绘装置所测定的数据,每个行程选取 5 个点,每点所测范围为一个工作幅宽,分别以垄高、垄顶宽以及垄间距在农艺要求的 -30~30 mm 范围内为合格,合格的垄体参数占对应的总数百分比为垄体参数合格率。

3.3.3 垄顶厢面粗糙度评价指标

小白菜种子属于小粒径种子范畴,机播时要求良好的种床,有利于控制播深以确保成苗率。而地表过度粗糙则不利于控制播深,因此小白菜直播作业所形成的垄顶粗糙度可用均方根高(RMSH)表征。由于垄顶厢面空间上的高度差异性,影响计算区域尺度,为探究不同尺度间厢面粗糙度的变化规律,可通过多次采样局部地表高度数据,以此分析厢面粗糙度的局部变化特征。

3.3.4 各行平均苗数及单行苗数变异系数评价指标

种床构建垄体的好坏直接影响小白菜播种均匀性及出苗率。整机作业 35 d 后,双垄各行测 5 段,每一段截取 1 m 范围内的小白菜苗数^[34],通过测定每行苗数、单行苗数变异系数以及各行苗数一致性变异系数以验证小白菜复式播种机犁旋辊压驳岸型种床起垄装置的综合性能。

3.4 试验结果与分析

基于垄型测绘装置测量数据,进行误差补偿处理及有效区域提取,导入 Matlab 软件所得三维数字化模型如图 12 所示。从图中可看出,在该采样频率下测量数据生成的三维数字化模型可以较好地重构原有垄体轮廓和构型特征,结果与实际地表地貌高度吻合,单次测量区域精确覆盖了完整的起垄区域,为进一步评价起垄装置的结构特征提供了准确的数据。

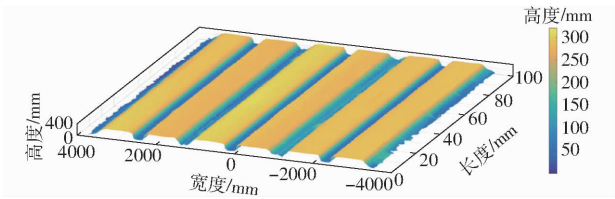


图 12 垄体垄沟三维数字化模型

Fig. 12 Three-dimensional digital models of soil surface

3.4.1 土壤坚实度测量与分析

土壤坚实度是体现垄体土壤强度的一个重要指标,土壤坚实度过小会影响小白菜垄播种床的稳定性。在长江中下游土壤黏重板结的条件下,由于垄壁坍塌导致垄顶宽不稳定,小白菜垄播时会因种床带破坏而降低成苗率。整机前进速度是影响垄体坚实度的重要因素,不同作业速度条件下的垄体坚实度测定结果见表 3。

表 3 田间作业后的土壤坚实度测定结果

Tab.3 Performance test results of soil firmness after field operation

作业速度/ (km·h ⁻¹)	测量 深度/ mm	垄体 I						垄体 II					
		垄左壁 I		垄顶 I		垄右壁 I		垄左壁 II		垄顶 II		垄右壁 II	
		均值/ kPa	稳定性 系数/%	均值/ kPa	稳定性 系数/%	均值/ kPa	稳定性 系数/%	均值/ kPa	稳定性 系数/%	均值/ kPa	稳定性 系数/%	均值/ kPa	稳定性 系数/%
2.0	0 ~ 100	225	97.20	238	97.10	227	96.53	227	95.30	223	95.73	219	96.62
	100 ~ 200	547	97.75	557	97.46	535	96.56	522	96.96	522	95.16	520	97.41
	200 ~ 300	938	97.33	1 308	97.59	922	96.47	903	95.74	1 315	96.36	924	96.32
3.5	0 ~ 100	215	95.02	236	95.54	218	95.47	223	94.44	225	97.20	219	95.52
	100 ~ 200	520	96.62	544	94.21	518	95.60	517	95.07	543	94.73	523	95.53
	200 ~ 300	847	96.81	1 269	95.47	910	95.21	880	95.06	1 220	95.84	895	94.86
5.0	0 ~ 100	230	94.95	240	92.36	220	94.15	224	92.53	243	93.77	230	95.29
	100 ~ 200	530	92.96	539	95.81	522	94.27	529	94.98	540	94.88	487	93.66
	200 ~ 300	921	94.92	1 323	94.81	884	94.22	906	94.15	1 283	94.33	880	94.20

