

基于 DEM - MBD 的铲链式花生收获机设计与试验

张 宁¹ 姜成林¹ 毛鹏辉¹ 王扩宇¹ 王东伟² 原鲁明³ 张广军³

(1. 青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109; 2. 黄三角智能农机装备产业研究院, 东营 257345;
3. 青岛万世丰农业科技有限公司, 青岛 266109)

摘要: 针对花生挖掘收获过程中土块分离效率低、落果损失率高等问题,设计了一种铲链式花生收获机。通过对花生植株和土壤颗粒受力情况开展分析,探究了花生植株-土壤复合体在输送去土、翻转放铺过程中的运动规律,并对输送分离装置和翻转铺放装置等结构参数进行了优化设计。基于 DEM - MBD 耦合方法建立了花生植株-土壤-回环输送链仿真模型,并开展花生植株输送去土过程仿真试验,探究了回环输送链速度、回环输送链倾角、振动轮转速对花生植株受力情况的影响规律。开展了花生挖掘收获田间试验,以含土率和落果率为试验指标,求解最优参数组合。田间试验表明:回环输送链速度 1.5 m/s、回环输送链倾角 25°、振动轮转速 150 r/min 时,花生落果率为 2.9%,花生含土率为 6.4%,各项性能指标均满足相关标准的规定。

关键词: 花生收获机; 铲链式; 运动分析; DEM - MBD

中图分类号: S225.7⁺3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)11-0282-10 OSID: 

Design and Experiment of Shovel Chain Peanut Harvester
Based on DEM - MBD

ZHANG Ning¹ JIANG Chenglin¹ MAO Penghui¹ WANG Kuoyu¹ WANG Dongwei²
YUAN Luming³ ZHANG Guangjun³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China
2. Yellow River Delta Intelligent Agricultural Machinery Equipment Industry Academy, Dongying 257345, China
3. Qingdao Wanshifeng Agricultural Technology Co., Ltd., Qingdao 266109, China)

Abstract: Aiming to address the issues of low separation efficiency of soil blocks and high loss rate of fallen fruits during peanut harvesting, a shovel-chain type peanut harvester was designed. Through analysis of the force conditions on peanut plants and soil particles, the motion laws of the peanut plant - soil composite body during the process of transportation without soil, flipping and laying were explored. The structural parameters of the transportation separation device and the flipping and laying device were optimized. Based on the DEM - MBD coupling method, a simulation model of the peanut plant - soil - loop transportation chain was established, and simulation experiments on the peanut plant transportation without soil were carried out to explore the influence laws of the loop transportation chain speed, loop transportation chain inclination angle, and vibration wheel speed on the force conditions of the peanut plants. Field experiments for peanut digging and harvesting were conducted, with the inclusion rate of soil and loss rate of fallen fruits as test indicators. The optimal parameter combination was solved. The field experiments showed that when the loop transportation chain speed was 1.5 m/s, the loop transportation chain inclination angle was 25°, and the vibration wheel speed was 150 r/min, the loss rate of fallen peanuts was 2.9%, the inclusion rate of peanuts was 6.4%, and all performance indicators met the requirements of relevant standards.

Key words: peanut harvester; shovel chain type; motion analysis; DEM - MBD

收稿日期: 2025 - 08 - 14 修回日期: 2025 - 11 - 21
基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52405278)和山东省自然科学基金青年科学基金项目(ZR2024QE377)
作者简介: 张宁(1993—),女,讲师,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail: nzhang23@163.com
通信作者: 王东伟(1981—),男,研究员,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail: w88030661@163.com

0 引言

花生是我国重要的油料作物和经济作物,随着种植规模的增加,机械化收获需求也日益增长^[1-2]。目前,我国花生多采用两段收获方式,第 1 段先利用挖掘收获机将花生植株挖掘去土后放铺于田间,晾晒几天后利用第 2 段花生捡拾收获机完成捡拾、摘果、清选等后续工作^[3]。因此,第 1 段挖掘作业不仅直接影响花生收获质量,且其铺放效果还将进一步影响第 2 段捡拾作业,由此开展花生挖掘收获机具研究,对于提高花生两段化收获具有重要意义。

花生挖掘收获机按挖掘分离装置不同可分为铲夹式、铲链式和铲筛式^[4-5]。铲夹式和铲筛式多用于沙土等松质土壤,在湿黏、盐碱等土壤作业时,土块分离效果差;铲链式采用链条升运、振动去土方式,适用于不同土壤作业,具有适用性强、损失率低等优点。目前国内外专家对铲链式花生收获机开展了相关研究。AMADAS 公司^[6]采用带-圆棒组合式输送装置,能够实现更好去土效果,但整机成本较高,我国花生种植户难以接受;Kelley Manufacturing Company 公司^[7]研发的铲链式花生起收机,采用小尺寸惰轮减少秧果所受冲击,从而减少落果损失,但其后端对置式放铺装置对我国直立式花生放铺效果较差;WARNER 等^[8-9]通过对三点悬挂装置控制,实现挖掘深度可调节,从而降低花生挖掘损失;EVALDO 等^[10]将电液系统应用到花生挖掘输送过程中,实现振动轮转速调控,因而降低损耗。周泉^[11]研制的铲链式低位放铺型花生起收机,通过采用前升后降式输送放铺方式实现花生纵向放铺,但其加长输送链尺寸较大,导致整机长度大幅增加,不利于田间调头作业;高连兴等^[12]提出了一种翻转滑栅放铺方法,为铲链式花生收获机改进铺放方式提供了新思路;蔡依琳^[13]对铲链式花生收获机挖掘、输送、去土、放铺等部件进行设计,为铲链式花生收获机的研究提供了参考。综上所述,铲链式花生收获机的研究相对较少,通过改变结构形式,实现作业要求,但未深入研究输送分离装置结构参数对作业性能的影响,对作物-土壤-机械作用机理研究不够明确。

