

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.01.006

# 大豆垄三栽培配套播种机种床整理装置设计与试验

陈海涛 张昭 王星 王业成 纪文义 薛东辉

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 针对大豆垄三栽培模式下播种机施肥开沟器土壤扰动影响种-肥、种-种的空间配置关系问题,设计了一种双锥环型种床整理装置。通过理论分析确定在典型东北黑壤土、含水率 20% 和仿形机构下拉弹簧刚度 4.48 N/mm 条件下,双锥环型种床整理装置关键结构参数取值范围;应用三因素三水平正交试验方法,以作业速度、收土整形环母线长度和仿形下拉弹簧预伸长量为试验因素,选择种床平整度、垄顶 5 cm 深度土壤坚实度变异系数、播种深度变异系数、种子横向偏移离散度和种肥间距合格率为评价指标,实施关键结构和运用参数组合优化试验及田间对比试验,结果表明:当作业速度小于等于 14.4 km/h、弹簧预伸长量为 90 mm、收土整形环母线长度为 42 mm 时,增设该种床整理装置的播种单体可以实现种床平整度达 6.22 mm、垄顶 5 cm 深度土壤坚实度变异系数达 17.39%、播种深度变异系数达 13.74%、种子横向偏移离散度 7.65%、种肥间距合格率达 87.86%,较未设置种床整理装置播种单体的播种深度一致性和种肥间距合格率分别提高 19.71% 和 24.26%,种子横向偏移离散度降低 44.02%。研究结果为大豆垄三栽培配套高速精量播种机的研究提供了参考。

**关键词:** 播种机; 大豆垄三栽培; 种床整理; 土壤强制回填; 正交试验

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)01-0054-10

OSID:



## Design and Experiment of Seedbed Perfect Device for “Three – Soybean” Cultivation Mode Matching Seeder

CHEN Haitao ZHANG Zhao WANG Xing WANG Yecheng JI Wenyi XUE Donghui  
(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** Soybean cultivation in Northeast China adopts the cultivation mode of sowing double lines on the raised-bed and deep fertilization in the middle, called “three-soybean” in raised-bed. In order to solve the problem that the soil disturbance of fertilizer-opener affects the spatial position of seed-fertilizer and seed-seed under the “three-soybean” cultivation in raised-bed mode, a type of seedbed perfect devices was designed. Through theoretical analysis, the range of the key structural parameters of the double collecting ring type seedbed perfect device was determined under the conditions of typical northeast black loam, 20% moisture content and 4.48 N/mm pull down spring stiffness of the profiling mechanism. Using the three factor and three level orthogonal experiment method, taking the operation speed, the length of the generatrix of the soil collecting ring and the pre elongation of the profiling pull-down spring as the experiment factors, and the seedbed flatness, the coefficient of variation of the soil firmness at depth of 5 cm at raised-bed top, the coefficient of variation of the sowing depth, the dispersion of the seed and the qualified rate of the spacing between the seed and fertilizer as the evaluation indicators, the optimization experiment of the key structure and the application parameters was carried out. The results showed that when the operating speed was less than or equal to 14.4 km/h, the pre-elongation of the spring was 90 mm, and the length of the generatrix of the soil collecting ring was 42 mm, the seeding-unit added with the seedbed perfect device could achieve a seedbed flatness of 6.22 mm, a variation coefficient of soil solidity of 5 cm depth at the raised-bed top of 17.39%, a variation coefficient of seeding depth of 13.74%, a dispersion degree of seed lateral displacement of 7.65%, and the qualified rate of the spacing between the seed and fertilizer of 87.86%. Compared with those without

收稿日期: 2022-10-20 修回日期: 2022-11-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000401)、财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-04)和黑龙江省“百千万”工程科技重大专项支撑行动计划项目(2020ZX17B01-2)

作者简介: 陈海涛(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械化技术和生物质材料技术与装备研究,E-mail: htchen@neau.edu.cn

seed-bed perfect device, the qualification rate of sowing depth consistency and seed and fertilizer spacing of seeding-unit were increased by 19.71% and 24.26%, respectively, and the seed lateral offset dispersion was decreased by 44.02%. The results provided a reference for the research and development of high-speed precision seeder for “three – soybean” cultivation in raised-bed.

**Key words:** seeder planter; “three – soybean” cultivation in raised-bed; seedbed perfect; forced soil backfilling; orthogonal experiment

## 0 引言

大豆垄三栽培具有“垄上双条等距精播、垄体内分层施肥、垄下深松”的立体栽培特点,其增产增收效果显著<sup>[1-5]</sup>。大豆分层施肥是指大豆播种机在播前一次性条状施入种肥,种肥位置在两行种子间,种子下方 3 ~ 5 cm 处,为大豆前期生长提供养分<sup>[6-7]</sup>。垄三栽培配套播种机常采用前侧施肥、后侧开沟播种的结构方案,施肥开沟器在完成施肥作业的过程中必将对土壤产生不同程度扰动效应,受扰动土壤溢向垄顶中心面两侧,导致种床平整度下降,进而影响所投放的种-肥、种-种分布的精确性,并且这一现象会随着作业速度的提高而变得更为显著。

良好的种床环境是作物生长的基础,土壤扰动造成散墒、种沟构建质量差、种子偏移量增加等多种问题<sup>[8-15]</sup>。针对种床结构破坏的问题,刘晓东等<sup>[16]</sup>设计了一种油菜分层施肥开沟器,可通过后方土壤回填机构提高施肥深度稳定性与施肥间距。史乃煜等<sup>[17]</sup>针对东北黑土地黏重土壤自然回填能力差的问题,基于最速降线原理设计了一种强制回土装置,增加施肥铲抛撒土壤的回填量,该装置具有所抛出土壤量自适应调节机构,不易堵塞。白璐等<sup>[18]</sup>设计了一种双圆盘种肥分施装置,该装置能同时完成种肥覆盖及种子覆土。部分学者研究了土壤与开沟部件之间相互作用关系以及土壤扰动规律。吕金庆等<sup>[19]</sup>建立了土壤在开沟器上的运动规律以及土壤回流过程中的运动模型,为开沟装置的应用与设计提供了参考。BARR 等<sup>[20]</sup>研究了不同作业速度下开沟器的土壤扰动和耕作阻力,并提出一种弯角补偿式开沟器,可显著降低其对土壤的扰动。同时,BARR 等<sup>[20-21]</sup>以土壤的蓬松度、抛撒距离、土层混合为评价指标,研究了不同开沟器倾角对土壤的扰动规律。仿生方法可以明显降低土壤耕作部件的作业阻力与土壤扰动。孟凡豪<sup>[22]</sup>设计了一种仿生狗獾犬齿滑动式开沟装置,利用图像处理的方法比较得出所设计开沟器能有效减少土壤扰动。刘进宝等<sup>[23]</sup>基于蜣螂头部角状突起曲线设计了一种分层施肥开沟器,相较于传统施肥开沟器,提高了种床平整度,有利于保障后续播种质量。众多学者的研究