根据表 3 可知,作业后的垄体土壤坚实度平均值随测量深度的增加而增大,垄体土壤坚实度稳定性系数相对平稳。其中垄顶坚实度平均值在各深度均高于垄壁坚实度,由于起垄过程中垄壁主要由起垄辊圆盘压实土壤,而垄顶主要由起垄辊圆筒压实土壤,由于旋耕刀定向抛土至垄顶处,叠加压实土量增大了对土壤的碾压力,从而增大了垄顶处的土壤坚实度。不同作业速度下相同测量深度的稳定性基本一致,双垄垄顶处土壤坚实度均值范围为 223 ~ 1 323 kPa,土壤坚实度稳定性系数均不低于 92.36%;双垄垄壁处的土壤坚实度均值范围为 215 ~ 938 kPa,土壤坚实度稳定性系数均不低于 92.53%,适合小白菜复式播种机垄播作业。

3.4.2 垄高、垄顶宽及垄间距合格率分析

根据前述标准要求,以垄高合格率、垄顶宽合格率以及垄间距合格率为起垄质量评价指标进行计算,测定结果见表 4。

表 4 垄高、垄顶宽及垄间距			
Tab.4 Height, top width and spacing of ridges			
参数	测量值/mm	标准值/mm	合格率/%
垄高	206.8	212	90.00
垄顶宽	808.0	800	93.33
垄间距	1 099.9	1 100	96.67

根据试验结果可知,小白菜复式播种机犁旋辊压驳岸型种床成型装置起垄质量良好,垄体一致性好,作业后的垄体的垄高合格率、垄顶宽合格率和垄间距合格率分别为 90.00%、93.33% 和 96.67%。

3.4.3 垄顶厢面粗糙度分析

传统的厢面粗糙度统计一般限于厢面宽度方向,无法全面地反映地表粗糙度状态,而小白菜直播作业后的种床由于受到开沟器的作用而形成沿作业

方向分布的种沟痕迹,此痕迹主要受地表非规则的微起伏影响。为更真实反映起垄后垄顶厢面高度分布的特征,取一垂直机组作业方向截面,且沿机组作业方向选取 5 m 长垄体,每隔 10 mm 扫描一次,每 1 m 为 1 组拼接而成,以前述采样频率扫描截面轮廓高度,按小白菜种植行数所形成的垄顶厢面各行地表轮廓如图 13 所示。由图中可知,种床各行小白菜粗糙度表现为均匀分布的特征,其同行内没有明显的高度变化,各行之间略有不同,与实际作业相吻合。

表 5 为小白菜精量复式播种机作业后不同行的垄顶厢面地表粗糙度,从表中可得知机组作业方向不同行的最大差值为 2.19 mm。对作业后垄体地表粗糙度的标准差进行统计发现,均方根高度标准差较小。

3.4.4 各行平均苗数及单行苗数变异系数分析

根据原测定数据可得小白菜的各行平均苗数及单行苗数变异系数,如图 14 所示。

由图 14 可知,小白菜各行的平均苗数及其变异系数均属于合理范围。其中,小白菜各行 1 m 内平均苗数为 10,单行苗数变异系数为 6.32% ~ 8.51%,各行苗数一致性变异系数为 9.05%,满足农业实际生产中小白菜精量机播要求。

综合田间作业性能对比可知,小白菜复式播种机犁旋辊压驳岸型种床起垄装置作业的性能优于 JB/T 8401.2—2017《旋耕联合作业机械 第 2 部分:旋耕深松灭茬起垄机》的质量要求。