随着计算机技术的发展,利用 DEM-MBD 耦合仿真方法探究土壤-作物-部件作用机理越来越广泛^[14]。程子文等^[15]通过离散元仿真对马铃薯收集装袋过程开展研究,确定了集薯装袋顺序对马铃薯损伤率的影响;高波等^[16]分析了根茎类中药材在土堡筛面破碎过程,为黏重土壤条件下根茎类作物收获提供研究思路;XIE 等^[17]通过离散元仿真为研究

农机行走机构与土壤中混合秸秆的相互作用机理提供了一种更为精确的仿真模型;LIN 等^[18]通过 DEM-MBD 耦合仿真探究了铲式整地机-秸秆-土壤互作机理,提高了秸秆在土壤中的均匀性。

针对现有花生挖掘收获存在的土块分离效率低、花生落果损失率高等问题,设计一种铲链式花生收获机,开展花生植株输送过程及土块破碎分离过程运动分析,构建花生植株-土壤-回环输送链 DEM-MBD 耦合模型并开展仿真分析,明确不同作业参数对土块分离和花生落果的影响规律,确定最优作业参数,通过田间试验加以验证,以期为花生挖掘收获技术及装备研究提供理论支撑。

1 整体结构与工作原理

基于我国花生垄作种植农艺,设计了一种适用于一垄两行花生种植模式的铲链式花生收获机,结构如图 1 所示。整机结构由压禾装置、机架、输送分离装置、翻转放铺装置、限深装置、传动装置、聚拢栅条、挖掘装置、防缠秧装置等组成,主要技术参数如表 1 所示。

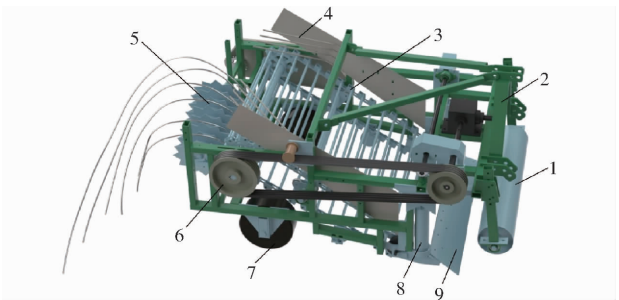


图 1 铲链式花生收获机结构图

Fig. 1 General schematic of shovel chain peanut harvester
1. 压禾装置 2. 机架 3. 输送分离装置 4. 聚拢栅条 5. 翻转放铺装置 6. 传动装置 7. 限深装置 8. 防缠秧装置 9. 挖掘装置

表 1 铲链式花生收获机主要技术参数
Tab. 1 Main technical parameters of shovel chain peanut harvester

技术参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 400×1 400×950
整机质量/kg	400
工作行数	2
作业幅宽/mm	1 100
输送角度/(°)	25

工作时,挖掘装置前方的压禾装置将花生植株向前压倒,挖掘装置在限深装置作用下,以规定深度将压倒的植株带土挖出,挖掘铲两侧设有主动旋转防缠秧装置,防止秧蔓缠绕堵塞,随后带土的花生植株进入输送分离装置,振动轮对植株振动去土,去土

A ——花生植株与链杆接触面积, mm^2

接触面积 A 与跌落高度 h_1 的关系可简化为^[20]

$$A = \delta h_1 \tag{12}$$

式中 δ ——花生植株形变系数

由式(11)、(12)得

$$F = \frac{\sigma \delta \left(a \omega_1 \sin(\omega_1 t + \varphi) - \frac{v_s \sin \theta}{\lambda} \right)^2}{2g \cos \theta} \tag{13}$$

由式(13)可知,花生植株在回环输送链上的受力主要与回环输送链速度、回环输送链倾角、振动轮角速度有关。

2.1.3 土块破碎分离过程运动分析

为探究土块在回环输送链上的破碎分离机制,确定影响其破碎效果的关键因素,对回环输送链上的土块开展运动分析。如图 4 所示,花生植株-土块复合体进入输送分离装置后,由回环输送链和振动轮为复合体提供初始起抛速度 v_4 ,在 AC 段被抛起做斜抛运动后掉落至链杆上,附着在花生荚果上的土块与链杆发生碰撞逐渐破裂。随着输送过程持续进行,土块在振动轮振动作用下与链杆发生多次碰撞后逐渐破碎解体,直至尺寸小于相邻链杆间隙,最终从链杆间隙落下。

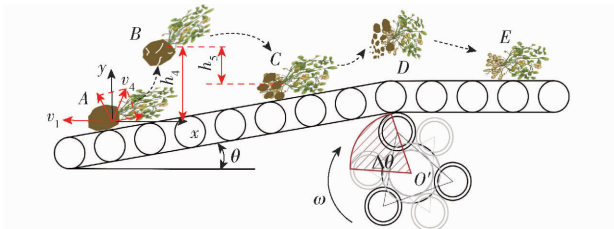


图 4 花生植株-土块复合体运动轨迹示意图

Fig. 4 Peanut plant - soil mixture trajectory diagram

以花生植株-土块复合体质心(点 A)为中心建立坐标系,抛起时初速度为 v_4 ,上升高度 h_4 为

$$h_4 = \sqrt{\frac{v_4^2 \sin^2 \theta}{2g}} \tag{14}$$

对花生植株-土块复合体在 $A-B-C$ 完整抛起-下落阶段分析可知, $A-C$ 阶段损失势能 E_p 为

$$E_p = mg(h_4 - h_5) \tag{15}$$

式中 h_5 ——复合体从点 B 到点 C 的高度差, m

m ——花生植株-土块复合体质量, kg

土块破碎所需能量 ΔE 为

$$\Delta E = \frac{1}{2} m v_4^2 - E_p \tag{16}$$

由于每次振动作用下,复合体在链杆上升高度幅度变化较小,因此可忽略势能对动能损失影响,得到复合体与链杆碰撞过程中的动能损失为

$$\Delta E = \frac{1}{2} m v_4^2 \tag{17}$$

由牛顿第二定律可知,加速度与其所受合外力成正比,即得

$$\Delta E = \frac{t^2}{2m} F^2 \tag{18}$$

由式(18)可知,复合体由链杆抛起瞬间所受接触力越大,作用于土块破碎的能量越多,土块破碎效果越明显。

2.2 翻转放铺装置

2.2.1 翻转放铺装置工作原理及结构设计

完成去土的植株运至回环输送链末端,其速度趋近于链杆线速度,并以抛送姿态掉落至翻转放铺装置中。植株与翻转放铺装置接触瞬间,翻秧星轮齿尖容易打击花生荚果,即产生“打果”现象,从而导致荚果脱落,增加落果损失。因此,对翻转放铺装置开展优化设计,减少翻转放铺过程中翻秧星轮对花生荚果的冲击碰撞,是降低花生落果损失、提高收获质量的重要一环。