主要是对开沟装置结构的改进优化,但对施肥开沟器改变种床结构影响种-肥、种-种配置关系的研究未见报道。

本文针对大豆垄三栽培施肥开沟器作业时扰动土壤导致破坏垄顶种床结构,特别是在东北地区重黏土等流动性较差的农田播种作业时,土壤回填量少,影响种-肥、种-种之间配置关系的问题,设计一种具有仿形功能的种床整理装置,应用理论分析和田间正交试验方法,优化关键参数组合,为大豆垄三栽培配套高速播种机研究提供参考依据。

## 1 结构组成与工作原理

图 1 为设有双锥环型种床整理装置的大豆垄三栽培播种单体和双锥环型种床整理装置结构示意图。设有双锥环型种床整理装置播种单体如图 1a 所示,主要由施肥开沟器、平行四杆仿形机构、种床整理装置总成、种子开沟器、排种器、覆土装置和镇压装置组成;双锥环型种床整理装置结构如图 1b 所示,主要由位置调节机构、清土机构、支撑板、平整辊、收土整形环等组成,平整辊由无缝钢管制得,两端均焊合支撑板与收土整形环。双锥环型种床整理装置通过位置调节机构与平行四杆仿形机构后联接板固连,其纵向对称面与平行四杆机构的纵向对称面重合,平整辊同时兼做播种单体的前仿形轮。

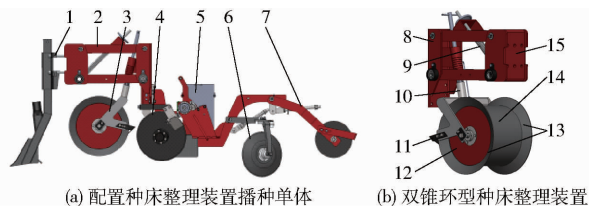


图 1 设有种床整理装置的播种单体结构示意图

Fig.1 Structure diagrams of seeder-unit with seedbed perfect device

1. 施肥开沟器 2. 平行四杆仿形机构 3. 种床整理装置总成
4. 种子开沟器 5. 排种器 6. 覆土装置 7. 镇压装置 8. 后联接板
9. 仿形下拉弹簧 10. 位置调节机构 11. 清土装置 12. 支撑板
13. 收土整形环 14. 平整辊 15. 前联接板

双锥环型种床整理装置收土整形作业原理如图 2 所示。工作时,施肥开沟器开施肥沟扰动土壤形成 V 形沟槽,颗粒肥从施肥装置的出肥口流出落到沟槽中,施肥过程中 V 形沟槽的壁面土壤不稳定向下

流动,覆盖颗粒肥。施肥开沟器作业过程中受扰动溢流土壤将落到垄顶与垄帮处,土壤稳定后形成的种床形状呈M形,作业速度越高则土壤扰动效应越强。整理装置在播种单体重力和弹簧力的综合作用下与土壤紧密接触,收土整形环对抛撒到垄帮的土壤施加向内侧的挤压力使土壤向沟槽方向移动回填,强制增加土壤回填量,提高种床平整度和坚实度。

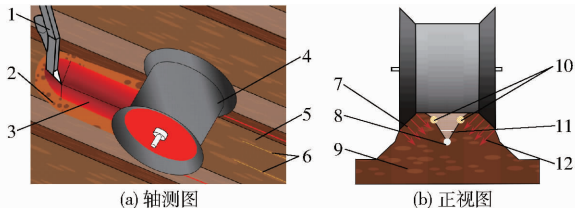


图2 种床整理装置作业原理图

Fig. 2 Principle diagrams of seedbed perfect device

1. 施肥开沟器 2. 扰动土壤区域 3. 沟槽 4. 种床整理装置
5. 整理后种床 6. 种沟构建位置 7. 溢流土壤 8. 落肥点
9. 垄台 10. 垄上双行大豆落种点 11. 沟槽回填区域 12. 土壤运移方向

## 2 种床整理装置设计

种床整理装置核心部件是平整辊和收土整形环,尺寸设计的合理性影响种床平整效果,因此需对其进行合理分析与设计。

### 2.1 平整辊

平整辊主要参数为直径和长度,直径对工作质量有显著影响,平整辊直径过小,受播种单体施加载荷作用对地面压应力增大,其下陷量增加,易出现前方壅土现象,滑移率升高,种床整理效果与仿形限深的效果变差,种床结构被进一步破坏,播种深度一致性降低;其直径大则滑移率降低,限深仿形效果提升,但直径过大会使单体长度和联结高度增加,影响播种机纵向稳定性和机动性。根据前人研究结果,田间工作地轮直径一般为200~500 mm<sup>[25]</sup>,本文采用直径273 mm的无缝钢管制作平整辊。

种床整理装置的收土整形环安装在平整辊的两侧,对施肥开沟器作业后形成的M形种床两侧土壤向内部挤压,因此收土整形环所处位置与平整辊的长度相关。平整辊长度过小会使得收土整形环工作区域在开沟器工作区域内,整理后种床宽度不能满足开沟器所需工作宽度,无法为开沟器提供良好的作业环境,对沟型产生负面影响。平整辊过长,收土整形环横向位置超出溢流土壤范围,收土整形环起不到收土作用,平整辊只能将垄顶溢流土壤压实,沟槽处的土壤坚实度低,开沟器开沟后内沟壁土壤易回流影响播深。根据东北地区垄上双行大豆播种间

距为100~150 mm,及东北地区60~70 cm标准垄垄顶宽约为200 mm<sup>[26-27]</sup>,考虑土壤溢流量,本文设计平整辊长度为220 mm。

### 2.2 收土整形环

为实现种床整理功能,收土整形环使得溢流土壤有向沟槽方向移动的趋势,且需对土壤有足够的推移体积以完成沟槽闭合。收土整形环为圆台环状结构,主要结构参数为母线长度和母线与水平线的夹角。