4 结论

(1)对种床成型装置的关键部件进行了设计与分析,根据起垄辊运动模型,确定了单个垄体截面面积为 0.18 m²,垄体高度为 212 mm,机组前进

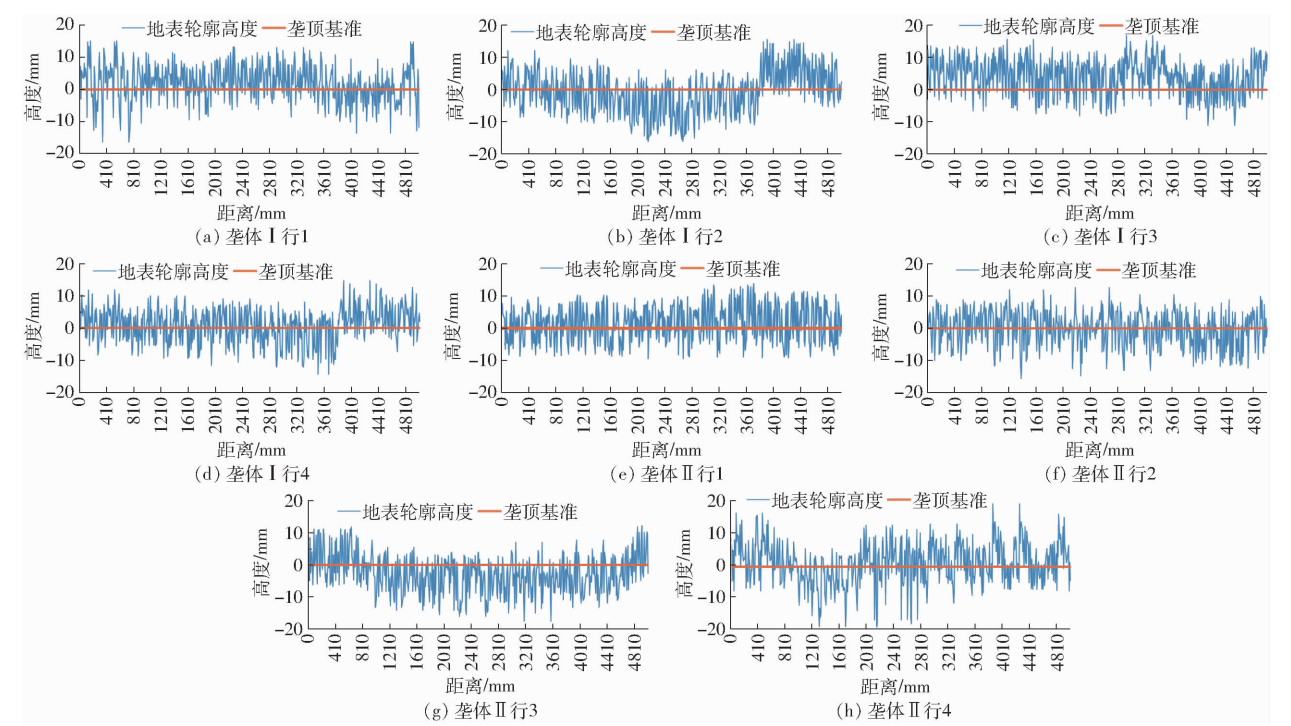


图 13 垄顶厢面各行地表轮廓
Fig. 13 Surface contours of ridges in different rows

表 5 不同行的垄顶厢面地表粗糙度均方根高度
Tab. 5 Root mean square height of ridge surface

roughness in different rows								mm
试验组	垄体 I				垄体 II			
	行 1	行 2	行 3	行 4	行 1	行 2	行 3	行 4
1	7.08	5.57	5.18	4.99	5.09	5.37	5.94	5.95
2	4.89	5.91	6.29	5.30	5.68	6.05	5.40	6.27
3	4.96	6.54	6.09	5.66	5.18	5.44	5.87	7.74
4	5.50	6.69	5.45	6.16	6.28	5.55	5.33	6.11
5	5.82	5.53	6.15	4.81	6.32	5.90	6.13	6.18

