

基于离散元的设施农业就地翻土犁的研究与试验

刘元义¹, 于圣洁¹, 胥备¹, 王宪良¹, 宋发成²

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 山东 淄博 255000; 2. 西安交通大学机械制造系统国家重点实验室, 西安 710054)

摘要:针对设施农业空间狭小, 土壤病虫害严重, 无法使用铧式犁深翻的问题, 提出一种就地翻土解决办法。根据逆向工程得到就地翻土犁犁体逆向曲面, 通过现有犁体成型原理, 参照铧式犁犁体耕宽、耕深、犁体安装角、切土角、导曲线提升角、开度、犁体长度等参数, 创设就地翻土犁犁体正向曲面; 实测设施农业土壤相对湿度为34.57%、土壤堆积角为39°, 通过EDEM软件中的接触参数数据库GEMM得到接触参数范围, 标定土壤颗粒间表面能为4.19 J/m²、碰撞恢复系数为0.282、动摩擦因数为0.051、静摩擦因数为0.629, 创设试验土槽; 引入原沟落土率概念; 构建原沟落土率与曲面参数间的相互作用模型, 得到最佳原沟落土率曲面参数; 利用Design-Expert软件进行分析, 以原沟落土率为响应指标, 使用Plackett-Burman试验设计方法开展多因素两水平显著性筛选试验, 得到影响原沟落土率耕宽、犁铧安装角、切土角3个显著性因素; 对3因素进行Box-Behnken试验设计, 得到278.392 mm耕宽、40.522°犁铧安装角、23.211°切土角最佳设计参数。针对优化结果进行试验, 得到试验结果与预测结果误差为3.13%, 试验结果表明, 所研究就地翻土犁可以达到就地翻土的目的, 并为解决设施农业内土壤深翻问题提供参考。

关键词: 农业工程; 就地翻土犁; 正交试验; 原沟落土率; 实物试验

中图分类号: S222.19 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2024)04-1153-13

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20220687

Experimental study on in-situ tilling plow in facility agriculture based on discrete element method

LIU Yuan-yi¹, YU Sheng-jie¹, XU Bei¹, WANG Xian-liang¹, SONG Fa-cheng²

(1. College of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China)

Abstract: In view of the problem that the arable plough could not be used for deep ploughing due to the narrow space of facility agriculture and the serious soil diseases and insect pests, a method of turning soil on the spot was put forward. Based on the reverse engineering, the reverse surface of the plough body of the local soil turning plough was obtained. Based on the existing forming principle of the plough body, the forward surface of the plough body of the share plough body was established by referring to the ploughing

收稿日期: 2022-06-02.

基金项目: 2018年度山东省农机装备研发创新计划项目(2018YF005).

作者简介: 刘元义(1963-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 智能农机设计制造. E-mail: liuyy@sdut.edu.cn

width, ploughing depth, installation angle of the plough body, soil cutting angle, guiding curve lifting angle, opening and length of the plough body. The soil relative humidity was 34.57% and the soil accumulation angle was 39°. The contact parameter range was obtained by GEMM, the contact parameter database of EDEM software. The surface energy between soil particles was 4.19 J/m², the collision recovery coefficient was 0.282, the dynamic friction coefficient was 0.051, and the static friction coefficient was 0.629. The concept of soil fall rate in original gully was introduced. The interaction model between soil fall rate and surface parameters was established, and the optimal surface parameters of soil fall rate were obtained. Using Design-Expert software, plackett-Burman experimental design method was used to carry out multi-factor and two-level significance screening test with soil fall rate as the response index. Three significant factors affecting soil fall rate of the original ditch were obtained, namely, plow width, plowshare installation angle and soil cutting angle. Box-Behnken experimental design was carried out for the three factors, and the optimal design parameters of 278.392 mm plow width, 40.522° plow share installation angle and 23.211° soil cutting angle were obtained. Based on the optimized results, the error between the experimental results and the predicted results is 3.13%. The experimental results show that the tilling plow can achieve the aim of tilling in situ, and provide a reference for solving the problem of soil deep tilling in facility agriculture.

Key words: agricultural engineering; in-situ tilling plow; orthogonal test; soil falling rate of original ditch; physical test

0 引言

近年来,设施农业在国内迅速普及,为实现农作物周年供应,打破作物季节性,达到利益最大化提供保障^[1,2]。预计到2025年,我国以塑料拱棚、日光温室、连栋温室为主的设施种植总面积稳定在200万hm²以上。虽然我国设施农业体量已居世界前列,但问题逐渐暴露,长期重茬、高密度、高肥量的种植方式,导致土壤病虫害严重^[3,4]。设施农业耕整环节目前广泛采用旋耕方式^[5],旋耕无法彻底解决上述病虫害问题;当土壤深翻250mm以上,可将病虫害覆盖而改善土质。但设施农业中受立柱及空间限制,普通铧式犁土垡侧翻形成墒沟,造成土地平整困难,难以应用于设施农业^[6]。为解决上述问题,需研发一种既能实现土壤深翻又不留沟的新型犁具。

20世纪60~80年代出现“横排犁”“正面犁”“原沟翻转犁”等犁体,可实现土壤翻垡同时又不使土垡侧移,1978年,中国农业大学马廷玺翻译美国3063506号专利“土垡原地翻转横排犁”^[7],以延长犁胸的方式实现土垡角度渐变而达到原犁沟翻转;1984年,原山东农业机械化学院王梦熊翻译苏联专利“正面犁”^[8],采用增加副犁体的方法实现土垡落入原犁沟;1987年,佳木斯工学院尤玉锴^[9]推测土垡运动规律设计一种螺旋式犁体

曲面及一种横排犁^[10]。1988~1995年,Junichi等^[11-13]研究设计了一种双铧对称式犁体。以上犁体大都未寻找到合适应用场合,没有得到推广应用。

基于上述分析,课题组对就地翻土犁应用于设施农业的可行性进行探讨^[14,15],研究就地翻土犁应用前景及设计方法。通过对普通铧式犁犁体进行结构创新,根据逆向工程及现有犁体成型原理得到就地翻土犁模型,其解决设施农业翻垡耕作空间限制问题的主要方法是通过延长犁体曲面及改变犁体形状,土垡实现原犁沟翻转180°,因其翻垡是在原犁沟内,以此达到不受犁柱、墙壁、空间狭小限制目的。评价就地翻土犁耕作效果的首要标准是能否达到原犁沟翻转,故引入评价原犁沟翻转效果的原沟落土率参数,进行犁体各参数交互作用研究,通过plackett-Burman试验设计筛选影响就地翻土犁原沟落土率指标的关键因素,再利用Box-Behnken试验设计对就地翻土犁进行优化,对所得优化参数进行犁体实物试验验证,预估模型合理性。就地翻土犁能够完成就地翻垡动作,为设施农业内土壤深翻提供一种有效的解决方案。

1 犁体耕作效果模型构建

设施农业就地翻土犁耕作预估模型分为犁体

数模、离散元仿真模型、原沟落土率获取三部分。

1.1 犁体建模

根据 TRIZ 理论^[14],采用逆向数据设计方式形成逆向曲面,再进行正向绘制,完成犁体建模。

1.1.1 逆向测量及曲面获取

采用杰模数控公司精度为 0.03 mm 的 GMS-CAN-H 非接触手持式激光三维扫描仪,扫描 BT-25 铧式犁单犁,获得其点云数据。应用 Geomagic X 对点云数据进行修正处理,得到普通铧式犁点云数据,对其进行分割、变异、过渡处理,采用翻土曲线族法完成土袋就地翻土运动轨迹,添加适当约束面形成所需犁体曲面,如图 1 所示。