#### 2.2.1 收土整形环角度

种床整理装置收土整形环母线与水平线夹角影响种床整理装置收土量,该角度过大或过小均无法起到收土作用。为同时满足收土效果与结构紧凑性,分析收土整形环角度对收土量的关系。以垄顶与垄帮交点为原点,水平方向为 $x$ 轴,竖直方向为 $y$ 轴建立坐标系,施肥开沟器作业后垄帮溢流土壤切线与水平方向夹角为 $\theta$ ,收土整形环母线长度为 $l$ ,整形环角度与收土量的关系如图3所示,建立角度与收土量 $S$ 的关系式

$$S = \frac{l^2}{2} (\sin\alpha\cos\alpha - \tan\theta\cos^2\alpha) \quad (1)$$

式中  $\alpha$ ——收土整形环与水平方向夹角, ( $^\circ$ )

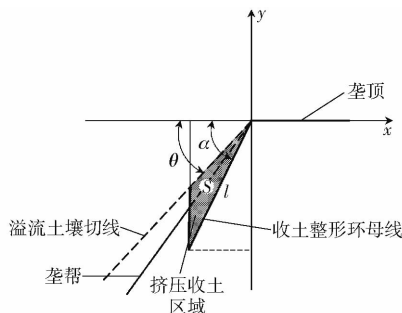


图3 收土整形环角度与收土面积关系示意图

Fig. 3 Schematic of relationship between angle of collecting ring for soil and collecting area

施肥开沟器作业后溢流至垄帮表面的土壤与水平面夹角 $\theta$ 一般为 $25^\circ \sim 30^\circ$ ,结合

$$\frac{dS}{d\alpha} = \frac{l^2 (\cos^2\alpha - \sin^2\alpha + \tan\theta\sin(2\alpha))}{2} \quad (2)$$

可得种床整理装置收土整形环母线与水平线夹角为 $58^\circ$ 时收土能力较佳。

#### 2.2.2 收土整形环母线长度

种床整理装置的收土效果受收土整形环结构参数与溢流土壤分布的影响,而溢流土壤分布状况在施肥开沟器在不同耕作方式、含水率等多种因素导致的不同性质土壤条件下与不同作业速度条件下差异较大,可通过调整收土整形环的母线长度提高收土效果。参照文献[6, 17, 28]采用拟合种床形状轮廓的方法作为收土整形环母线长度的设计参考,设

计前在作业速度为 5.4、9.9、14.4 km/h 和入土深度为 10 cm 的条件下,利用沟型轮廓仪描绘铲式施肥开沟器土壤的轮廓曲线,通过计算机处理拟合曲线模型如表 1、2 所示。

表 1 不同速度下溢流土壤曲线模型

Tab. 1 Soil curve model of overflow at different velocities

运动速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	溢流土壤曲线模型	R <sup>2</sup>
5.4	$y = -0.0058x^2 + 2.7100x - 156.6683$	0.9876
9.9	$y = -0.0056x^2 + 2.5869x - 145.4420$	0.9221
14.4	$y = -0.0043x^2 + 1.7753x - 34.5244$	0.9359

表 2 不同速度下沟槽土壤曲线模型

Tab. 2 Trench soil curve model at different velocities

运动速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	沟槽土壤曲线模型	R <sup>2</sup>
5.4	$y = 0.0055x^2 - 3.4715x + 682.3135$	0.9199
9.9	$y = 0.0051x^2 - 3.1679x + 639.0575$	0.9033
14.4	$y = 0.0043x^2 - 2.7074x + 546.6432$	0.9643

以垄台对称线与垄沟平面交点为原点建立坐标系如图 4 所示,建立种床整理装置对溢流土壤收聚的模型

$$2S_1 = S_2 \quad (3)$$

其中

$$S_1 = \int_{x_A}^{x_M} (f_1(x) - f_{AM}(x)) dx + \int_{x_M}^{x_C} (f_1(x) - f_{MC}(x)) dx \quad (4)$$

$$S_2 = \int_{x_C}^{x_S} (f_{CS}(x) - f_2(x)) dx \quad (5)$$

式中  $f_1$ ——溢流土壤曲线拟合方程,mm  
 $f_2$ ——沟槽土壤曲线拟合方程,mm  
 $f_{AM}$ ——收土整形环母线方程,mm  
 $f_{MC}$ ——溢流土壤与平整辊接触直线方程,mm  
 $x_A$ ——收土整形环母线初端点 A 横坐标,mm  
 $x_C$ ——土壤拟合模型与平整辊交点 C 横坐标,mm  
 $x_M$ ——收土整形环母线末端点 M 横坐标,mm  
 $x_S$ ——土壤拟合模型与平整辊交点 S 横坐标,mm  
 $f_{CS}$ ——平整辊法线方程,mm  
 $S_1$ ——受装置挤压的溢流土壤区域断面面积,mm<sup>2</sup>  
 $S_2$ ——受装置挤压回填土壤断面面积,mm<sup>2</sup>  
 收土整形环的母线 AM 方程为

$$f_{AM}(x) = (x - x_M) \tan \alpha + y_M \quad (6)$$

式中  $y_M$ ——收土整形环母线末端点 M 纵坐标,mm

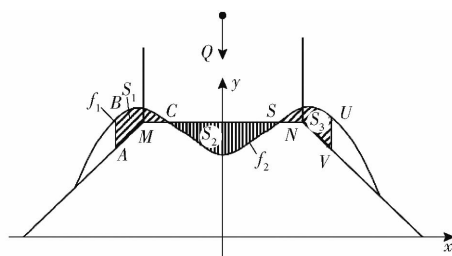


图 4 种床整理装置土壤收聚示意图

Fig. 4 Schematic of soil collection of seedbed perfect device

忽略种床整理装置对土壤挤压发生体积变化的情况,综合式(3)~(6)与土壤曲线拟合模型得出种床整理装置收土整形环母线长度理论值为 8~76 mm。

### 2.3 种床整理装置载荷

种床整理装置对土壤施加适当的载荷可增加土壤颗粒间的结合力,减少种沟构建时沟壁土壤回流,同时垄台土壤容重的提高减少了水分散失,因此种床整理装置对土壤载荷和种床整理装置作业质量至关重要<sup>[29]</sup>。

种床整理装置载荷除了与自身重力相关外,在作业时受播种单体重力  $G$ 、弹簧下拉力  $F_k$ 、开沟器工作阻力  $R$ 、镇压装置与土壤相互力  $P$  以及拖拉机牵引力的影响,首先对播种单体进行受力分析,如图 5 所示。

