

青梗白菜收获低损伤性动态机理分析与试验

王伟静^{1,2} 赵 博^{1,2} 白圣贺^{1,2} 苑严伟^{1,2} 周利明^{1,2} 吕程序^{1,2}
张巍朋^{1,2} 安 然^{1,2} 王英锋³

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083; 2. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083;
3. 中科滕森(山东)智能装备有限公司, 潍坊 262100)

摘要: 针对叶菜收获过程人工收获费时耗力,机械收获机-菜互作机理研究不足,导致机具因作业参数不适配引起植株损伤率高的问题,本文以土下切根作物青梗白菜为研究对象,建立土壤-根系-割刀多体耦合运动模型和夹收损伤模型,分析植株在切根、夹持、集收过程动态机理,揭示损伤率主要影响因素割刀摆动频率、夹持输送带倾斜角及夹持输送速度与前进速度比的关系。运用离散元仿真分析方法建立土壤-根系-割刀团聚体模型,确定割刀最佳频率为4~22 Hz。在标准型和改进型参数的基础上,以切割频率、夹持输送带倾斜角、夹持输送速度与前进速度比为试验因素,以叶菜损伤率为试验指标进行单因素和三因素三水平正交优化试验,得出最优参数组合为切割频率7 Hz、夹持输送带倾斜角18°、夹持输送速度与前进速度比2.1,最优参数组合田间试验平均损伤率为2.12%。研究结果为叶菜低损收获技术研发提供工作参数选取依据和理论基础。

关键词: 多体耦合; 离散元; 夹收损伤; 动态机理; 青梗白菜

中图分类号: S225.92 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)08-0141-12 **OSID:** 

Analysis and Experiment on Dynamic Mechanism of Low Damage
Harvesting of *Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *communis*

WANG Weijing^{1,2} ZHAO Bo^{1,2} BAI Shenghe^{1,2} YUAN Yanwei^{1,2} ZHOU Liming^{1,2} LÜ Chengxu^{1,2}
ZHANG Weipeng^{1,2} AN Ran^{1,2} WANG Yingfeng³

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China
2. State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing 100083, China
3. Zhongke Tengsen (Shandong) Intelligent Equipment Co., Ltd., Weifang 262100, China)

Abstract: Due to the time-consuming and labor-intensive nature of manual harvesting of leafy vegetables, coupled with insufficient research into the interaction mechanisms between harvesting machinery and vegetables, leading to high plant damage rates caused by the incompatibility of operating parameters in machinery, taking the subterranean-root-cutting crop, *Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *communis*, as the research subject, a multi-body coupled motion model for soil-root-cutter interaction and a clamping damage model were established. The dynamic mechanism of plant cutting, clamping, and collection processes was analyzed, revealing that the primary factors influencing the damage rate were the cutter swing frequency, the inclination angle of the clamping conveyor belt, and the ratio of clamping conveyor speed to forward speed. Using discrete element simulation analysis, a soil-root-cutter aggregate model was established, determining the optimal cutter frequency range to be 4~22 Hz. Based on standard and improved parameters, single-factor and three-factor three-level orthogonal optimization experiments were conducted with cutting frequency, clamping conveyor belt inclination angle, and the ratio of clamping conveyor speed to forward speed as experimental factors, and the leafy vegetable damage rate as the experimental indicator. The optimal parameter combination was determined to be a cutting frequency of 7 Hz, a clamping conveyor belt inclination angle of 18°, and a clamping conveyor speed to

收稿日期: 2025-09-17 修回日期: 2025-11-12
基金项目: 山东省重点研发计划项目(2023CXGC010715)
作者简介: 王伟静(1998—),女,博士生,主要从事农业装备智能测控技术研究,E-mail: 2240950713@qq.com
通信作者: 赵博(1981—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业机器人研发与应用研究,E-mail: zhaoboshi@126.com

forward speed ratio of 2.1. The average damage rate in field trials with this optimal parameter combination was 2.12%. The research result can provide a basis for selecting working parameters and a theoretical foundation for the research and development of low-damage harvesting technology for leafy vegetables.