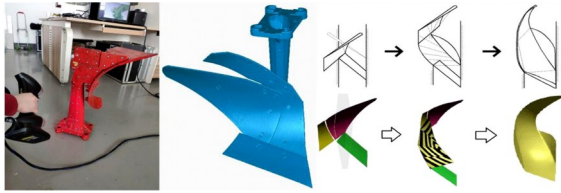


图 1 测量过程及曲面成型过程

Fig. 1 Measurement process and surface forming process

在 Geomagic X 领域组编辑功能下,选用领域组合并功能,使得对称犁壁内表面成为整体领域组。利用面片拟合工具以该领域组为要素拟合成为对称犁壁曲面,并做平滑处理达到曲率连续,此曲面即就地翻土犁逆向曲面。

1.1.2 犁体正向绘制

由于逆向曲面属于定型面,各个参数都不具备设计多样性,所以要根据逆向曲面得出各参数^[15]可改变的正向曲面。

犁体建模可遵循以下步骤:绘制犁铧、导曲线绘制、绘制翻土曲线、将元线进行放样处理,得到就地翻土犁的犁体曲面,绘制效果如图 2 所示。

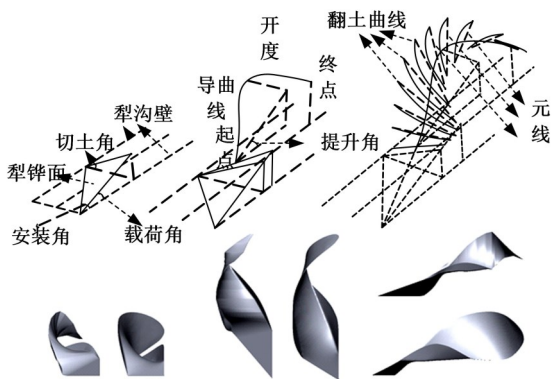


图 2 正向绘制及对比

Fig. 2 Plow forward drawing and comparison

1.1.3 就地翻土犁原理

犁铧为三面楔原理,如图 3(b)所示,其中 θ_0 为犁铧刃与犁体前进方向的夹角,称为铧切角, ϵ 为犁铧末端在垂直于犁体前进方向的剖面上,犁铧与地面夹角称为切土角。 α 为犁尖平行于犁体前进方向的剖面上,犁铧与地面的夹角称为载荷角, α 通过犁铧安装角 θ_0 与切土角 ϵ 确定后自行生成。 α 载荷角、 ϵ 切土角和铧切角 θ_0 的关系为:

$$\tan \alpha = \tan \epsilon \tan \theta_0 \quad (1)$$

式中: α 为载荷角,表示犁铧上与犁刃线相交于犁尖的边与地面的夹角($^\circ$); ϵ 为切土角,表示犁铧末端与犁体曲面相交的边与地面的夹角($^\circ$); θ_0 为犁铧安装角,表示犁刃线与前进方向的夹角($^\circ$)。

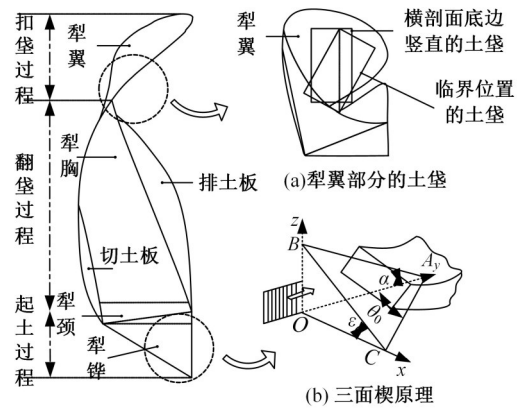


图 3 就地翻土犁翻袋原理

Fig. 3 Principle of in situ tilling plough

起土为犁铧刃全部作用到土壤上形成土袋;翻袋为土袋进入犁颈部分,继续运动至犁胸部分,在犁胸切土板和排土板共同引导下,土壤翻转 90° ;扣袋为犁翼对 90° 土袋继续翻转和此时处于犁体前部土壤挤压的共同作用,将土袋扣翻在原犁沟内。

1.2 离散元仿真模型建立

1.2.1 接触模型选取

接触模型不同,则仿真结果截然不同,对于 Hertz-Mindlin 无滑移模型,颗粒与颗粒之间无羁绊影响,只计算颗粒承受压缩的弹力,因此,不适用于本仿真研究;Hertz-Mindlin with bonding 模型通过粘结键对颗粒进行束缚,在超过临界应力时粘结键断裂,颗粒与颗粒之间以无滑移模型接触,可应用于岩石、混凝土、板结土壤的力学研究,但设施农业中土壤往往有较高含水率,土壤不会存在强粘结作用,故此模型也不适用于本实验中;Hertz-Mindlin with JKR 模型同时考虑土壤含水

率及土壤在湿度达到一定程度时粘结产生的粘合作用,因此,选用此接触模型。

1.2.2 土壤基础参数

土壤类型和土壤质别决定土壤基础参数,考察淄博地区土壤类型多为褐土,土壤质别为壤土^[16-18],阅读文献[19,20]获其基础参数土壤密度为 2650 kg/m³、泊松比为 0.3、剪切模量为 1×10⁶ Pa。

1.2.3 土壤接触参数标定

(1) 测定土壤湿度

物料湿度影响堆积角度,使用浙江托普 TZS-IIW 土壤水分测量仪测量乐采生态园设施农业土壤的含水率参数,选用六点取平均值,得出土壤含水率为 34.57%,如图 4 所示。



图 4 含水率测定

Fig. 4 Moisture content determination

(2) 测定土壤堆积角

搭建土壤堆积角试验台:漏斗上口直径为 120 mm,管径为 18 mm,高为 133 mm,固定在符合国家 JY0001—2003 标准的铁架台上,漏斗底部与铁架台底板距离为 150 mm。首先,铁架台保持水平,将土壤放入堵住的漏斗内,再将漏斗出料口打开,土壤自然下落至铁架台底板,直至土壤堆积角度不能扩大为止,使用量角器量取所堆积土壤的 3 个方位角度并作记录,重复 5 次,对 15 个堆积角取平均值,得到土壤湿度为 34.57%,土壤堆积角度为 39°,如图 5 所示。

(3) 测定土壤接触参数范围

在获取土壤实际含水率后,搭建土壤堆积角仿真实验台,借助文献[21]的搭建方法,采用 Solid-works 2018 进行数模绘制,如图 6(a)所示,其数模尺寸与实际尺寸比例为 1:1,仿真实验如图 6(b)所示。