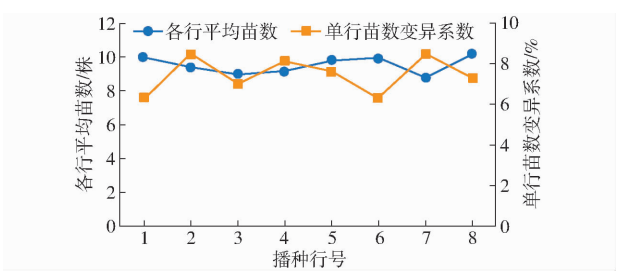


图 14 平均苗数及其变异系数变化曲线
Fig. 14 Curves of mean value and variation coefficient

速度为 2.0 ~ 5.0 km/h, 旋耕刀轴转速为 160 ~ 340 r/min, 起垄取土高度为 182 mm, 犁旋压驳

岸型种床成型装置以联合作业方式提高了整机起垄的通用性。

(2) 垄体土壤稳定性分析结果表明, 垄体土壤坚实度平均值随测量深度的增加而增大。双垄垄顶处的土壤坚实度稳定性系数均不低于 92.36%, 双垄垄壁处的土壤坚实度稳定性系数均不低于 92.53%, 起垄作业满足起垄农艺要求。

(3) 田间性能试验表明, 犁旋压驳岸型种床成型装置作业后的垄体的垄高合格率、垄顶宽合格率和垄间距合格率分别为 90.00%、93.33% 和 96.67%。采用相同采样间隔的垄顶厢面粗糙度统计结果表明, 机组作业方向不同行的最大差值为 2.19 mm, 同一行内的小白菜种床厢面粗糙度无明显差异。

(4) 田间播种试验表明, 采用犁旋压驳岸型种床起垄装置作业形成的种床效果较好, 小白菜各行 1 m 内平均苗数为 10, 单行苗数变异系数为 6.32% ~ 8.51%, 各行苗数一致性变异系数为 9.05%, 满足农业实际生产中小白菜精量机播要求。

参 考 文 献

[1] 别之龙. 长江流域冬季蔬菜栽培技术[M]. 上海: 金盾出版社, 2009.

[2] 廖庆喜, 雷小龙, 廖宜涛, 等. 油菜精量播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 1-16. LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1-16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170901&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.001. (in Chinese)

[3] 谷晓博, 李援农, 周昌明, 等. 垄沟集雨补灌对冬油菜根系、产量与水分利用效率的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 90-98, 112.