如图 5 所示,翻转放铺装置由翻秧星轮和导引栅条组成,通过缩小翻秧星轮工作幅宽并配合聚拢栅条,实现双行花生植株的有效集束输送。基于花生垄作种植模式,参考现有翻转放铺装置^[11-13],同时减少翻秧星轮“打果”现象,翻秧星轮盘采用 6 组周向间歇布置的齿盘式结构,外廓直径 $D_R = 400 \text{ mm}$,齿根圆直径 $D_r = 350 \text{ mm}$,导引栅条末端与水平方向夹角 20° 。同时,翻秧星轮周向设有渐开线弯曲结构的导引栅条,形成曲率半径逐渐递增的导向曲面,栅条间高度差 $\Delta h = 80 \text{ mm}$ 。导引栅条采取间歇布置方式,实现栅条对植株冲击力的渐进性释放,确保翻转放铺过程中植株滑行连贯,翻转顺畅。

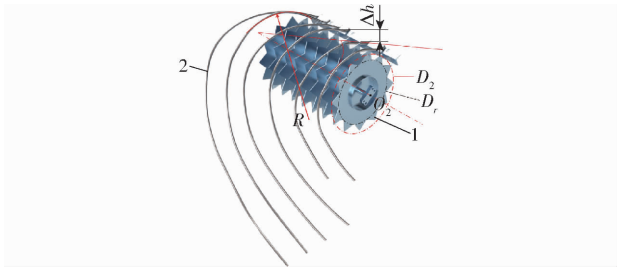


图 5 翻转放铺装置示意图

Fig. 5 Schematic of laying device

1. 翻秧星轮 2. 导引栅条

为保证植株从回环输送链末端至导引栅条过程无碰撞干涉,驱动装置轴心 O_1 (图 3)与万向节轴心 O_2 之间的距离 d 为

$$\frac{1}{2}(D_1 + D_2) < d \leq 100 + \frac{1}{2}(D_1 + D_2) \tag{19}$$

式中 D_1 ——主动轮直径, mm

D_2 ——翻秧星轮直径, mm

代入具体数值后,可得中心距范围: $400 \text{ mm} <$

$d \leq 500$ mm。无碰撞干涉条件下,为保证整机结构紧凑及安装方案可实施,最终确定中心距为 450 mm。

2.2.2 花生植株翻转放铺过程运动分析

花生植株翻转运动如图 6 所示,植株自回环输送带末端掉落至导引栅条,导引栅条呈逐级下降形式,植株逐级下落时产生速度差,并在翻秧星轮拨动及导引栅条引导的共同作用下实现姿态翻转,翻转后以单侧有序姿态铺放于田间。

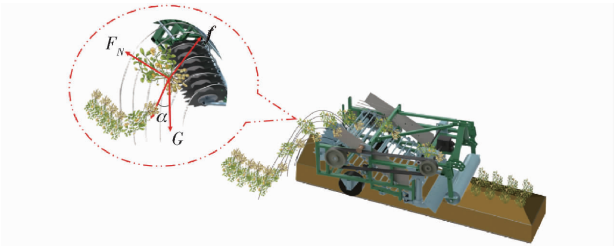


图 6 花生植株翻转运动过程
Fig. 6 Peanut plant turning movement process

植株脱离翻秧星轮时相对于机具前进速度 v' 为

$$v' = \frac{1}{2} D_2 \omega_2 \tag{20}$$

式中 ω_2 ——翻秧星轮角速度,rad/s

花生植株下落过程中所受摩擦力 f 为

$$f = \mu F_N = \mu mg \cos \alpha \tag{21}$$

式中 μ ——花生植株与导引栅条摩擦因数

F_N ——导引栅条对花生植株支持力,N

α ——重力方向与导引栅条夹角,(°)

通过摩擦角试验测得花生植株与聚拢栅条材料间滑动摩擦角为 27°,花生植株与导引栅条间滑动摩擦因数 $\mu = 0.51$ 。

根据花生植株下落过程动能分析可得

$$\frac{1}{2} m v'^2 + mgH' - fl = \frac{1}{2} v_6^2 \tag{22}$$

式中 v_6 ——植株下落速度,m/s

H' ——导引栅条离地间隙,m

l ——植株与导引栅条接触位移,m

联立式(20)~(22)可得

$$v_6 = \sqrt{\frac{1}{4} D_2^2 \omega_2^2 + 2gH' + 2\mu g l \cos \alpha} \tag{23}$$

花生植株下落的同时,机具以速度 v_1 前进,因而植株在水平方向绝对速度 v_7 为

$$v_7 = \cos \alpha \sqrt{\frac{1}{4} D_2^2 \omega_2^2 + 2gH' + 2\mu g l \cos \alpha} - v_1 \tag{24}$$

我国花生种植垄高通常为 100 ~ 150 mm,为避免收获作业时花生垄对导引栅条产生干扰,将导引栅条最低点设置在距离地面 150 mm 高度处。

为保证花生植株落地时姿态稳定,应尽量降低

落地时绝对速度,理想情况下为零速放铺^[21]。根据公式

$$\omega_2 = \frac{2}{D} \sqrt{\frac{v_1^2}{\cos^2 \alpha} - 2gH' + 2\mu g l \cos \alpha} \tag{25}$$