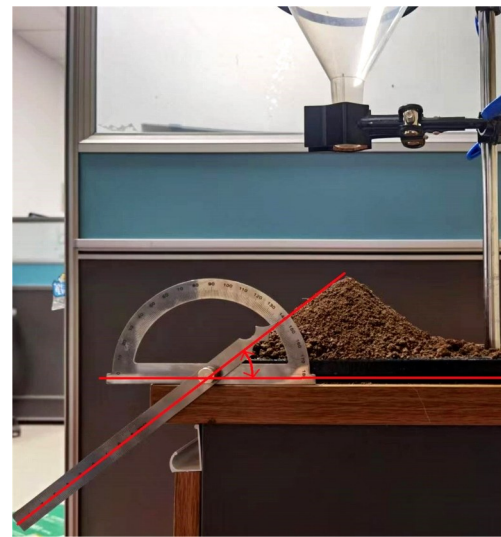
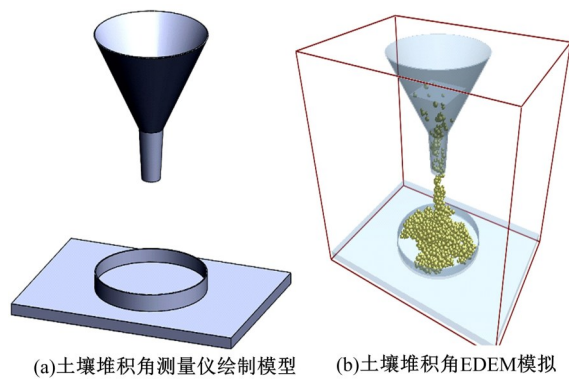


图 5 堆积角标定试验

Fig. 5 Calibration test of stacking angle



(a)土壤堆积角测量仪绘制模型 (b)土壤堆积角EDEM模拟

图 6 土壤堆积角仿真实验

Fig. 6 Simulation test of soil accumulation angle

利用 EDEM 软件颗粒材料接触参数数据库 GEMM DATABASE (Generic EDEM material model database),材料量中选用“小量”,堆积角为 39°,堆积密度选用 1000~1500 kg/m³。得到 JKR 表面能(J/m²)范围值为 4~8,碰撞恢复系数为 0.15~0.55,动摩擦因数为 0.05~0.1,静摩擦因数为 0.32~1.16。

(4) 设计标定试验

基于上述范围值,以堆积角为响应指标,依据 Design-Expert10.07 软件中的 Box-behnken 方法设计试验标定与实际土壤最佳贴合参数。X₁为表面能(J·m⁻²),X₂为颗粒间碰撞恢复系数,X₃为土壤颗粒间动摩擦因数,X₄为土壤颗粒间静摩擦因数,四因素三水平试验设计详见表 1。

将表 1 的内容录入 Design-Expert 软件中,得到表 2 各因素下的堆积角。

据表 2 的试验分析,对堆积角进行回归拟合

表1 土壤参数标定 Box-behnken 试验表

Table 1 Box behnken test table for soil parameter calibration

因素	-1	0	1
$X_1/(J \cdot m^{-2})$	4	6	8
X_2	0.15	0.35	0.55
X_3	0.05	0.075	0.1
X_4	0.32	0.74	1.16

表2 土壤堆积角试验设计方案

Table 2 Design scheme of soil accumulation angle test

序号	$X_1/(J \cdot m^{-2})$	X_2	X_3	X_4	堆积角/(°)
1	8	0.55	0.075	0.74	33.70
2	6	0.35	0.050	0.32	42.64
3	4	0.55	0.075	0.74	22.80
4	8	0.35	0.100	0.74	66.17
5	4	0.35	0.100	0.74	42.00
6	4	0.15	0.075	0.74	53.00
7	4	0.35	0.075	1.16	36.65
8	6	0.35	0.075	0.74	48.77
9	4	0.35	0.050	0.74	28.98
10	6	0.55	0.075	1.16	26.04
11	6	0.15	0.050	0.74	48.73
12	6	0.15	0.075	1.16	52.60
13	4	0.35	0.075	0.32	37.98
14	6	0.35	0.075	0.74	53.41
15	8	0.15	0.075	0.74	49.95
16	6	0.55	0.100	0.74	32.07
17	8	0.35	0.075	0.32	60.47
18	6	0.35	0.075	0.74	49.09
19	6	0.15	0.100	0.74	54.17
20	8	0.35	0.075	1.16	63.05
21	6	0.35	0.075	0.74	54.13
22	6	0.55	0.050	0.74	21.45
23	6	0.35	0.100	0.32	59.16
24	8	0.35	0.050	0.74	57.18
25	6	0.35	0.050	1.16	42.43
26	6	0.55	0.075	0.32	28.06
27	6	0.35	0.075	0.74	49.10
28	6	0.15	0.075	0.32	54.92
29	6	0.35	0.100	1.16	52.56

分析,得到回归方程为:

$$y = 50.9 + 9.09X_1 - 12.44X_2 + 5.39X_3 - 0.82X_4 + 3.49X_1X_2 - 1.01X_1X_3 + 0.98X_1X_4 + 1.29X_2X_3 + 0.075X_2X_4 - 1.60X_3X_4 - 0.91X_1^2 - 10.21X_2^2 - 1.46X_3^2 - 0.33X_4^2 \quad (2)$$

方差分析如表3所示。对模型进行方差分析得出:当 P 值小于0.01时,模型为极显著,表3中

失拟项为0.0713,大于0.05,表明回归模型可靠,拟合程度达到预期;校正决定系数 R_{Adj}^2 为0.8326,表明所研究因素对结果影响可以解释83.26%试验。其中,一次项 X_1 表面能、 X_2 碰撞恢复系数对堆积角的影响为极显著, X_3 动摩擦因数对堆积角的影响为显著;交互项中显示,为不显著,证明各因素交互作用对堆积角影响不大;二次项 X_2^2 对堆积角的影响显著。

采用 Design-Expert 软件的 Optimization 模块,将堆积角目标设为 39° ,其他参数选用上述范围值,计算后得出各因素最佳参数:表面能为 $4.19 J/m^2$,碰撞恢复系数为0.282,动摩擦因数为0.051,静摩擦因数为0.629时,堆积角响应值最贴合 39° 。

将此参数录入 EDEM 软件中得出仿真结果,如图7所示。仿真得出堆积角为 37.75° ,与实际堆积角参数误差为3.2%,接触参数选取合理。

1.2.4 就地翻土犁材料参数

就地翻土犁包括犁铧、犁颈、犁胸和犁翼,犁铧磨损最为严重,一般选用耐磨性较强的65 Mn 钢材^[22],犁颈、犁胸、犁翼部分采用 Q275 钢材,翻阅文献[23]得到材料参数泊松比为0.3,密度为 $7850 kg/m^3$,剪切模量为 $7.9 \times 10^{10} Pa$ 。阅读文献[24]选取犁体与土壤接触参数碰撞恢复系数0.3、犁体与土壤静摩擦因数0.5、犁体与土壤动摩擦因数0.05。

1.3 设施农业就地翻土犁设计参数选择

普通铧式犁的制造方法实质是一代代仿制的经验设计法和边制边改的试修法,对犁壁曲面几何参数与某种土壤理化性质之间的关系很少有研究突破^[25]。本文以经验设计研究犁体参数间的交互作用。

1.3.1 犁体耕作幅宽

设施农业中病菌、杂草残根、虫卵主要存在于0~200 mm的土壤层^[26,27],若要改善土质,土壤耕翻势必将200 mm表层土壤翻至犁沟底部。铧式犁耕宽及耕深问题研究^[28]显示,犁体耕宽与耕深比为1.14~1.56,定义犁体耕宽为228~312 mm。