- GU Xiaobo, LI Yuannong, ZHOU Changming, et al. Effects of ridge and furrow rain harvesting cultivation with supplemental irrigation on root, yield and water use efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 90–98, 112. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160413&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.013. (in Chinese)
- [4] WANG Dongyan, GUO Liping, LEI Zheng, et al. Effects of nitrogen fertilizer and water management practices on nitrogen leaching from a typical open field used for vegetable planting in northern China[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 913–921.
- [5] 廖宜涛, 高丽萍, 廖庆喜, 等. 油菜精量联合直播机深施肥装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 65–75. LIAO Yitao, GAO Liping, LIAO Qingxi, et al. Design and test of side deep fertilizing device of combined precision rapeseed seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 65–75. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2002008&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.008. (in Chinese)
- [6] 刘晓鹏, 肖文立, 马磊, 等. 油菜联合直播机组合式船型开沟器设计与开沟质量试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 79–87. LIU Xiaopeng, XIAO Wenli, MA Lei, et al. Design and ditching quality experiment on combined ship type opener of direct rapeseed seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 79–87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171110&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.010. (in Chinese)
- [7] 林静, 张桐嘉, 陈彬, 等. 深松灭茬旋耕起垄联合作业机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 28–39. LIN Jing, ZHANG Tongjia, CHEN Bin, et al. Design and test of subsoiling rotary rilling and rilling combined operating machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 28–39. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190204&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.004. (in Chinese)
- [8] 付乾坤, 荐世春, 贾洪雷, 等. 玉米灭茬起垄施肥播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4): 9–16. FU Qiankun, JIAN Shichun, JIA Honglei, et al. Design and experiment on maize stubble cleaning fertilization ridging seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(4): 9–16. (in Chinese)
- [9] 孙伟, 刘小龙, 张华, 等. 马铃薯施肥播种起垄全膜覆盖种行覆土一体机设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(20): 14–22. SUN Wei, LIU Xiaolong, ZHANG Hua, et al. Design of potato casingsoil planter in all-in-one machine combined with fertilizing, sowing, ridging, complete film mulching and planting line covering[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20): 14–22. (in Chinese)
- [10] LI Xiaoyan, GONG Jiadong. Effects of different ridge: furrow ratios and supplemental irrigation on crop production in ridge and furrow rainfall harvesting system with mulches[J]. Agricultural Water Management, 2002, 54(3): 243–254.
- [11] 王方艳, 杨亮, 鲍余峰, 等. 气吸式胡萝卜起垄播种一体机研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(17): 35–45. WANG Fangyan, YANG Liang, BAO Yufeng, et al. Development of air-suction ridging and seeding machine for carrot[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(17): 35–45. (in Chinese)
- [12] SASAKI C M, GONÇALVES J M, SILVA Á D. Ideal subsoiling moisture content of Latosols used in forest plantations[J]. Forest Ecology and Management, 2007, 243(1): 75–82.
- [13] WU J, XIAO K, ZHAO C, et al. Ridge-furrow cropping of maize reduces soil carbon emissions and enhances carbon use efficiency[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2018, 256: 153–162.
- [14] SOLHJOU A, FIELKE J M, DESBIOLLES J A, et al. Soil translocation by narrow openers with various bent leg geometries [J]. Biosystems Engineering, 2014, 127: 41–49.
- [15] JEBUR H A, HIMOUD M S. Evaluating the performance of dual disk ridge[J]. Plant Archives, 2018, 18(2): 1285–1290.
- [16] GUO S, JIANG R, QU H, et al. Fate and transport of urea-N in a rain-fed ridge-furrow crop system with plastic mulch[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 186: 214–223.
- [17] 何进, 李洪文, 王庆杰, 等. 动力甩刀式小麦固定垄免耕播种机[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 51–55, 67. HE Jin, LI Hongwen, WANG Qingjie, et al. Powered hammering blade no-till wheat seeder for permanent raised beds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 51–55, 67. (in Chinese)
- [18] 王金峰, 林南南, 王金武, 等. 单侧筑埂机镇压筑埂装置工作动力学参数测试与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 81–86, 104. WANG Jinfeng, LIN Nannan, WANG Jinwu, et al. Design and experiment on working dynamics parameters of single-side ridger[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 81–86, 104. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170808&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.008. (in Chinese)
- [19] 林静, 钱巍, 李宝筏, 等. 2BG-2型玉米垄作免耕播种机播种深度数学模型的仿真与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 19–24. LIN Jing, QIAN Wei, LI Baofa, et al. Simulation and validation of seeding depth mathematical model of 2BG-2 type corn ridge planting no-till planter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 19–24. (in Chinese)
- [20] JIA Honglei, WANG Wenjun, LUO Xiaofeng, et al. Effects of profiling elastic press roller on seedbed properties and soybean emergence under double row ridge cultivation[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 162: 34–40.
- [21] 包攀峰, 吴明亮, 官春云, 等. 犁旋组合式油菜播种开沟起垄装置设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(20): 23–31. BAO Panfeng, WU Mingliang, GUAN Chunyun, et al. Design of plow-rotary style ditching and ridging device for rapeseed seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20): 23–31. (in Chinese)
- [22] 王金武, 唐汉, 王金峰, 等. 1DSZ-350型悬挂式水田单侧旋耕镇压修筑埂机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 25–37. WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng, et al. Design and experiment on 1DSZ-350 type hanging unilateral rotary tillage compacting ridger for paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 25–37. (in Chinese)