Key words: multi-body coupling; discrete element; clamping-collection damage; dynamic mechanism; *Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *communis*

0 引言

蔬菜作为高附加值经济作物,其生产环节的机械化水平是衡量农业现代化进程的关键指标之一^[1]。据统计,我国蔬菜种植面积常年稳定在 2×10^7 hm² 以上,综合机械化率不足 40%,收获环节机械化率仅为 28%,远低于大宗粮食作物,已成为制约叶菜机械化收获技术推广与应用的突出瓶颈^[2-3]。传统的人工收获劳动强度高,费时耗力且工作效率低。然而,现有机械化收获过程,植株易受切割、挤压、碰撞等冲击载荷影响,导致严重的机械损伤,进而引发品质劣变、贮藏期缩短及商业价值降低,成为叶菜机械化收获亟待攻克的关键技术难题^[4]。深入分析发现,现有叶菜收获技术的机-菜互作损伤机理研究不足,导致机具作业参数与低损伤目标匹配性差,在切根、夹持、集收等核心作业环节易造成植株过度机械损伤,严重阻碍了机收损伤率的有效降低^[5-8]。因此,迫切需要针对叶菜收获各个环节,系统地开展损伤机理研究,明确导致叶菜在收获过程产生损伤的关键影响因素及其作用规律,以期后续收获装备结构优化设计和实现减损收获提供理论支撑。

近年来,国内外学者对叶菜收获机和损伤机理进行了相关研究。ALI 等^[9]分析了卷心菜在输送装置的运动受力状态,研究了连杆长度对机构位置、速度和加速度的影响,模拟了输送装置不同位置对不同几何尺寸卷心菜、输送速度和链节长度的影响,获得了卷心菜损伤率随输送速度的增大而增大规律。WANG 等^[10]设计一种菠菜有序收获机,通过仿真优化和试验分析了不同夹持高度对菠菜变形和等效应力的影响,当转角为 60°、夹持距离为 24 mm、高度差为 20 cm 时,输送损伤率为 3%。王伟^[11]通过对切割过程小青菜运动姿态的变化分析和对底层输送装置进行静力学模态分析,设计一种小青菜有序收获机,当切割速度为 230 mm/s、前进速度为 150 mm/s、输送速度为 210 mm/s 时,收获损失率为 4.97%。高峰^[12]基于 ANSYS Workbench/Ls-dyna 对叶菜茎秆切割过程的动力学分析,设计了叶菜收获机切割装置和夹持输送装置,当前进速度为 0.14 m/s、切割速度为 10 m/s、输送速度为 0.23 m/s 时,损失率为

2.19%。邹亮亮等^[13]基于菠菜植株流变特性,分析了浮动夹持机构与菠菜植株的互作关系,研究了夹持输送过程工作参数对损伤的影响,确定了当输送速度为 25 mm/s、当量弹性系数为 2 N/mm 时,菠菜损伤率为 6.7%。

综上所述,现有关于叶菜收获机械的研究多局限于叶菜收获单个环节的基础力学分析,未能针对机-菜互作过程动态损伤机理进行系统性探究,导致机具特性与作业参数的匹配性参差不齐,制约了机械化收获效率与品质的提升。因此,针对青梗白菜,又名上海青 (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *communis*) 在收获过程(特别是切根、夹持、输送等关键环节)普遍存在的损伤率高的问题,基于宜机化种植农艺和智能电动叶菜收获机,本文建立土壤-根系-割刀动态耦合模型和夹收损伤模型,深入分析叶菜在切割、夹持和集收过程的运动学特性和损伤规律,开展基于 EDEM 软件的离散元仿真试验和田间优化试验,以期叶菜类作物低损收获装备研发提供参考。

1 整机结构与关键部件

1.1 种植农艺

本文以典型的设施土下切根类品种——上海青为研究对象。根据宜机械化收获,农机农艺融合的要求^[14-16],采用宜机化种植农艺,如图 1 所示,行距为 30 cm,垄高为 15 cm,垄距为 150 cm,上垄宽为 110 cm,下垄宽为 120 cm。