1.3.2 犁铧角度

犁铧起土原理属三面楔原理,犁铧安装角 θ_0 与切土角 ϵ 的取值范围参考农业机械设计手册所标定的碎土型犁体 $\theta_0=40^\circ \sim 45^\circ$, $\epsilon=20^\circ \sim 30^\circ$,翻土型犁体 $\theta_0=35^\circ \sim 40^\circ$, $\epsilon=15^\circ \sim 25^\circ$ 。本研究犁型

表 3 堆积角试验设计方差分析

Table 3 Analysis of variance of stacking angle experimental design

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	3977.01	14	284.07	10.95	<0.0001	**
X_1	992.08	1	992.08	38.23	<0.0001	**
X_2	1856.30	1	1856.30	71.54	<0.0001	**
X_3	349.06	1	348.06	13.45	0.0025	*
X_4	8.17	1	8.17	0.31	0.5836	
X_1X_2	48.65	1	48.65	1.87	0.1925	
X_1X_3	4.06	1	4.06	0.16	0.6984	
X_1X_4	3.82	1	3.82	0.15	0.7069	
X_2X_3	6.71	1	6.71	0.26	0.6191	
X_2X_4	0.023	1	0.023	8.671E-004	0.9769	
X_3X_4	10.21	1	10.21	0.39	0.5406	
X_1^2	5.34	1	5.34	0.21	0.6571	
X_2^2	676.45	1	676.45	26.07	0.0002	*
X_3^2	13.75	1	13.75	0.53	0.4787	
X_4^2	0.70	1	0.70	0.027	0.8719	
残差	363.26	14	25.95			
失拟项	335.47	10	33.55	4.83	0.0713	
误差项	27.79	4	6.95			
总和	4340.27	28				

注：“**”表示极显著，“*”表示显著。

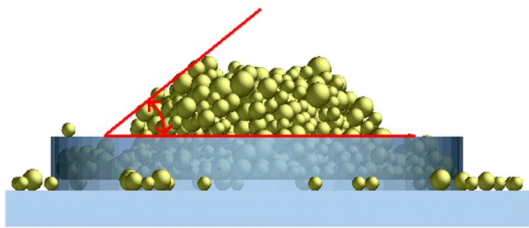


图 7 堆积角仿真值

Fig. 7 Simulation value of stacking angle

属于翻土与碎土结合型犁体,因此,角度取值包含碎土型和翻土型角度值,犁铧安装角 θ_0 取 $35^\circ \sim 45^\circ$,切土角 ϵ 取 $25^\circ \sim 30^\circ$ 。

1.3.3 导曲线提升角

就地翻土犁导曲线为一段空间曲线,如图 8 和图 9 所示,寻找此曲线规律后发现“导曲线”由俯视图和侧视图共同定义。

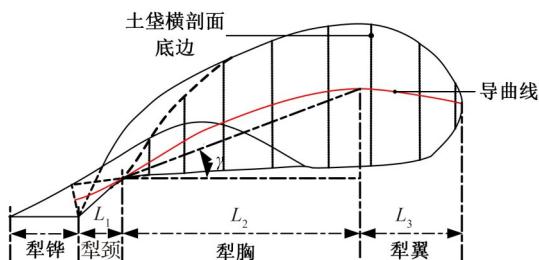


图 8 就地翻土犁侧视图

Fig. 8 Side view of plow body

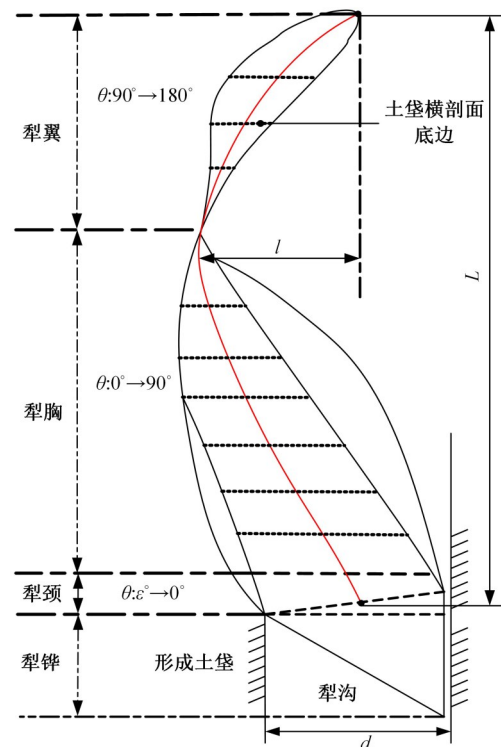


图 9 就地翻土犁俯视图

Fig. 9 Top view of plow body

曲线侧视图最高点为土堡翻转 90° 位置,导曲线最高点与土堡横剖面底边零度线所在点连线与水平面夹角称为提升角,用 γ 表示,提升角公

式为:

$$\gamma = \arctan \frac{d}{2L_2} \quad (3)$$

式中: γ 为导曲线提升角; d 为就地翻土犁耕作幅宽; L_2 为就地翻土犁犁胸在前进方向上的长度。

导曲线提升角取值既决定犁体横剖底边 0° 线至横剖底边 90° 线长度,又决定土壤在犁胸上的行走速度。角度小则犁胸长、土壤行走缓、阻力大;角度大则犁胸短、土壤行走急、阻力小,但角度大则耕作效果达不到预期。尽力去寻找合适角度,根据犁胸长度 L_2 与耕宽 d 定义提升角取值范围为 $19.52^\circ \sim 29.06^\circ$ 。

在俯视图上,距离犁沟中线最远位置,此点与犁沟中线距离称为开度,用 l 表示,开度 l 将会直接影响土垡运动轨迹,在高度一定时,开度越大,曲面越平坦,土垡易于通过,阻力较小,但是碎土能力较弱。

根据《农业机械手册(上册)2007版》记录的碎土型犁与翻土型犁体,耕宽 $200 \sim 350 \text{ mm}$ 所对应的开度 l 为 $140 \sim 190 \text{ mm}$ 。

1.3.4 犁体长度

犁体前进方向定义犁颈、犁胸、犁翼长度,土垡经过所以上三步即为犁体总长度 L 。犁颈是土垡横剖面底边和地面的夹角由 ϵ 变为 0° ,在犁耕作前进方向的一段犁体,定义为 L_1 ;犁胸是土垡横剖面底边与地面夹角由 0° 变为 90° ,定义为 L_2 ;犁翼是将垂直的土垡扣翻入犁沟内,定义为 L_3 。对于犁体各部长度的初探,最终总长定为 584 mm ,犁颈土垡变化角度较小,定义 L_1 为 90 mm ,占总长的 15.41% ;犁胸部所需引导土垡角度变化较大,所需长度应增大,故定义 L_2 为 300 mm ,占总长的 51.37% ;犁翼部所需引导土垡角度变化虽为 90° ,但因重力作用土垡不可能完全贴合在犁体曲面达到 180° ,所以定义长度 L_3 为 194 mm ,占总长的 33.22% 。犁体合适长度还需寻找,定义 L 取值范围为原定长度 584 mm 的 $\pm 10\%$,即 $525.6 \sim 642.4 \text{ mm}$,其中犁颈、犁胸、犁翼所占比例不变。