将收获机前进速度按照 1.2 m/s 代入公式(25)可得翻秧星轮角速度 $\omega_2 = 6.32$ rad/s。

根据转速 n 和角速度关系公式

$$n = \frac{60}{2\pi} \omega_2 \tag{26}$$

可得 $n = 60.38$ r/min,考虑实际作业精度,翻秧星轮转速取 60 r/min。

3 DEM – MBD 耦合仿真分析

为优化输送分离装置参数,借助 EDEM 软件与 RecurDyn 软件联合仿真方法模拟花生植株-土块复合物在回环输送链的输送去土过程,探究各因素对作业效果的影响。

3.1 仿真模型建立

根据前期对花生植株尺寸测量,基于 Hertz – Mindlin (no slip) 模型建立花生植株离散元模型;选定 Hertz – Mindlin with JKR 模型建立黏重土壤离散元模型,选择土壤颗粒半径 3 mm,颗粒黏结半径为 3.5 mm。结合文献[22 – 27]确定仿真参数,具体如下表 2 所示。

表 2 仿真参数
Tab. 2 Simulation parameters

材料	本征参数	数值
花生植株	泊松比	0.37
	密度/(kg·m ⁻³)	532
	弹性模量/MPa	17.46
Q235 钢	泊松比	0.3
	密度/(kg·m ⁻³)	7 850
	弹性模量/MPa	7 940
花生植株- Q235 钢	静摩擦因数	0.335
	动摩擦因数	0.013
	碰撞恢复系数	0.138
花生植株-花生植株	静摩擦因数	0.198
	动摩擦因数	0.009
	碰撞恢复系数	0.015
土壤	单位面积法向刚度/(N·m ⁻³)	1.3 × 10 ⁵
	单位面积剪切刚度/(N·m ⁻³)	1.5 × 10 ⁵
	临界法向应力/Pa	1.2 × 10 ⁵
	临界切向应力/Pa	1.0 × 10 ⁵
花生植株-土壤	静摩擦因数	0.42
	动摩擦因数	0.08
	碰撞恢复系数	0.48

在 EDEM 软件 Geometries 几何环境中创建 Material Block,建立单株花生植株-土壤复合体模型

作为 Material Block,生成多株带土花生植株模型,在 RecurDyn 中导入回环输送链几何图形,对其添加运动副约束,通过耦合接口与 EDEM 进行耦合仿真,仿真模型如图 7 所示。

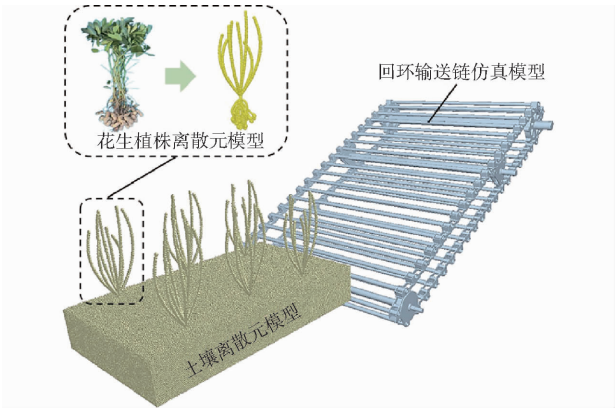


图 7 花生植株-土壤-回环输送链耦合仿真模型

Fig. 7 Coupled simulation model of peanut plant - soil - recycling chain

3.2 单因素试验

在 RecurDyn 中对驱动装置添加 STEP (time, 0.2,0,0.4, -x * pi)运动表达式 (“-”代表运动方向),通过改变 x 取值实现回环输送链速度调节;在 RecurDyn 中添加一个质点,给质点添加与机具约束关系,对回环输送链添加与质点相对关系的 STEP (time,0,0,0.2,y)运动表达式,通过改变 y 取值实现回环输送链倾角调节;对振动轮添加 STEP (time, 0.2,0,0.4, -z * pi)运动表达式,通过改变 z 值实现振动轮转速调节。为减少仿真工作量,对回环输送链模型简化,去除链杆与链节间连接元件。

仿真运动过程如图 8 所示,在 0.30 s 时土壤与链杆开始接触,在振动轮振动作用下,土壤颗粒受到链杆冲击开始破碎,土壤占比不断下降;在 0.95 s 时,花生植株-土壤复合体进入回环输送链,复合体与链杆接触后被瞬间抛起,土壤颗粒不断破碎分离透筛,同时植株在链杆带动下持续向后移动;随后仿真过程不断推进,花生植株-土壤复合体持续分离,直至 3.4 s 时,土壤颗粒完全破碎自链杆间隙中落下,植株完成去土经输送链向后输送至翻转放铺装置。

3.2.1 回环输送链速度对植株受力影响

为探究回环输送链速度对花生植株输送去土过程影响,选取回环输送链速度为 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 m/s 进行试验 (其余变量取中间值),不同回环输送链速度下花生植株受力变化如图 9 所示。

由图 9 可以看出,随着回环输送链速度的增加,花生植株所受的法向力和切向力均逐渐增大。工作过程中回环输送链以“刮擦”形式对果柄产生冲击,冲击力可近似为植株所受切向力,前期果柄拉伸试