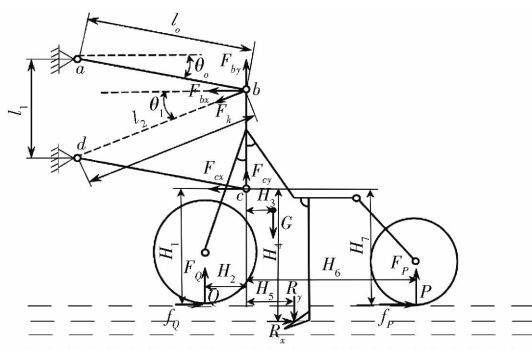


图 5 播种单体受力分析

Fig. 5 Stress diagram of seeding-unit

播种单体在地面稳定工作时需满足

$$\begin{cases} F_{bx} + F_{cx} - f_q - f_p - R_x - F_{kx} = 0 \\ F_Q + F_p - G - R_y + F_{by} + F_{cy} - F_{ky} = 0 \\ F_{cx}l_1 + f_q(l_1 + H_1) - F_QH_2 - GH_3 + \\ R_x(l_1 + H_4) - R_yH_5 + \\ f_p(H_7 + l_1) + F_pH_6 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{其中 } \frac{F_{by}}{F_{bx}} = \frac{F_{cy}}{F_{cx}} = \arctan \theta_0 \quad (8)$$

$$\frac{F_{ky}}{F_{kx}} = \arctan \theta_1 \quad (9)$$

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{l_1^2 + l_2^2 - l_0^2}{2l_1l_2} \quad (10)$$

式中  $F_{bx}$ ——联接板上铰接点横向牵引力, N  
 $F_{cx}$ ——联接板下铰接点横向牵引力, N  
 $F_{by}$ ——联接板上铰接点纵向牵引力, N  
 $F_{cy}$ ——联接板下铰接点纵向牵引力, N  
 $f_Q$ ——种床整理装置滚动阻力, N  
 $f_P$ ——镇压装置滚动阻力, N  
 $R_x$ ——播种开沟器前进阻力, N  
 $R_y$ ——播种开沟器垂直反力, N  
 $F_Q$ ——地面对种床整理装置的支持力, N  
 $F_P$ ——镇压装置镇压力, N  
 $l_0$ ——平行四杆机构上下连杆长度, mm  
 $H_1$ ——滚动阻力  $f_Q$  到平行四杆机构的垂直距离, mm  
 $H_2$ ——种床整理装置对地面压力到平行四杆机构末端的水平距离, mm  
 $H_3$ ——单体中心平行四杆机构末端的水平距离, mm  
 $H_4$ ——开沟器前进阻力到平行四杆机构末端的垂直距离, mm  
 $H_5$ ——开沟器垂直反力到平行四杆机构末端的水平距离, mm  
 $H_6$ ——镇压力到平行四杆机构末端的水平距离, mm  
 $H_7$ ——镇压装置滚动阻力到平行四杆机构末端的水平距离, mm  
 $\theta_0$ ——平行四杆机构初始牵引角, ( $^\circ$ )  
 $\theta_1$ ——弹簧轴线与水平方向夹角, ( $^\circ$ )  
 $l_1$ ——平行四杆机构前杆长度, mm  
 $l_2$ ——平行四杆仿形机构对角线长度, mm

种床整理装置承受载荷变化会影响其与种床接触表面面积, 导致载荷与土壤表面压应力之间非线性变化。为确定种床整理装置对土壤载荷与地面压应力之间的函数关系, 将装置与土壤之间关系视为刚性轮与非刚性面接触模型, 利用 Bekker 模型计算所述关系为

$$\sigma = \left( \frac{K_c}{b} + K_\varphi \right) \Delta y^n \quad (11)$$

式中  $\sigma$ ——接地比压, kPa  
 $b$ ——种床整理装置长度, mm  
 $\Delta y$ ——种床整理装置下限量, mm  
 $K_c$ ——黏聚变形模量,  $\text{kN/m}^{n+1}$   
 $K_\varphi$ ——摩擦变形模量,  $\text{kN/m}^{n+2}$   
 $n$ ——土壤变性指数

地面对种床整理装置的支持力为

$$F_Q = \int_0^r dF_Q \cos\beta = \int_0^r pb dx \quad (12)$$

式中  $p$ ——种床整理装置对地面的压力, Pa  
 $r$ ——地面与种床整理装置相交线长度, mm  
 其中, 由图 6 中几何关系可得

$$r = \sqrt{D\Delta y} \quad (13)$$

式中  $D$ ——种床整理装置平整辊直径, mm

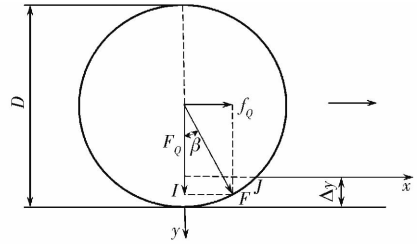


图 6 种床整理装置受力示意图

Fig. 6 Stress diagram of seedbed perfect device

联立式(11)~(13)可得

$$F_Q = (K_c + bK_\varphi) \Delta y^n \left( 1 - \frac{n}{3} \right) \sqrt{D\Delta y} \quad (14)$$

同理, 滚动过程中装置的滚动阻力与压应力的关系为

$$f_Q = \frac{\left( \frac{3F_Q}{\sqrt{D}} \right)^{\frac{2n+2}{2n+1}} (3-n)^{-\frac{2n+2}{2n+1}}}{(n+1)(K_c + bK_\varphi)^{\frac{1}{2n+1}}} \quad (15)$$

由上述分析可知, 种床整理装置对土壤的压应力与播种单体重力、下拉弹簧力、拖拉机牵引力、开沟器与覆土镇压装置和土壤的相互作用力、种床整理装置直径、土壤变形模量和变形参数等诸多因素有关。SEFA 等<sup>[13]</sup>的研究表明, 在行内施加压力 60 kPa 有利于保持水分以及减小发芽时间, 因此取种床整理装置对种床的压应力水平为 50、60、70 kPa。按照轻黏土力学参数求解极限承载力结果<sup>[30]</sup>, 结合播种单体结构、种床整理装置结构和种床整理装置设计压应力, 选取仿形下拉弹簧材料直径为 5 mm、弹簧中径为 38 mm、有效圈数为 25 圈, 其刚度为 4.48 N/mm, 自由长度为 206 mm。