1.3.5 耕作速度

设施农业短途作业不同于大田长距离作业,寿光第7代日光温室最长 300 m ^[29],受日光温室长度限制,设施农业中动力机具前进速度为 $4.5 \sim 7 \text{ km/h}$ ^[30,31],需适配动力机具的速度,故选取 $4.5 \sim 7 \text{ km/h}$ 为就地翻土犁前进速度。

2 犁体耕作效果优化

此环节采用Solidworks软件创建多个犁体,并将其存为STL*格式输入EDEM软件进行耕作效果评价,结合普遍应用在农业机械研究中的试验设计法,将可控参数进行定义^[32],研究模拟机具作业时相关参数对耕作效果的影响^[33],并将仿真结果进行实地试验。

2.1 原沟落土率

对于所测犁体能否在空间狭小的环境中实现土壤深翻,同时保证立柱稳定性,要选用一项指标来进行评价。本文通过EDEM软件后处理部分创新性引入原沟落土率概念,所谓原沟落土率是观察犁体能够实现原沟落土的多少,利用Grid Bin Group模块将模型的土壤颗粒床框选,得出框内土壤颗粒的总体积,然后进行犁体耕作仿真实验,在犁体耕作后,因一部分颗粒在犁体作用下被耕翻至一旁或者耕翻至颗粒床表层,导致框选内的颗粒因犁体耕作而变少,其体积也出现变化,耕作前后框选内的颗粒体积之比即为原沟落土率,其效果如图10所示。原沟落土率高,则表明犁体在设施农业空间中原沟翻土效果好。

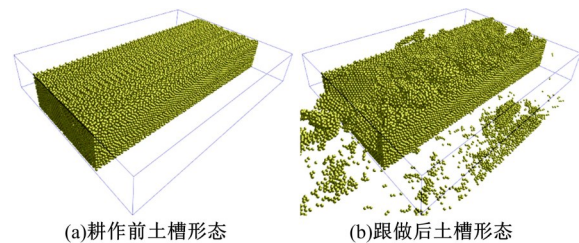


图10 原沟落土率测量

Fig. 10 Measurement of soil falling rate of original ditch

求出耕作前土槽体积和耕作后土槽体积之比为犁体耕作的原沟落土率,其公式如下所示:

$$F = V_b \times \frac{1}{V_a} \quad (4)$$

式中: F 为原沟落土率, $\%$; V_a 为耕作前土槽体积, m^3 ; V_b 为耕作后土槽体积, m^3 。

2.2 筛选关键原则

Plackett-Burman筛选试验是一种特殊二水平部分因子试验设计方法,在影响因素较多的情况下,确定诸多因子中影响响应变量最显著的因子^[34],就地翻土犁试验的响应指标是原沟落土率,对就地翻土犁耕深(mm)、耕宽(mm)、犁铧安装角($^\circ$)、切土角($^\circ$)、导曲线提升角($^\circ$)、开度

(mm)、犁体长度(mm)、耕作速度(km/h)8个影响因素外加3个虚拟变量进行考察,共12组试验,筛选出影响响应指标的主要因素。试验因素及水平如表4所示。

表4 犁体待确定参数取值范围

Table 4 Range of parameters to be determined for plow body

因素	编码	低水平(-)	高水平(+)
耕深/mm	X_1	200	250
耕作幅宽/mm	X_2	228	312
犁铧安装角/(°)	X_3	35	45
切土角/(°)	X_4	25	30
导曲线提升角/(°)	X_5	19.52	29.06
开度/mm	X_6	140	190
犁体长度/mm	X_7	525.6	642.4

将各犁体模型进行仿真实验,如图11所示。对12水平试验完成后得到的原沟落土率参数进行分析,如表5所示。

各影响因素效应评价如表6所示。

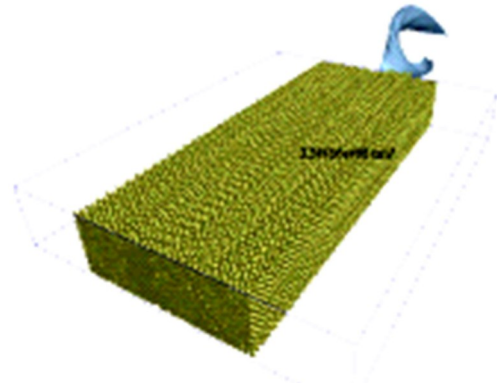


图11 犁体仿真实验

Fig. 11 Plough simulation test

表5 Plackett-Burman 试验表

Table 5 Plackett Burman test table

序号	X_1 /mm	X_2 /mm	X_3 /(°)	X_4 /(°)	X_5 /(°)	X_6 /mm	X_7 /mm	X_8 /(km·h ⁻¹)	X_9	X_{10}	X_{11}	原沟落土率/%
1	250	312	35	30	29.06	190	525.6	4.5	-1	1	-1	80.67
2	200	312	45	25	29.06	190	642.4	4.5	-1	-1	1	78.12
3	250	228	45	30	19.52	190	642.4	7	-1	-1	-1	79.48
4	200	312	35	30	29.06	140	642.4	7	1	-1	-1	78.44
5	200	228	45	25	29.06	190	525.6	7	1	1	-1	81.69
6	200	228	35	30	19.52	190	642.4	4.5	1	1	1	79.89
7	250	228	35	25	29.06	140	642.4	7	-1	1	1	81.20
8	250	312	35	25	19.52	190	525.6	7	1	-1	1	83.65
9	250	312	45	25	19.52	140	642.4	4.5	1	1	-1	77.53
10	200	312	45	30	19.52	140	525.6	7	-1	1	1	73.45
11	250	228	45	30	29.06	140	525.6	4.5	1	-1	1	80.55
12	200	228	35	25	19.52	140	525.6	4.5	-1	-1	-1	83.48

表6 Plackett-Burman 试验设计各因素效应评价

Table 6 Effect evaluation of factors in Plackett-Burman experimental design

因素	效应	系数	标准误差	贡献值	平方和	是否显著
截距		79.85	0.22			
X_1	1.34	0.67	0.22	6.26	5.35	否
X_2	-2.40	-1.20	0.22	20.31	17.35	是
X_3	-2.75	-1.38	0.22	26.58	22.72	是
X_4	-2.20	-1.10	0.22	16.97	14.50	是
X_5	0.53	0.27	0.22	0.99	0.85	否
X_6	1.48	0.74	0.22	7.64	6.53	否
X_7	-1.47	-0.74	0.22	7.60	6.50	否
X_8	-0.39	-0.19	0.22	0.53	0.45	否
X_9	0.89	0.45	0.22	2.79	2.39	否
X_{10}	-1.55	-0.77	0.22	8.42	7.19	否
X_{11}	-0.74	-0.37	0.22	1.91	1.64	否

据表 6 初步分析各因素对响应值的影响,贡献值显示, X_2 (Tillage width) 贡献值为 20.31%、 X_3 (Plowshare mounting angle) 贡献值为 26.58%、 X_4 (Cutting angle) 贡献值为 16.97%, 明显高于其他因素, 判定这 3 个因素为影响响应值的显著因素。