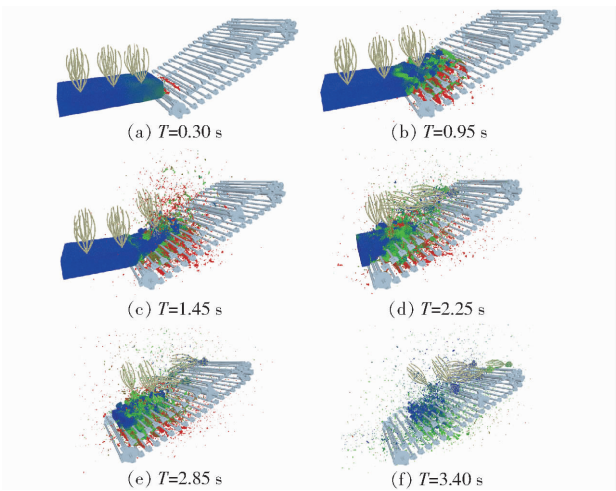


图 8 花生输送去土仿真过程

Fig. 8 Soil block crushing process

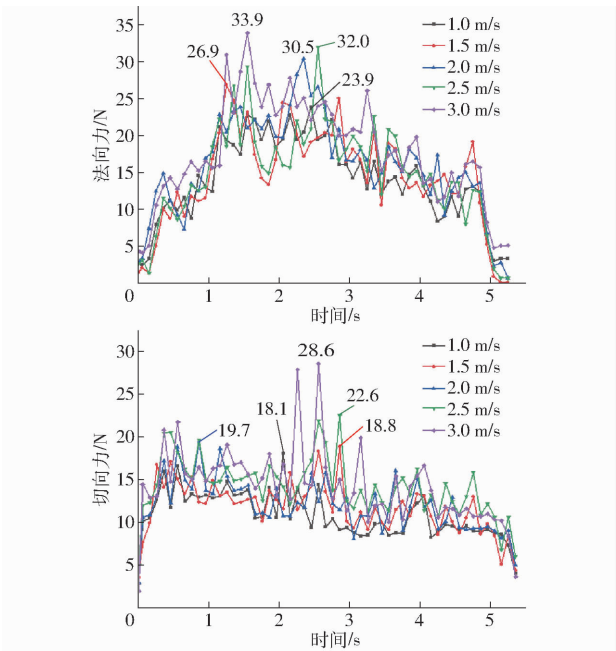


图 9 不同回环输送链速度时花生植株受力变化曲线

Fig. 9 Influence of different loop conveyor chain speeds on force acting on peanut plants

验测得荚果与果柄间拉力为 17.61 ~ 20.32 N,当回环输送链速度为 1.0、1.5、2.0 m/s 时,植株所受的切向力均小于荚果与果柄间拉力,对花生落果影响较小;当回环输送链速度超过 2.0 m/s,切向力多次超过拉力,容易造成荚果掉落,落果率增加。植株所受法向力对土壤破碎影响较大,回环输送链速度越大,法向力越大,土壤破碎程度越高,去土效果越佳。

3.2.2 回环输送链倾角对植株受力影响

为探究回环输送链倾角对花生植株输送去土过程影响,选取回环输送链倾角分别为 15°、20°、25°、30°、35°进行试验 (其余变量取中间值),不同回环输送链倾角下花生植株所受法向力和切向力如图 10 所示。

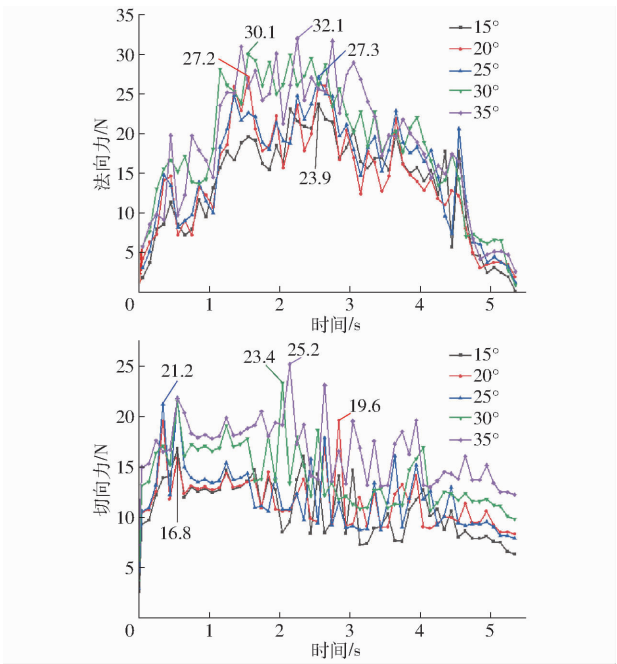


图 10 不同回环输送链倾角时花生植株受力变化曲线
Fig. 10 Influence of different inclinations of closed-loop conveyor chain on force acting on peanut plants

由图 10 可知,随着回环输送链倾角的增加,花生植株所受的法向力和切向力均逐渐增大。当回环输送链倾角较小时,植株所受切向力较小,有利于减少花生落果损失,但此时植株所受法向力也较小,不利于土壤破碎,从而去土效果欠佳。当回环输送链倾角过大时,花生植株受切向力增大,落果损失增加,且倾角较大植株在输送链上容易“回流”,导致物料拥堵,进而降低输送效率并影响去土效果。

3.2.3 振动轮转速对植株受力影响

为探究不同振动轮转速对花生植株输送去土过程影响的规律,选取振动轮转速为 90、120、150、180、210 r/min。不同振动轮转速下花生植株所受法向力和切向力如图 11 所示。

由图 11 可以看出,随着振动轮转速的增加,花生植株所受的法向力和切向力均逐渐增大。当振动轮转速为 90 r/min 时,植株所受的法向力较低,难以破坏花生植株-土块颗粒间黏结力,去土效果差。随着振动轮转速的增加,植株所受法向力不断增大,土块在振动作用下持续碰撞破碎,碎土效果得到提升。当振动轮转速增加至 180、210 r/min 时,植株所受的法向力和切向力均急剧上升,远大于荚果与果柄间拉力,果柄极易因过度碰撞发生断裂,造成较大的落果损失。