### 3 田间试验

#### 3.1 试验条件

试验于 2022 年 7 月 28—31 日在东北农业大学哈尔滨向阳黑土地保护利用机械化技术定位试验观测站试验田实施。试验地土壤为典型东北区黑壤土, 试验地块平整, 采用 1GSZ-140A 型多功能旋耕起垄机起垄, 垄距为 65 cm, 试验前采用五点取样法对试验田取样测得试验田土壤基本物理性能如表 3 所示。试验现场如图 7 所示。

试验仪器设备有: 约翰迪尔 484 型拖拉机、设有种床整理装置的 2BXJ-4 型大豆精密播种机(图 7)、

表 3 试验田基本物理性能

Tab.3 Basic physical properties of experiment field

参数	平均值	标准差
0~5 cm 土壤含水率/%	20.17	0.311
5~10 cm 土壤含水率/%	19.83	0.516
0~5 cm 土壤坚实度/MPa	1.25	0.737
5~10 cm 土壤坚实度/MPa	1.74	0.504
0~5 cm 土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.62	0.116
5~10cm 土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.64	0.185
种床平整度/mm	6.76	1.115



图 7 田间试验

Fig.7 Field experiment site

PV6.08 型贯穿阻力计、钢板尺、游标卡尺、电子秤等。其中,2BXJ-4 型大豆精密播种机安装外槽轮式排肥器(施肥量为 500 kg/hm<sup>2</sup>)、双圆盘开沟器(垄上双行大豆理论行间距 10 cm)、排种器(行内大豆理论株距 8 cm)、铲式施肥开沟器、护种管等。试验所用大豆品种为黑农 45,所用化肥为鲁西复合肥(N 12%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 18%, K<sub>2</sub>O 16%)。

### 3.2 试验方法

为探究种床整理装置的最佳结构和应用参数组合,以及各因素对种床整理质量和种肥配置关系的影响规律,采用三因素三水平正交试验的方法进行田间试验<sup>[31]</sup>。影响种床整理装置对地面压应力的因素包括单体结构、种床整理装置外形参数等因素,影响收土量的因素包括收土整形环参数以及平整辊长度,在对关键结构参数进行设计的基础上,以仿形机构下拉弹簧预伸长量  $A$ (简称预伸长量)、作业速度  $B$ 、收土整形环母线长度  $C$ (简称母线长度)为试验因素,以种床平整度  $Y_1$ 、垄顶 5 cm 深土壤坚实度变异系数  $Y_2$ 、种子横向偏移离散度  $Y_3$ 、播种深度变异系数  $Y_4$  以及种肥间距合格率  $Y_5$  为评价指标进行试验,每组试验重复 3 次并取平均值。作业速度取 5.4~14.4 km/h,试验时驾驶员通过调节拖拉机行驶档位与油门实现;根据式(3)~(6)的计算结果选取收土整形环母线长度为 8~76 mm;根据弹簧基本参数,设定弹簧的预伸长量为 26~90 mm。因素水平如表 4 所示。试验方案如表 5 所示,表中  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为水平值。

参考 NY/T 499—2013《旋耕机作业质量》测量种床整理装置整理后种床平整度。每个处理测定长

表 4 正交试验因素水平

Tab.4 Factors and levels of experiment

水平	因素		
	预伸长量/ mm	作业速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	母线长度/ mm
1	26	5.4	8
2	58	9.9	42
3	90	14.4	76

度为 50 m,两端各设 10 m 预备区,测区均分为 5 个测点,每个测点横向均匀分布 10 个等份点。其计算方法为

$$G_j = \frac{\sum_{i=1}^m |X_{ij} - \bar{X}_j|}{m} \quad (16)$$

式中  $G_j$ ——第  $j$  个测点处地表平整度,mm

$\bar{X}_j$ ——第  $j$  个测点处各等份点至地表的平均距离,mm

$X_{ij}$ ——第  $j$  个测点处第  $i$  个等份点至地表的距离,mm

$m$ ——第  $j$  个测点的等份点数量,取 10

参考 NY/T 503—2015《单粒(精密)播种机试验方法》以及 NY/T 1003—2006《施肥机械评价技术规范》计算种肥间距合格率、播深变异系数。

为准确反映作业后种床土壤坚实度的一致性,取测点位置分别在垄中心线与单侧 5 cm 处,测点取法与变异系数的计算方法同种床平整度一致。种子横向偏移离散度计算方法参照文献[32]。

### 3.3 试验结果与极差分析

试验结果如表 5 所示,方差分析与极差分析结果如表 6 所示。

### 3.4 优化分析

由表 6 可知,预伸长量、作业速度对种床平整度影响显著,母线长度对种床平整度极显著,因素影响的由大到小为  $C$ 、 $B$ 、 $A$ ,优化组合为  $A_3B_1C_1$ ;预伸长量对土壤坚实度变异系数影响显著,母线长度对土壤坚实度变异系数影响极显著,因素影响由大到小为  $C$ 、 $A$ 、 $B$ ,优化组合为  $A_3B_3C_1$ ;作业速度和母线长度对种子横向偏移离散度影响显著,因素影响由大到小为  $B$ 、 $C$ 、 $A$ ,优化组合为  $A_3B_1C_3$ ;作业速度和母线长度对播深变异系数影响显著,因素影响由大到小为  $C$ 、 $B$ 、 $A$ ,优化组合为  $A_1B_1C_3$ ;母线长度对种肥间距合格率影响显著,因素影响由大到小为  $C$ 、 $A$ 、 $B$ ,优化组合为  $A_2B_1C_2$ 。

参照 NY/T 503—2015《单粒(精密)播种机试验方法》并以降低土壤坚实度变异系数、种子横向偏移离散度、播种深度变异系数,提高种床平整度、

表5 试验方案与结果

Tab.5 Experiment scheme and results

序号	因素			种床平整度/ mm	土壤坚实度 变异系数/%	种子横向偏移 离散度/%	播种深度变异 系数/%	种肥间距 合格率/%
	A	B	C					
1	1	1	1	4.37	19.92	5.69	12.42	83.80
2	1	2	2	7.43	28.93	7.67	11.89	91.01
3	1	3	3	9.82	35.25	7.16	10.49	78.26
4	2	1	2	4.63	22.22	4.57	9.89	94.40
5	2	2	3	8.18	31.13	6.99	8.21	77.09
6	2	3	1	5.56	14.81	9.87	19.16	83.32
7	3	1	3	5.68	28.64	3.96	6.54	73.70
8	3	2	1	3.55	14.29	8.56	16.30	82.56
9	3	3	2	6.22	17.39	7.65	13.74	87.86