通过表中的效应栏得出 X_2 、 X_3 、 X_4 三个因素值都是负数, 证明因素均为负效应, 在耕宽增大、犁铧安装角增大、切土角增大后原沟落土率呈降低趋势, 因此, 在后续改进试验中要将耕宽、犁铧安装角、切土角 3 个值相应减小。 X_9 、 X_{10} 、 X_{11} 虚拟因素对原沟落土率的影响值分别为 2.79%、8.42%、1.91%, 由于 X_{10} 的 8.42% 比 X_1 、 X_5 、 X_6 、 X_7 、 X_8 、 X_9 、 X_{11} 的值大, 表明该线性模型可以应用。经影响因素分析, 得出影响指标各因素线性回归方程:

$$Y = 79.85 - 1.2X_2 - 1.38X_3 - 1.10X_4 \quad (4)$$

ANOVA 模型分析得出 Prob(P) > F 值为 0.0354, 说明回归方程有意义; 拟合度 R-Squared 值越趋向于 1, 说明对所考察因素拟合程度越好, 而本试验分析中拟合度为 0.6386, 证明该模型所观察区域拟合较好; 校正决定系数 $R_{Adj}^2 = 0.5030$, 表明此方程拟合成功; 对于回归方程的精确度, 用变异系数 (C. v) 表示, 数值越低, 代表精确度越高, C. v 值为 2.46%, 证明此试验具有高可信度和精确度。

2.3 Box-Behnken 优化犁体耕作原沟落土率

2.3.1 回归方程及显著性分析

基于上述分析, 显著因素耕宽 (mm)、犁铧安装角 (°)、切土角 (°) 对于原沟落土率呈现负相关, 则优化重点是减小 3 个因素参数取值, 以原沟落土率 (Soil falling rate of original ditch) 为响应值, 对耕宽 X_1 、犁铧安装角 X_2 、切土角 X_3 进行优化, Box-Behnken 试验设计见表 7。

表 7 Box-Behnken 优化范围取值

Table 7 Value of Box-Behnken optimization range

因素	-1	0	1
X_1 /mm	240	260	280
X_2 /(°)	38	40	42
X_3 /(°)	23	25	27

对于试验分析不显著因素, 按照耕深 200 mm, 导曲线提升角 26°, 开度 180 mm, 犁体长度 584 mm, 因铧式犁耕作速度范围为 4.5~7 km/h, 故选取耕作速度为 5.75 km/h, 为固定参数, 对每

组试验进行仿真分析, 得试验结果分析见表 8。

表 8 Box-Behnken 试验表

Table 8 Box Behnken test table

序号	X_1 /mm	X_2 /(°)	X_3 /(°)	原沟落土率%
1	240	38	25	78.87
2	280	38	25	80.21
3	240	42	25	80.18
4	280	42	25	80.52
5	240	40	23	80.63
6	280	40	23	80.87
7	240	40	27	79.12
8	280	40	27	80.21
9	260	38	23	80.59
10	260	42	23	81.75
11	260	38	27	79.11
12	260	42	27	80.14
13	260	40	25	81.25
14	260	40	25	81.17
15	260	40	25	81.32
16	260	40	25	80.91
17	260	40	25	81.29

根据表 8, 对原沟落土率进行回归拟合分析, 得到回归方程为:

$$Y = 81.19 - 0.38X_1 + 0.48X_2 - 0.66X_3 - 0.25X_1X_2 + 0.21X_1X_3 - 0.032X_2X_3 - 0.72X_1^2 - 0.53X_2^2 - 0.26X_3^2 \quad (5)$$

方差分析如表 9 所示: 当 P 值小于 0.01, 模型为极显著; 表中 P 值失拟项为 0.2602, 大于 0.05, 表明原沟落土率回归模型可靠; 校正决定系数 R_{Adj}^2 为 0.9441, 表明所研究犁体耕宽、犁铧安装角、切土角这 3 个因素对耕地原沟落土率的影响可以解释 94.41% 试验。其中, 一次项 X_1 耕作宽度、 X_2 犁铧安装角、 X_3 切土角对原沟落土率的影响均为极显著; 交互项中只有 X_1X_2 对原沟落土率的影响是显著, 而 X_1X_3 、 X_2X_3 对原沟落土率的影响并不显著; 二次项中 X_1^2 和 X_2^2 对原沟落土率的影响是极显著, X_3^2 对结果的影响为显著。

2.3.2 响应面分析

根据 Model Graphs 给出耕宽、犁铧安装角、切土角 3 个因素对原沟落土率的影响等高线图与响应曲面图分析这 3 个因素的交互关系, 如图 12 所示。

为便于直观因素交互, 调整坐标轴取值范围, 耕宽为 220~300 mm, 犁铧安装角为 36°~45°, 切土角为 17°~29°。图 12(a) 切土角固定 25°, 耕宽

表 9 Box-Behnken 试验设计各因素效应评价

Table 9 Effect evaluation of various factors in Box-Behnken experimental design

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	10.82	9	1.20	31.04	<0.0001	**
X_1	1.13	1	1.13	29.25	0.0010	**
X_2	1.81	1	1.81	46.87	0.0002	**
X_3	3.46	1	3.46	89.33	<0.0001	**
X_1X_2	0.25	1	0.25	6.46	0.0386	*
X_1X_3	0.18	1	0.18	4.67	0.0676	
X_2X_3	0.013	1	0.013	0.11	0.7508	
X_1^2	2.16	1	2.16	55.83	0.0001	**
X_2^2	1.17	1	1.17	30.15	0.0009	**
X_3^2	0.29	1	0.29	7.58	0.0284	*
残差	0.27	7	0.039			
失拟项	0.16	3	0.054	1.97	0.2602	
误差项	0.11	4	0.027			
总和	11.09	16				

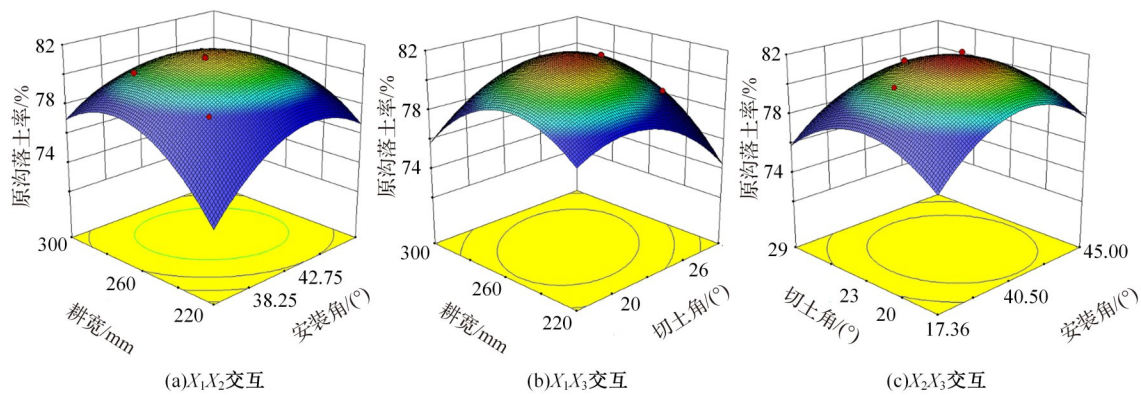


图 12 试验因素对原沟落土率的影响的响应曲面

Fig. 12 Response surfaces of test factor on Soil falling rate of original ditch

与犁铧安装角交互,耕宽在 230~290 mm 范围内且犁铧安装角在 37~43.5°范围内等高线呈闭合状态,响应曲面呈凸形,原沟落土率存在最大值,两因素交互,随着耕宽的增加,原沟落土率数值有明显升高趋向,耕宽为 275 mm 时原沟落土率达到顶峰,当耕宽大于 275 mm 时,原沟落土率开始下降,犁铧安装角同样也是以 36°开始增加时,原沟落土率有非常明显上升的趋势,当犁铧安装角达到 42.5°时,原沟落土率达到顶峰,当犁铧安装角大于 42.5°时,原沟落土率开始下降,但变化幅度相对平缓,表明切土角为 25°,耕宽为 275 mm,犁铧安装角为 42.5°时原沟落土率比较高;图 12 (b)为犁铧安装角固定 40°,耕宽与切土角交互,耕宽在 230~290 mm 范围内且切土角在 18~28°范围内等高线呈椭圆闭合状态,响应曲面呈凸形,原沟落土率存在最大值,两因素交互,耕宽增加,原沟落土率呈现先增后降趋势,增势大于降势,耕宽