4 田间试验

4.1 试验条件

由青岛万世丰农业科技有限公司试制试验机

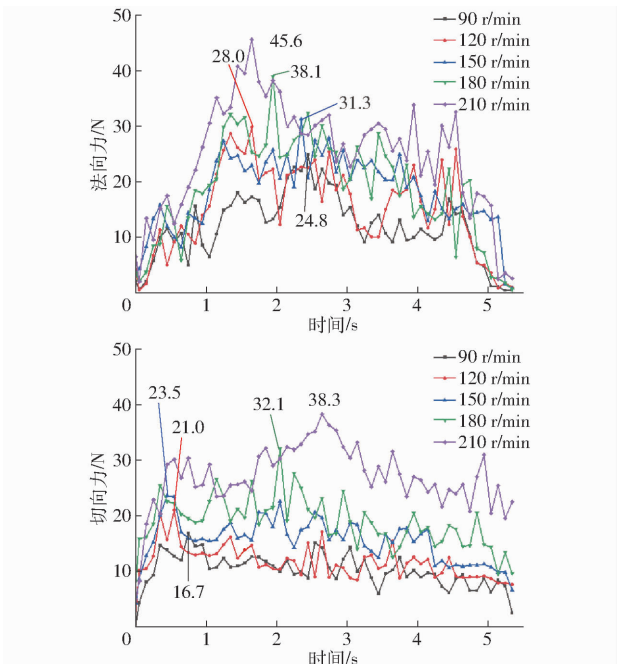


图 11 不同振动轮转速时花生植株受力变化曲线
Fig. 11 Influence of different vibration wheel speeds on force acting on peanut plants

器,在黄三角智能农机装备产业研究院花生试验基地开展试验,试验花生品种为“青花 16 号”,种植模式为一垄两行,垄面宽 80 ~ 90 cm,垄沟宽 25 ~ 35 cm,垄高 12 cm,植株整株高约 51 cm,根果深约 14 cm,试验动力设备为东方红 704 - N 型拖拉机。田间试验如图 12 所示。

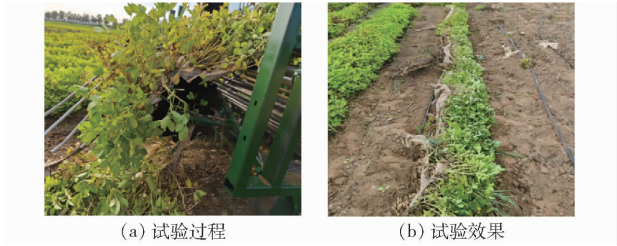


图 12 田间试验
Fig. 12 Field experiment

4.2 试验方案及结果分析

根据 NY/T 502—2016《花生收获机作业质量》标准,以含土率 Y_1 和落果率 Y_2 为试验指标,以单因素仿真试验为基础开展田间试验,因素编码如表 3 所示,试验设计方案及结果如表 4 所示,其中 X_1 、 X_2 、 X_3 为回环输送链速度、回环输送链倾角、振动轮转速因素编码值。

由表 5 可知,含土率 Y_1 回归模型具有极高的显著性 ($P < 0.0001$),失拟项不显著 ($P > 0.05$),表明该模型回归方程拟合较好。影响含土率 Y_1 的显著因素是 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1X_3 、 X_1^2 ,去除不显著因素后,得到试验因素编码值对含土率 Y_1 的回归模型

表 3 正交试验因素编码

Tab. 3 Orthogonal test factors and coding			
编码	因素		
	回环输送链速 度/(m·s ⁻¹)	回环输送链 倾角/(°)	振动轮转速/ (r·min ⁻¹)
-1	1.0	20	120
0	1.5	25	150
1	2.0	30	180

表 4 试验设计与结果

Tab. 4 Experimental design and results					
序号	因素			Y ₁ /%	Y ₂ /%
	X ₁	X ₂	X ₃		
1	0	0	0	6.2	2.7
2	1	1	0	5.2	3.4
3	-1	0	-1	7.6	1.8
4	0	1	-1	6.4	2.7
5	0	0	0	6.2	2.7
6	0	-1	-1	6.7	2.5
7	-1	0	1	7.2	2.4
8	-1	1	0	7.2	2.3
9	0	1	1	5.7	3.1
10	-1	-1	0	7.5	2.0
11	1	0	1	4.8	3.3
12	1	0	-1	5.8	3.1
13	0	0	0	6.1	2.7
14	0	0	0	6.1	2.7
15	0	-1	1	5.9	2.8
16	0	0	0	6.2	2.6
17	1	-1	0	5.4	3.2

表 5 含土率方差分析

Tab. 5 Analysis of variance of soil rate					
来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	10.01	9	1.11	536.82	<0.000 1 **
X ₁	8.61	1	8.61	4 157.16	<0.000 1 **
X ₂	0.125 0	1	0.125 0	60.34	0.000 1 **
X ₃	1.05	1	1.05	507.50	<0.000 1 **
X ₁ X ₂	0.002 5	1	0.002 5	1.21	0.308 3
X ₁ X ₃	0.090 0	1	0.090 0	43.45	0.000 3 **
X ₂ X ₃	0.002 5	1	0.002 5	1.21	0.308 3
X ₁ ²	0.1217	1	0.121 7	58.74	0.000 1 **
X ₂ ²	0.000 1	1	0.000 1	0.050 8	0.828 1
X ₃ ²	0.001 7	1	0.001 7	0.813 1	0.397 2
残差	0.014 5	7	0.002 1		
失拟项	0.002 5	3	0.000 8	0.277 8	0.839 5
误差	0.012 0	4	0.003 0		
总和	10.02	16			

注：** 表示影响极显著(P<0.01),下同。

$$Y_1=6.16-1.04X_1-0.13X_2-0.36X_3-0.15X_1X_3+0.17X_1^2$$

(27)