表6 方差与极差分析结果

Tab.6 Results of variance and range analysis

指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P	$k_1$	$k_2$	$k_3$	极差	优化组合
种床平整度	A	6.35	2	3.18	54.34	0.018 1*	7.21	6.12	5.15	2.06	$A_3B_1C_1$
	B	8.21	2	4.11	70.27	0.014 0*	4.89	6.39	7.20	2.31	
	C	17.36	2	8.68	148.55	0.006 7**	4.49	6.09	7.89	3.40	
	残差	0.12	2	0.06							
	总值	32.04	8								
土壤坚实度变异系数	A	97.88	2	48.94	32.85	0.029 5*	28.03	22.72	20.11	7.92	$A_3B_3C_1$
	B	7.92	2	3.96	2.66	0.273 5	23.60	24.78	22.49	2.29	
	C	355.43	2	177.72	119.29	0.008 3**	16.34	22.85	31.68	15.34	
	残差	2.98	2	1.49							
	总值	464.21	8								
种子横向偏移离散度	A	0.28	2	0.14	0.90	0.527 6	6.84	7.14	6.72	0.42	$A_3B_1C_3$
	B	21.39	2	10.70	67.93	0.014 5*	4.74	7.74	8.23	3.49	
	C	6.35	2	3.18	20.17	0.047 2*	8.04	6.63	6.04	2.00	
	残差	0.31	2	0.16							
	总值	28.34	8								
播种深度变异系数	A	1.07	2	0.53	0.58	0.632 8	11.60	12.42	12.19	0.82	$A_1B_1C_3$
	B	35.23	2	17.61	19.16	0.049 6*	9.62	12.13	14.46	4.84	
	C	85.72	2	42.86	46.61	0.021 0*	15.96	11.84	8.41	7.55	
	残差	1.84	2	0.92							
	总值	123.86	8								
种肥间距合格率	A	21.92	2	10.96	2.09	0.323 3	84.36	84.93	81.37	3.56	$A_2B_1C_2$
	B	1.01	2	0.51	0.10	0.911 9	83.97	83.55	81.07	2.90	
	C	326.38	2	163.19	31.18	0.031 1*	83.23	91.09	76.35	14.74	
	残差	10.47	2	5.23							
	总值	359.77	8								

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

种肥间距合格率为目标进行优化。如表6所示,预伸长量对种床平整度、土壤坚实度变异系数显著,两者最优结果均为 $A_3$ ,因此选取 $A_3$ ;作业速度对种床平整度、种子横向偏移离散度、播种深度变异系数影响均显著,在满足播种机最低作业质量要求的情况下,考虑到作业效率是评价播种机性能的重要指标,选取 $B_3$ ;母线长度对上述所有指标影响均显著, $C_3$ 不满足种肥间距合格率要求,以播种质量为主要优化目标,因此选取 $C_2$ 。综上,选取作业速度不大于

14.4 km/h,预伸长量为90 mm、母线长度为42 mm的参数组合作为优化组合。

### 3.5 验证与对比试验

验证试验于2022年8月3日在东北农业大学哈尔滨向阳黑土地保护利用机械化技术定位试验观测站试验田实施。种床整理装置的母线长度为42 mm,对增设该种床整理装置的播种单体与未增设种床整理装置的播种单体在弹簧预伸长量为90 mm,在作业速度14.4 km/h的条件下进行性能比较试验,在

测区内选取 100 个测点统计,对比试验重复 3 次,其结果如表 7 所示。整理后种床与未整理种床种沟构建效果如图 8 所示。

表 7 对比试验结果

Tab.7 Comparison of experiment results

项目	序号	播种深度一致性/%	种子横向偏移离散度/%	种肥间距合格率/%
增设种床整理装置播种单体	1	91	7.16	88
	2	88	6.68	90
	3	95	8.29	94
	均值	91.33	7.38	90.67
未增设种床整理装置播种单体	1	74	13.17	62
	2	78	15.32	72
	3	68	11.03	72
	均值	73.33	13.17	68.67
优化率/%		19.71	44.02	24.26
P		0.006 1**	0.012 0*	0.004 3**

由表 7 可知,增设种床整理装置的播种单体相较于未设置种床整理装置播种单体,播种深度一致性提高 19.71%,种子横向偏移离散度降低 44.02%,种肥间距合格率提高 24.26%,增设种床整理装置对作业质量提升效果显著。

## 4 结论

(1)在东北黑壤土土壤含水率 20.00%、土壤坚



图 8 种沟构建效果对比

Fig.8 Comparison of seed ditch construction effect

1. 设有种床整理装置 2. 未设有种床整理装置

实度 1.49 MPa、仿形弹簧刚度 4.48 N/mm 条件下,影响种床平整度和播种深度变异系数的因素由大到小为:母线长度、作业速度、预伸长量,影响种床土壤坚实度变异系数和种肥间距合格率的因素由大到小为:母线长度、预伸长量、作业速度,影响种子横向偏移离散度的因素由大到小为:作业速度、母线长度、预伸长量;当作业速度不超过 14.4 km/h、弹簧预伸长量 90 mm、收土整形环母线长度 42 mm 时,播种深度一致性、种肥间距合格率和种子横向偏移离散度分别达到 91.33%、90.67%、7.38%。

(2)设计了一种大豆垄三栽培配套播种机的双锥环型种床整理装置,该装置可以使得播种单体的播种深度一致性和种肥间距合格率分别提升 19.71% 和 24.26%,种子横向偏移离散度下降 44.02%,播种质量提升效果显著。