为 270 mm 时原沟落土率达到顶峰,之后原沟落土率呈缓慢下降趋势,响应曲面表明,切土角为 22.5°时原沟落土率达到顶峰,此后便呈明显下降趋势;图 12 (c)为耕宽固定 260 mm,犁铧安装角与切土角交互,切土角为 18~28°且犁铧安装角在 38.25~44°范围内等高线呈近似圆形闭合状态,同时响应曲面呈凸形,原沟落土率存在最大值,两因素交互,切土角增大,原沟落土率则呈现先增后降趋势,切土角为 23°时原沟落土率达到顶峰,大于 23°之后,原沟落土率呈现缓慢下降趋势,犁铧安装角 36°开始呈缓慢上升趋势,并在 40.5°时原沟落土率达到顶峰,此后便呈缓慢下降趋势。响应曲面所呈现信息与方差模型分析显著性一致。

利用 Design-Expert 软件中的 Optimization 模块,求最佳化参数,并对试验因素进行限制设定:将原沟落土率目标设为最大值,计算后得出最佳参数

如下:耕宽为278.392 mm,犁铧安装角为40.522°,切土角为23.211°时,回归模型响应面原沟落土率响应值为最大值,原沟落土率为81.166%。

3 犁体试验

实物试验的目的是验证所设计机具的实用性,也是机具推广应用过程中最基础的环节之一。本试验主要验证就地翻土犁能否在设施农业完成作业,观察就地翻土理论是否通过、耕作性能和结构稳定性,以及对比验证仿真实验结果。

3.1 试验介绍

试验地点选于山东省淄博市乐采专业种植合作社(118°27'57"E,36°50'31"),设施内土壤湿度为34.57%,测得表层300 mm土壤贯入阻力峰值为270 N,故选用动力装置(泰山-804FA)轮式拖拉机;挂接装置(1L-560型)犁柱和(1L-220)犁架;测量装置为容重测量环刀和钢板尺。拖拉机带动犁体耕作后查看耕作效果,对土垄垄进行测量,假设土垄垄为一个三棱柱,其横截面为三角形,测量其底边与高度得出其体积。得出原沟落土率,分析仿真模型有效性。

3.2 试验分析

制作耕宽278.392 mm、犁铧安装角40.522°、切土角23.211°犁体、导曲线提升角26°、开度180 mm、犁体长度584 mm的就地翻土犁样机,以调节拖拉机行进速度来改变耕作速度,得到适配速度5.75 km/h,耕作深度是由拖拉机液压三点悬挂控制,其范围为0~35 cm。犁体理论耕深为25~28 cm。试验如图13所示。



图13 犁体试验

Fig. 13 Plough body test

在此参数下进行3次反复试验,实物试验过程中原沟落土率的计算,同样也用体积计算方法,土壤在经过耕作以后,因犁体翻垡作用,土垡形成垄,其横截面呈三等腰三角形,测量其底边与高即可得出垡体积,耕作总体积减去垡体积为原沟落

土体积,原沟落土体积除以总体积即为原沟落土率。得到原沟落土率为78.62%,此结果与预估模型误差为3.13%,得出结论为基于原沟落土率耕作效果预估模型是合理可行的,证明此犁体可以在设施农业空间狭小地块进行耕作,同时保证不会危及设施农业立柱稳定性,可利用原沟翻垡进行病虫害覆盖。

4 结论

(1)通过就地翻土方法研究解决设施农业土壤病虫害问题。扫描得到铧式犁犁体点云数据,并对点云数据进行变异得到逆向曲面,根据水平直元法与翻土曲线族法对逆向曲面进行贴合设计,绘制出参数可调节的正向犁体模型;测得设施内土壤相对含水率为34.57%,此湿度下土壤堆积角为39°,经堆积角试验设计标定土壤颗粒间表面能为4.19 J/m²、碰撞恢复系数为0.282、动摩擦因数为0.051、静摩擦因数为0.629,对就地翻土犁材料参数及接触参数选取。基于犁体制造的试修法及经验设计法,获取就地翻土犁耕深、耕宽、犁铧安装角、切土角、导曲线提升角、犁体开度、犁体长度、耕作速度各参数范围值。

(2)基于EDEM软件后处理模块Grid Bin Group,引入原沟落土率概念,构建原沟落土率预估模型。运用Plackett-Burman筛选试验分析影响原沟落土率最显著因素为耕宽、犁铧安装角、切土角;Box-Behnken试验优化参数最佳值如下:耕宽为278.392 mm、犁铧安装角为40.522°、切土角为23.211°。

(3)制造犁体样机,进行实地试验得出原沟翻土率与预估模型误差为3.13%,就地翻土效果明显,为设施农业解决土壤病虫害问题提供了一条新途径。

参考文献:

- [1] 宋卫堂. 日光温室蔬菜生产全程机械化的一种解决方案[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(9):26-29.
Song Wei-tang. A complete mechanization solution for greenhouse vegetable production[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(9): 26-29.
- [2] 付学谦,周亚中,孙宏斌,等. 园区农业能源互联网:概念、特征与应用价值[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12):152-161.