由表 6 方差分析可知,落果率 Y₂ 回归模型具有

表 6 落果率方差分析

Tab. 6 Analysis of variance of fruit drop rate					
来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	3.02	9	0.335 4	223.62	<0.000 1 **
X ₁	2.53	1	2.53	1 687.50	<0.000 1 **
X ₂	0.125 0	1	0.125 0	83.33	<0.000 1 **
X ₃	0.281 2	1	0.281 2	187.50	<0.000 1 **
X ₁ X ₂	0.002 5	1	0.002 5	1.67	0.237 7
X ₁ X ₃	0.040 0	1	0.040 0	26.67	0.001 3 **
X ₂ X ₃	0.002 5	1	0.002 5	1.67	0.237 7
X ₁ ²	0.006 7	1	0.006 7	4.49	0.071 8
X ₂ ²	0.030 4	1	0.030 4	20.28	0.002 8 **
X ₃ ²	0.000 4	1	0.000 4	0.280 7	0.612 6
残差	0.010 5	7	0.001 5		
失拟项	0.002 5	3	0.000 8	0.416 7	0.751 0
误差	0.008 0	4	0.002 0		
总和	3.03	16			

极高的显著性(P<0.000 1),失拟项不显著(P>0.05),表明该模型回归方程拟合较好。影响落果率 Y₂ 的显著因素是 X₁、X₂、X₃、X₁X₃、X₂²,去除不显著因素后,得到试验因素编码值对落果率 Y₂ 的回归模型

$$Y_2=2.68+0.56X_1+0.13X_2+0.19X_3-0.1X_1X_3+0.09X_2^2$$

(28)

根据方差分析结果,回环输送链速度 X₁、振动轮转速 X₃交互作用对含土率 Y₁和落果率 Y₂影响显著,为更直观地展示其交互作用,对其进行响应面分析,结果如图 13 所示。

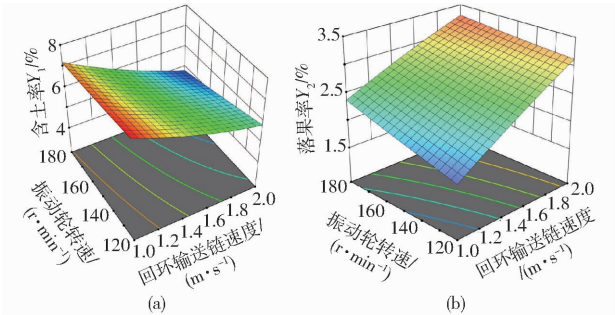


图 13 因素交互作用响应曲面

Fig. 13 Response surfaces of interaction

如图 13 所示,含土率随振动轮转速增加而减小,随回环输送链转速增加而增大。增加振动轮转速提高了输送链抛掷强度,有助于土壤碰撞破碎,降低含土率;而增加回环输送链转速则减少了复合体在输送链上的停留时间,土壤与输送链接触时间缩短因而而破碎不充分,造成含土率升高。落果率随振动轮转速增加而增大,随回环输送链转速增加而减小。振动轮转速的增加对花生荚果的碰撞冲击增强,荚果易掉落造成落果率增加,回环输送链转速的则减少了荚果在输送链上的碰撞停留时间,荚果快

速被运送至后方,碰撞几率减少从而不易掉落。

以含土率和落果率最低为优化目标进行多目标优化,结合边界条件建立约束方程

$$\begin{cases} \min Y_1 \\ \min Y_2 \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (29)$$

求解得到最佳组合参数为:回环输送链速度 1.49 m/s,回环输送链倾角 22.89°,振动轮转速 156.40 r/min,此时,含土率为 6.16%,落果率为 2.67%。考虑实际机具作业条件,确定实际最优参数为:回环输送链速度 1.5 m/s,回环输送链倾角 25°,振动轮转速 150 r/min。

为验证最优参数组合下的作业效果,选取 10 m 测定区域进行作业试验,重复 3 次。含土率试验值为 6.1%、6.3%、6.7%,落果率试验值为 2.7%、3.0%、3.1%,计算含土率与落果率平均值分别为

6.4%、2.9%,与预测值基本一致,符合花生收获作业标准。

5 结论

(1)针对现有花生挖掘收获机存在的土块分离效率低、落果率高的问题,设计了一种能实现挖掘去土、翻转放铺的铲链式花生收获机,开展了花生植株-土壤复合体运动过程力学分析,并对关键装置进行了理论分析与计算。

(2)基于 DEM-MBD 耦合方法进行了花生植株输送去土过程仿真分析,探究不同回环输送链速度、回环输送倾角和振动轮转速对花生植株所受法向力和切向力的影响规律,分析其对含土率和落果率的影响。

(3)开展了花生挖掘收获田间试验,得到铲链式花生收获机运行参数最佳组合:回环输送链速度 1.5 m/s、倾角 25°、振动轮转速 150 r/min,此时含土率和落果率为 6.4%、2.9%,与预测值基本一致,满足预期目标。

参 考 文 献

[1] WANG Shenyang, HU Zhichao, CHEN Youqing, et al. Integration of agricultural machinery and agronomy for mechanised peanut production using the vine for animal feed[J]. Biosystems Engineering, 2022, 219: 135 – 152.

[2] WANG Shenyang, HU Zhichao, YAO Lijun, et al. Simulation and parameter optimisation of pick up device for full-feed peanut combine harvester[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 192: 106602.

[3] 李国防, 陈立东, 张亮, 等. 花生分段收获机械研究现状及应用对策[J]. 花生学报, 2016, 45(1): 61 – 63, 66.

[4] LI Guofang, CHEN Lidong, ZHANG Liang, et al. Research situation and prospect on peanut indirect harvesters[J]. Journal of Peanut Science, 2016, 45(1): 61 – 63, 66. (in Chinese)

[5] 申海洋, 罗伟文, 吴峰, 等. 花生机械化收获装备与技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2024, 55(8): 21 – 38.

[6] SHEN Haiyang, LUO Weiwen, WU Feng, et al. Research progress on mechanized harvesting equipment and technology for peanuts[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 21 – 38. (in Chinese)

[7] 陈中玉, 高连兴, CHEN Charles, 等. 中美花生收获机械化技术现状与发展分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 1 – 21.

[8] CHEN Zhongyu, GAO Lianxing, CHEN Charles, et al. Analysis on technology situation and development of peanut harvest mechanization of China and the United States[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 1 – 21. (in Chinese)

[9] Amadas Industries. Machinery for agriculture[EB/OL]. [2025 – 08 – 15]. <https://amadas.com/agriculture/#Peanuts>.