## 参 考 文 献

- [1] 吕继龙,何萍,徐新朋,等. 我国大豆最佳施肥量和种植密度评价[J]. 中国土壤与肥料,2020(6): 174-180.  
LÜ Jilong, HE Ping, XU Xinpeng, et al. Assessment of the optimum fertilization rates and planting density for soybean production in China[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(6): 174-180. (in Chinese)
- [2] 李国生,吴小宾,魏建林,等. 分层施肥对玉米产量及氮肥利用率的影响[J]. 山东农业科学, 2020, 52(3):66-71.  
LI Guosheng, WU Xiaobin, WEI Jianlin, et al. Effect of stratified fertilization on yield and nitrogen use efficiency of corn[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2020, 52(3): 66-71. (in Chinese)
- [3] 赵宇,陈海涛,王业成,等. 垄上双行插装式排种器性能试验研究初报[J]. 大豆科学,2013,32(1):98-101.  
ZHAO Yu, CHEN Haitao, WANG Yecheng, et al. Preliminary study on the performance of insert-metering sub-district seeder [J]. Soybean Science, 2013, 32(1): 98-101. (in Chinese)
- [4] 姚卫华. 机械化大豆“三垄”栽培技术增产效果及经济效益分析[J]. 大豆通报,2007(5):9-11.  
YAO Weihua. “Three Long” cultivation techniques and machine planting soybeans[J]. Soybean Bulletin, 2007(5): 9-11. (in Chinese)
- [5] JO S G, KANG Y I, OM K S, et al. Growth, photosynthesis and yield of soybean in ridge-furrow intercropping system of soybean and flax[J]. Field Crops Research, 2022, 275:1-9.
- [6] 赵淑红,谭贺文,陈君执,等. 深施肥条件下双圆盘播种开沟器性能优化[J]. 东北农业大学学报,2017, 48(11):86-96.  
ZHAO Shuhong, TAN Hewen, CHEN Junzhi, et al. Performance experiment of double disk opener used for sowing under deep fertilization[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2017, 48(11): 86-96. (in Chinese)
- [7] 史乃煜,陈海涛,邹震,等. 基于勒洛多边形原理的播种机机械式离合装置研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 64-74.  
SHI Naiyu, CHEN Haitao, ZOU Zhen, et al. Design of planter mechanical clutch based on principle of Reuleaux polygon[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 64-74. (in Chinese)
- [8] LAMICHHANE J R, SOLTANI E. Sowing and seedbed management methods to improve establishment and yield of maize, rice and wheat across drought-prone regions; a review[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2020, 2: 1-6.
- [9] VAMERALI T, BERTOCCO M, SARTORI L. Effects of a new wide-sweep opener for no-till planter on seedzone properties and root establishment in maize (*Zea mays* L.): a comparison with double-disk opener[J]. Soil & Tillage Research, 2006, 89:



196 - 209.

- [10] KARAYEL D, OZMERZI A. Comparison of vertical and lateral seed distribution off urrow openers using a new criterion[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 95: 69 - 75.
- [11] 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 & Tillage Research, 2016, 162: 34 - 40.
- [12] MVLLER F L, RAITT L M, CYSTER L F, et al. The effects of temperature, water availability and seed burial depth on seed germination and seedling establishment of *Calobota sericea* (Fabaceae)[J]. South African Journal of Botany, 2019, 121: 224 - 229.
- [13] SEFA A, AHMET C. The effects of tillage and intra-row compaction on seedbed properties and red lentil emergence under dry land conditions[J]. Soil & Tillage Research, 2011, 114: 1 - 8.
- [14] ARVIDSSON J, BÖLENIUS E, CAVALIERI K M V, et al. Effects of compaction during drilling on yield of sugar beet (*Beta vulgaris* L.)[J]. European Journal of Agronomy, 2012, 39: 44 - 51.
- [15] ZHAO Zhan, LI Hongchang, LIU Jinkai, et al. Control method of seedbed compactness based on fragment soil compaction dynamic characteristics[J]. Soil & Tillage Research, 2020, 198: 1 - 7.
- [16] 刘晓东,王绪坪,陈礼源,等. 油菜直播机分层定量施肥装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(5):1-10.  
LIU Xiaodong, WANG Xuping, CHEN Liyuan, et al. Design and experiments of layered and quantitative fertilization device for rapeseed seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(5): 1 - 10. (in Chinese)
- [17] 史乃煜,陈海涛,魏志鹏,等. 基于最速降线原理的免耕播种机强制回土装置研究[J]. 农业机械学报,2020,51(2):37-44.  
SHI Naiyu, CHEN Haitao, WEI Zhipeng, et al. Design and test of forced-return device based on principle of brachistochrone [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 37 - 44. (in Chinese)
- [18] 白璐,黄玉祥,高鹏洋,等. 基于双圆盘覆土的种肥分施装置设计与试验[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020,48(1):135-145,154.  
BAI Lu, HUANG Yuxiang, GAO Pengyang, et al. Design and test of seed and fertilizer separate device based on double disc covering soil[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2020, 48(1): 135 - 145, 154. (in Chinese)
- [19] 吕金庆,衣淑娟,陶桂香,等. 马铃薯播种机分体式滑刀开沟器参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(4):44-54.  
LÜ Jinqing, YI Shujuan, TAO Guixiang, et al. Parameter optimization and experiment of splitter sliding-knife opener for potato planter[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(4): 44 - 54. (in Chinese)
- [20] BARR J B, UCGUL M, DESBIOLLES M A, et al. Simulating the effect of rake angle on narrow opener performance with the discrete element method[J]. Biosystems Engineering, 2018, 171: 1 - 15.
- [21] BARR J B, DESBIOLLES M A, FIELKE M. Minimising soil disturbance and reaction forces for high speed sowing using bentleg furrow openers[J]. Biosystems Engineering, 2016, 151: 53 - 64.
- [22] 孟凡豪. 滑动式开沟装置仿生设计与试验[D]. 长春:吉林大学,2021.  
MENG Fanhao. Bionic design and experiment of sliding opening device[D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese)
- [23] 刘进宝,汤智辉,郑炫,等. 2FHF-4.56型宽行距作物基肥对行分层深施肥设计与试验[J]. 农业工程学报,2022,38(6):1-11.  
LIU Jinbao, TANG Zhihui, ZHENG Xuan, et al. Design and experiments of the 2FHF-4.56 type base-fertilizer row-following and layered deep fertilizing machine for wide row spacing crops[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(6): 1 - 11. (in Chinese)
- [24] 张喜瑞,曾望强,刘俊孝,等. 基于离散元法的砖红壤斜柄折翼式深松铲设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(3):40-49.  
ZHANG Xirui, ZENG Wangqiang, LIU Junxiao, et al. Design and experiment of iateritic soil inclined handle folding wing subsoiling based on discrete element method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 40 - 49. (in Chinese)
- [25] 罗红旗,高焕文. 免耕播种机组合镇压器设计研究[J]. 北京工商大学学报(自然科学版),2008,26(3):21-24.  
LUO Hongqi, GAO Huanwen. Study on combined press for permanent raised beds planter[J]. Journal of Beijing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2008, 26(3): 21 - 24. (in Chinese)
- [26] 王磊,师宏强,刘刚,等. 黑土区宽垄和窄垄耕作的顺坡坡面土壤侵蚀对比[J]. 农业工程学报,2019,35(19):176-182.  
WANG Lei, SHI Hongqiang, LIU Gang, et al. Comparison of soil erosion between wide and narrow longitudinal ridge tillage in black soil region[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(19): 176 - 182. (in Chinese)
- [27] 张兴义,乔宝玲,李健宇,等. 降雨强度和坡度对东北黑土区顺坡垄体溅蚀特征的影响[J]. 农业工程学报,2020,36(16):110-117.  
ZHANG Xingyi, QIAO Baoling, LI Jianyu, et al. Effects of rainfall intensity and slope on splash erosion characteristics of downslope ridge on farmland in black soil areas of Northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(16): 110 - 117. (in Chinese)
- [28] 郭慧,陈志,贾洪雷,等. 锥形轮体结构的覆土镇压器设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(12):56-65.  
GUO Hui, CHEN Zhi, JIA Honglei, et al. Design and experiment of soil-covering and soil-compacting device with cone-shaped structure of wheel[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(12): 56 - 65. (in Chinese)
- [29] 侯守印,陈海涛,史乃煜,等. 双自由度多铰接仿形免耕精量播种单体设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(4):