- discrete element method[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences Edition), 2019, 45(5): 548–553. (in Chinese)
- [20] 曹艳文. 基于离散元法的螺旋式排肥器仿真分析与试验研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2017.
CAO Yanwen. Simulation analysis and experimental study of screw fertilizer distributor based on EDEM[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [21] 赵亮. 基于离散元的芒果施肥机螺旋式排肥器仿真与试验[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
ZHAO Liang. Simulation and test of screw fertilizer sprinkler of mango fertilizer based on discrete element[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [22] JUSTIN W F, PAUL W C, WILLIAM M. Effect of screw design on hopper drawdown of spherical particles in a horizontal screw feeder[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(22): 5585–5601.
- [23] ROBERTS A W. The influence of granular vortex motion on the volumetric performance of enclosed screw conveyors[J]. Powder Technology, 1999, 104(1): 56–67.
- [24] GUILHEM D, PIERRE-ANDRE G, NICOLAS D, et al. Computational fluid dynamics modeling for the design of Archimedes screw generator[J]. Renewable Energy, 2018, 118: 847–857.
- [25] 雷小龙, 李蒙良, 张黎骅, 等. 颗粒化肥水平气送式螺旋组合可调定量供肥装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 9–18.
LEI Xiaolong, LI Mengliang, ZHANG Lihua, et al. Design and experiment of horizontal pneumatic screw combination adjustable quantitative fertilizer feeding device for granular fertilizer[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(19): 9–18. (in Chinese)
- [26] 洪致育, 林良明. 连续运输机[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [27] NY/T 1003—2006 施肥机械质量评价技术规范[S]. 2006.
- [28] 石云飞, 张西良, 徐云峰, 等. 加料机单、双头螺旋对颗粒群接触力的影响[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2019, 40(1): 76–81.
SHI Yunfei, ZHANG Xiliang, XU Yunfeng, et al. Effect of single/double screw feeder on contact force of particles[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2019, 40(1): 76–81. (in Chinese)
- [29] 杨庆璐, 李子涵, 李洪文, 等. 基于 CFD-DEM 的集排式分肥装置颗粒运动数值分析[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 81–89.
YANG Qinglu, LI Zihan, LI Hongwen, et al. Numerical analysis of particle motion in pneumatic centralized fertilizer distribution device based on CFD-DEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 81–89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190809&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.009. (in Chinese)
-
- (上接第 48 页)
- [23] 张仕林, 赵武云, 戴飞, 等. 全膜双垄沟起垄覆膜机镇压作业过程仿真分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 20–30.
ZHANG Shilin, ZHAO Wuyun, DAI Fei, et al. Simulation analysis and test on suppression operation process of ridging and film covering machine with full-film double-furrow[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1): 20–30. (in Chinese)
- [24] 戴飞, 宋学锋, 赵武云, 等. 微垄式覆膜覆土联合作业机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 97–105, 129.
DAI Fei, SONG Xuefeng, ZHAO Wuyun, et al. Design and experiment of operation machine for filming and covering soil on tiny ridges[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 97–105, 129. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200311&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.011. (in Chinese)
- [25] 刘宏俊, 赵淑红, 谭贺文, 等. 基于刮削与振动原理的减粘降阻镇压装置研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 86–92.
LIU Hongjun, ZHAO Shuhong, TAN Hewen, et al. Investigation on press device in reducing adhesion and resistance based on scrape and vibration principle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 86–92. (in Chinese)
- [26] JIA Q, CHEN K, CHEN Y, et al. Mulch covered ridges affect grain yield of maize through regulating root growth and root-bleeding sap under simulated rainfall conditions[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 175: 101–111.
- [27] 张付根, 薛金国, 尤扬. 城市园林设计[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008.
- [28] 张晓伟, 蒋武生, 原玉香. 白菜甘蓝优质高效栽培技术[M]. 郑州: 中原农民出版社, 2008.
- [29] 车艳芳, 杨英茹. 白菜萝卜辣椒种植技术[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2014.
- [30] 王金峰, 王金武, 孔彦军, 等. 悬挂式水田筑埂机及其关键部件研制与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 28–34.
WANG Jinfeng, WANG Jinwu, KONG Yanjun, et al. Development and experiment of suspension ridger and its key components for paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(6): 28–34. (in Chinese)
- [31] 孙一源. 农业土壤力学[M]. 北京: 农业出版社, 1985.
- [32] SAHIN M, HABIB K. Design and development of an electronic drive and control system for micro-granular fertilizer metering unit[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 921–930.
- [33] 秦宽, 丁为方, 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)
- [34] 杨松, 廖庆喜, 陈立, 等. 2BFQ-6 型油菜精量联合直播机播种油菜的田间植株分布规律[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 23–28.
YANG Song, LIAO Qingxi, CHEN Li, et al. Distribution of rapeseed sowed by 2BFQ-6 precision planter[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 23–28. (in Chinese)