[10] Kelley Manufacturing Co. Peanut equipment[EB/OL]. [2025 – 08 – 15]. <https://www.kelleyimg.com/>.

[11] WARNER A C, KIRK K R, THOMAS J S, et al. Variable depth peanut digger: Part I — design and testing[C]//ASABE, 2014.

[12] WARNER A C, KIRK K R, THOMAS J S, et al. Variable depth peanut digger: Part II -digging loss analysis[C]//ASABE, 2014.

[13] EVALDO F, ROVERSON P da Silva, ADÃO FELIPE DOS SANTOS, et al. Development of an electrohydraulic drive system for the vibrating conveyor belt of the peanut digger-inverter[J]. Plos One, 2018, 13(10): e0203300.

[14] 周泉. 铲链式低位放铺型花生起收机研制及输送放铺性能试验[D]. 长春: 吉林农业大学, 2022.

[15] ZHOU Quan. Design of shovel-chain type low-laying peanut harvester and performance test of conveying and laying[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[16] 高连兴, 王得伟, 董华山, 等. 链杆式花生起收机翻转放铺装置的设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报, 2016, 47(1): 57 – 63.

[17] GAO Lianxing, WANG Dewei, DONG Huashan, et al. Design and test of turnover laying device of peanut harvester[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2016, 47(1): 57 – 63. (in Chinese)

[18] 蔡依琳. 铲链式花生起收机关键部件设计与试验[D]. 长春: 吉林农业大学, 2024.

[19] CAI Yilin. Design and test on key components of shovel chain peanut digger[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2024. (in Chinese)

[20] 张青松, 郑中原, 廖庆喜, 等. 农业工程领域耦合仿真技术应用现状与展望[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7): 20 – 37,

149.

ZHANG Qingsong, ZHENG Zhongyuan, LIAO Qingxi, et al. Application status and prospect of coupled simulation in agricultural engineering research[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 20－37, 149. (in Chinese)

[15] 程子文,杨德秋,刘萌萌,等. 基于离散元仿真的马铃薯收获机集薯装袋过程研究[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊 2):62－74.

CHENG Ziwen, YANG Deqiu, LIU Mengmeng, et al. Bagging process of potato harvester based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(Supp. 2):62－74. (in Chinese)

[16] 高波,祁玉卓,陈林,等. 根茎类中药材收获机输送分离装置设计[J]. 农机化研究,2025,47(8):52－60.

GAO Bo, QI Yuzhuo, CHEN Lin, et al. Design of conveying and separating device of rhizome Chinese medicine materials harvester machi[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2025,47(8):52－60. (in Chinese)

[17] XIE Dongbo, HE Jiaxun, LIU Tao, et al. Establishment and validation the DEM－MBD coupling model of flexible straw-Shajiang black soil-walking mechanism interactions[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 224:109203.

[18] LIN Jianxin, LIAO Qingxi, WANG Xufeng, et al. Exploring straw movement through the simulation of shovel-type seedbed preparation machine-straw-soil interaction using the DEM－MBD coupling method[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2024,226: 109465.

[19] 李涛,周进,徐文艺,等. 4UGS2 型双行甘薯收获机的研制[J]. 农业工程学报,2018,34(11):26－33.

LI Tao,ZHOU Jin,XU Wenyi, et al. Development of 4UGS2 type double-row sweet potato harvester[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(11):26－33. (in Chinese)

[20] 贺欣,彭强吉,李国明,等. 花生秧根茎碰撞恢复系数测定试验[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊 1):156－164.

HE Xin, PENG Qiangji, LI Guoming, et al. Experoment on determination of recovery coefficient of peanut seedling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(Supp. 1):156－164. (in Chinese)

[21] 何林,官晓东,祝露,等. 花生挖掘条铺机的设计与试验[J]. 农业机械,2023(11):88－93,96.

HE Lin,GUAN Xiaodong,ZHU Lu, et al. Design and experiment of peanut digging and spreading machine[J]. Agricultural Machinery,2023(11):88－93,96. (in Chinese)

[22] 刘泽暘,李新成,王东伟,等. 半喂入式花生联合收获机清选装置优化与试验—基于 EDEM[J]. 农机化研究,2025, 47(12):27－35.

LIU Zeyang, LI Xincheng, WANG Dongwei, et al. Optimization and experiment of cleaning device for semi-feeding peanut combine harvester based on EDEM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2025,47(12):27－35. (in Chinese)

[23] 廖宜涛,廖庆喜,周宇,等. 饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报,2020,51(6):73－82.

LIAO Yitao,LIAO Qingxi,ZHOU Yu, et al. Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(6):73－82. (in Chinese)

[24] 张佳喜,张彭,张虎,等. 新疆棉花秸秆离散元仿真参数标定研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 76－84,108.

ZHANG Jiaxi,ZHANG Peng,ZHANG Hu, et al. Discrete element simulation parameters calibration for Xinjiang cotton straw [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 76－84,108. (in Chinese)

[25] 王伯凯,张鹏,曹明珠,等. 花生捡拾收获机秧蔓输送装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(3):126－137.

WANG Bokai,ZHANG Peng, CAO Mingzhu, et al. Design and experiment of pneumatic conveying device for seedlings of peanut harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(3):126－137. (in Chinese)

[26] 李俊伟,佟金,胡斌,等. 不同含水率黏重黑土与触土部件互作的离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报,2019,35(6): 130－140.

LI Junwei,TONG Jin,HU Bin, et al. Calibration of parameters of interaction between clayey black soil with different moisture content and soil-engaging component in northeast China[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(6):130－140. (in Chinese)

[27] 何晓宁,张学军,赵壮,等. 反向旋抛式油莎豆起挖装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(5):34－43.

HE Xiaoning,ZHANG Xuejun,ZHAO Zhuang, et al. Design and optimization tests of reverse spin-throwing *Cyperus edulis* staring device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(5):34－43. (in Chinese)