92 - 101.

HOU Shouyin, CHEN Haitao, SHI Naiyu, et al. Design and experiment of two-degree-of-freedom multi-articulated profiling no-tillage precision drill unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 92 - 101. (in Chinese)

- [30] 赵家丰,汪伟,孙中兴,等. 均质土壤承压下陷模型改进及验证[J]. 农业工程学报,2016,32(21):60 - 66.  
ZHAO Jiafeng, WANG Wei, SUN Zhongxing, et al. Improvement and verification of pressure-sinkage model in homogeneous soil[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(21): 60 - 66. (in Chinese)
- [31] 陈海涛,魏志鹏,苏文海,等. 前置式大垄原茬地种床整备装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(10):51 - 60,73.  
CHEN Haitao, WEI Zhipeng, SU Wenhai, et al. Design and experiment of cleaning and anti-blocking of front-mounted seed bed preparation device for grand ridge with raw stubble[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 51 - 60, 73. (in Chinese)
- [32] 贾洪雷,郑嘉鑫,袁洪方,等. 仿形滑刀式开沟器设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(4):16 - 24.  
JIA Honglei, ZHENG Jiaxin, YUAN Hongfang, et al. Design and experiment of profiling sliding-knife opener [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(4): 16 - 24. (in Chinese)

(上接第 29 页)

- [17] 王庆海,刘广瑞,郭珂甫. 基于改进人工蜂群算法的无人机航迹规划研究[J]. 机床与液压, 2017, 45(21): 68 - 72.  
WANG Qinghai, LIU Guangrui, GUO Kefu. Research on path planning of UAV based on improved ABC algorithm [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017, 45(21): 68 - 72. (in Chinese)
- [18] 贺井然,何广军,于学生. 基于改进蜂群算法的无人机路径规划[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(10): 103 - 106.  
HE Jingran, HE Guangjun, YU Xuesheng. The UAV path planning based on improved artificial bee colony algorithm[J]. Fire Control & Command Control, 2021, 46(10): 103 - 106. (in Chinese)
- [19] 王宇,王文浩,徐凡,等. 基于改进蚁群算法的植保无人机路径规划方法[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 103 - 112.  
WANG Yu, WANG Wenhao, XU Fan, et al. Path planning approach based on improved ant colony optimization for sprayer UAV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 103 - 112. (in Chinese)
- [20] 张宇楠,刘付永. 一种改进的变步长自适应蝙蝠算法及其应用[J]. 广西民族大学学报(自然科学版), 2013, 19(2): 51 - 54.  
ZHANG Yu'nan, LIU Fuyong. Improved variation step adaptive bat algorithm and application [J]. Journal of Guangxi Minzu University (Natural Science Edition), 2013, 19(2): 51 - 54. (in Chinese)
- [21] 肖辉辉,段艳明. 基于 DE 算法改进的蝙蝠算法的研究及应用[J]. 计算机仿真, 2014, 31(1): 272 - 277.  
XIAO Huihui, DUAN Yanming. Research and application of improved bat algorithm based on DE algorithm [J]. Computer Simulation, 2014, 31(1): 272 - 277. (in Chinese)
- [22] 杨凯中,提梦桃,谢英柏. 基于罗盘算子的改进蝙蝠优化算法[J]. 计算机科学, 2020, 47(增刊): 135 - 138.  
YANG Kaizhong, TI Mengtao, XIE Yingbai. Improved bat optimization algorithm based on compass operator [J]. Computer Science, 2020, 47(Supp.): 135 - 138. (in Chinese)
- [23] 陈东宁,刘一丹,姚成玉,等. 多阶段自适应蝙蝠-蚁群混合群智能算法[J]. 机械工程学报, 2021, 57(6): 236 - 248.  
CHEN Dongning, LIU Yidan, YAO Chengyu, et al. Multi-stage adaptive BA - ACO hybrid swarm intelligence algorithm [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(6): 236 - 248. (in Chinese)
- [24] GAN C, CAO W, WU M, et al. A new bat algorithm based on iterative local search and stochastic inertia weight [J]. Expert Systems with Applications, 2018, 104: 202 - 212.
- [25] WANG G, CHU H E, MIRJALILI S. Three-dimensional path planning for UCAV using an improved bat algorithm [J]. Aerospace Science and Technology, 2016, 49: 231 - 238.
- [26] LYU S, LI Z, HUANG Y, et al. Improved self-adaptive bat algorithm with step-control and mutation mechanisms [J]. Journal of Computational Science, 2019, 30: 65 - 78.
- [27] 吕石磊,卢思华,魏志威,等. 基于双频蝙蝠算法的树状灌溉管网规划[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2020, 46(1): 99 - 106.  
LÜ Shilei, LU Sihua, WEI Zhiwei, et al. Planning of tree-type irrigation pipe network based on the dual-frequency bat algorithm [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2020, 46(1): 99 - 106. (in Chinese)
- [28] 谢家兴,梁高天,高鹏,等. 考虑无线传输损耗的农业物联网节点分布规划算法研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 275 - 281.  
XIE Jiaxing, LIANG Gaotian, GAO Peng, et al. Algorithm for distribution planning of agricultural IoT nodes considering wireless transmission loss [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 275 - 281. (in Chinese)