- Fu Xue-qian, Zhou Ya-zhong, Sun Hong-bin, et al. Park-level agricultural energy internet: Concept, characteristic and application value[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(12):152-161.
- [3] 骆飞, 徐海斌, 左志宇, 等. 我国设施农业发展现状、存在不足及对策[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(10): 57-62.
- Luo Fei, Xu Hai-bin, Zuo Zhi-yu, et al. Current situation, deficiency and countermeasures of China's facility agriculture[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(10):57-62.
- [4] 刘霓红, 蒋先平, 程俊峰, 等. 国外有机设施园艺现状及对中国设施农业可持续发展的启示[J]. 农业工程学报, 2018, 34, 42(15):1-9.
- Liu Ni-hong, Jiang Xian-ping, Cheng Jun-feng, et al. Current situation of foreign organic greenhouse horticulture and its inspiration for sustainable development of Chinese protected agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34, 342(15):1-9.
- [5] 熊平原, 杨洲, 孙志全, 等. 基于离散元法的旋耕刀三向工作阻力仿真分析与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 345(18): 113-121.
- Xiong Ping-yuan, Yang Zhou, Sun Zhi-quan, et al. Simulation analysis and experiment for three-axis working resistances of rotary blade based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 345(18): 113-121.
- [6] 秦柳. 国外设施农业发展的经验与借鉴[J]. 世界农业, 2015, 436(8): 143-146.
- Qin Liu. The development experience and reference of facility agriculture abroad[J]. World Agriculture, 2015, 436(8): 143-146.
- [7] 马廷玺. 土堡原地翻转横排犁[J]. 粮油加工与食品机械, 1978(11): 49-51.
- Ma Ting-xi. Horizontal plow of in-situ tilling soil[J]. Cereals and Oils Processing, 1978(11): 49-51.
- [8] Caky H B A, 王梦熊. 几种类型的正面犁[J]. 粮油加工与食品机械, 1984(12): 30-32.
- Caky H B A, Wang Meng-xiong. Several types of horizontal plows[J]. Cereals and Oils Processing, 1984(12): 30-32.
- [9] 尤玉锴, 陈伊文. 对横排犁研究中几个问题的探讨[J]. 农业机械学报, 1987(3):99-101.
- You Yu-kai, Chen Yi-wen. The research and discussion of several problem about horizontal plow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1987(3):99-101.
- [10] 尤玉锴, 刘明亮, 白立群. 横排犁犁面设计初探[J]. 农机化研究, 1987(2):12-17.
- You Yu-kai, Liu Ming-liang, Bai Li-qun. Preliminary study on the design of horizontal plow surface[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 1987(3): 12-17.
- [11] Junichi K, Wang Shi-xue. Study on a plow to invert furrow slice at the same position (Part 1)[J]. Journal of JSAM, 1993, 55(3):15-22.
- [12] Wang Shi-xue, Junichi K. Study on a plow to invert furrow slice at the same position (Part 2)[J]. Journal of JSAM, 1993, 55(4):33-39.
- [13] Wang Shi-xue, Junichi K. Study on a plow to invert furrow slice at the same position (Part 3)[J]. Journal of JSAM, 1995, 57(5):31-40.
- [14] 宋发成, 刘元义, 邴坤, 等. 基于 TRIZ 理论的就地翻土犁设计[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(4):13-18.
- Song Fa-cheng, Liu Yuan-yi, Bing Kun, et al. Design of in-situ tilling plow based on TRIZ theory[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(4):13-18.
- [15] 于圣洁, 刘元义, 胥备, 等. 设施农业就地翻土犁结构设计及仿真[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(3):66-71.
- Yu Sheng-jie, Liu Yuan-yi, Xu Bei, et al. Design and simulation of in-situ tilling plow in facility agriculture [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(3):66-71.
- [16] 杨继鑫, 戴华伟, 王英俊, 等. 淄博烟区土壤中微量元素特征及重金属风险评价[J]. 中国烟草科学, 2020, 41(6):44-50.
- Yang Ji-xin, Dai Hua-wei, Wang Ying-jun, et al. Distribution characteristics of medium and trace elements and risk assessments for heavy metals in soils in Zibo tobacco-planting region[J]. Chinese Tobacco Science, 2020, 41(6):44-50.
- [17] 魏建林, 谭德水, 宋效宗, 等. 鲁中典型种植区设施番茄养分供需特征研究[J]. 山东农业科学, 2020, 52(11):15-19, 45.
- Wei Jian-lin, Tan De-shui, Song Xiao-zong, et al. Nutrient supply and demand characteristics of greenhouse tomato in typical planting area of central Shandong Province[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2020, 52(11):15-19, 45.
- [18] 刁海忠, 杨小三, 李文全, 等. 桓台县土壤地球化学背景值及分区特征[J]. 山东国土资源, 2021, 37(4): 41-47.

- Diao Hai-zhong, Yang Xiao-san, Li Wen-quan, et al. Geochemical background values of soil and characteristics of geochemical divisions in Huantai County[J]. Shandong Land and Resources, 2021, 37(4):41-47.
- [19] 郑侃,何进,李洪文,等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9):62-72.
- Zheng Kan, He Jin, Li Hong-wen, et al. Research on polyline soil-breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9):62-72.
- [20] 刘俊安. 基于离散元方法的深松铲参数优化及松土综合效应研究[D]. 北京:中国农业大学工学院, 2018.
- Liu Jun-an. Study on subsoiler parameters optimization and comprehensive effect of subsoiling based on the discrete element method[D]. Beijing: College of Engineering, China Agricultural University, 2018.
- [21] Aikins Kojo Atta, Ucgul Mustafa, Barr James B, et al. Determination of discrete element model parameters for a cohesive soil and validation through narrow point opener performance analysis[J]. Soil & Tillage Research, 2021, 213: No. 105123.
- [22] 李金展,马军涛,郑喜平. 热处理工艺对65Mn犁铧力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(4): 215-217.
- Li Jin-zhan, Ma Jun-tao, Zheng Xi-ping. Effect of heat treatment process on mechanical properties of 65 Mn ploughshare[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(4):215-217.
- [23] 成大先. 机械设计手册. 单行本[M]. 北京:化学工业出版社, 2004:5-7.
- [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 Xi-rui, Zeng Wang-qiang, Liu Jun-xiao, et al. Design and experiment of iateritic soil inclined handle folding wing subsoiling shovel based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3):40-49.
- [25] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社, 2016:321-322.
- [26] 习慧梅. 温室大棚设施菜地土壤改良技术[J]. 农村实用技术, 2016(3):28-31.
- Xi Hui-mei. Soil improvement techniques in greenhouses[J]. Practical Technologies of Rural Areas, 2016(3):28-31.
- [27] 赵江涛,崔方,张小平,等. 设施农业土壤改良浅谈[J]. 西北园艺(综合), 2021(1):36-37.
- Zhao Jiang-tao, Cui Fang, Zhang Xiao-ping, et al. Description of soil improvement in facility agriculture[J]. Northwest Horticulture, 2021(1):36-37.
- [28] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2007.
- [29] 李光聚,刘天英,李秀欣,等. 寿光日光温室的发展历程及创新点[J]. 中国蔬菜, 2019(10):14-18.
- Li Guang-ju, Liu Tian-ying, Li Xiu-xin, et al. The development history and innovation points of Shouguang solar greenhouse[J]. China Vegetables, 2019(10):14-18.
- [30] 康建. 日光温室深旋机设计与试验研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学工程学院, 2020.
- Kang Jian. Design and experimental study of deep rotary machine in solar greenhouse[D]. Shenyang: College of Engineering, Shenyang Agricultural University, 2020.
- [31] 刘静,孙闫. 设施大棚履带电动拖拉机电源系统仿真研究[J]. 机械工程师, 2021(2):59-62.
- Liu Jing, Sun Yan. Simulation study on power supply system of a crawler electric tractor for greenhouses[J]. Mechanical Engineer, 2021(2):59-62.
- [32] 翟力欣,姬长英,丁启朔,等. 犁体结构参数与工作参数优化设计[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8):57-62.
- Zhai Li-xin, Ji Chang-ying, Ding Qi-shuo, et al. Optimized design of plough body structural and working parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8):57-62.
- [33] 郑乐,罗锡文,曾山,等. 水稻根茬-土壤复合体剪切特性试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5):63-71.
- Zheng Le, Luo Xi-wen, Zeng Shan, et al. Shear characteristics of rice root-soil composite[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5):63-71.
- [34] 葛宜元. 试验设计方法与 Design-Expert 软件应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2014.