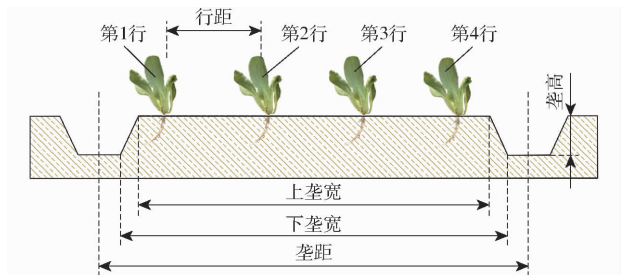


图1 宜机化种植农艺图

Fig. 1 Agronomic map for mechanized planting

1.2 工作原理

智能电动叶菜收获机主要由对行装置、限深机构、切割机构、电控系统、集收装置、夹持输送装置、导航系统和操控平台等部件组成,如图 2 所示。

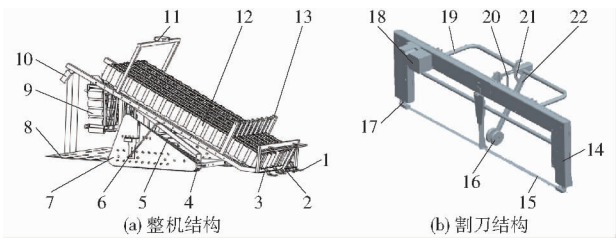


图 2 整机结构

Fig.2 Structure of whole machine

1. 对行装置 2. 限深机构 3. 切割机构 4. 履带 5. 电控系统
6. 夹持输送带倾斜角度调节机构 7. 防护板 8. 集收板 9. 集收装置 10. 操控平台 11. 导航系统 12. 夹持输送装置
13. 行距调节机构 14. 割刀架 15. 割刀 16. 限深轮 17. 摆动机构 18. 电机 19. 限深架 20. 拉簧 21. 曲柄 22. 限深拉杆

收获机通电后,操控平台被激活。工作人员通过操控平台切换至“作业模式”并调节相关作业参数。通过调节夹持输送带倾斜角,使夹持输送装置带动割台绕其中心枢轴点进行切割高度调节,直至达到作物最佳切割高度。工作人员驱动机具移动方向以使其按照垄行行进。在对行装置和切割机构的协同运动作用下,叶菜被有效导入夹持装置,进而传输至集收装置。在此过程,叶菜初始垂直空间位姿被转换为水平输送位姿,完成一次作业。

2 土壤-根系-割刀互作损伤机理分析

2.1 根系多体协同运动分析

植株在切根过程动力学分析如图 3 所示,规定割刀由原始位置向右的单次运动为 $A-A'$ 段,由右向左的单次运动为 $A'-A$ 段,割刀的单次摆动运动为 $A-A'-A$ 段。图 3 为割刀 $A-A'$ 和 $A'-A$ 段的运动分析。

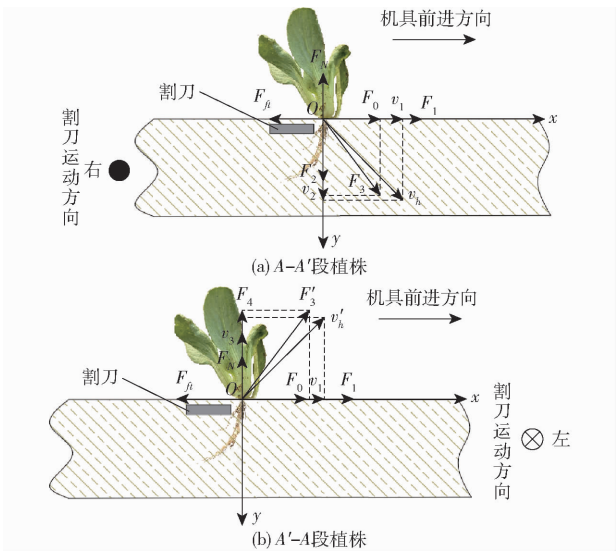


图 3 根系动力学分析

Fig.3 Dynamics analysis of roots

根系在 $A-A'$ 段 x 方向沿机具前进方向做匀速

运动,随着时间 t 变化计算式为

$$s_1 = v_1 t \tag{1}$$

式中 s_1 —— x 方向位移,mm

v_1 ——植株根系沿机具前进方向速度,m/s

摆动机构带动割刀做匀速圆周运动,割刀在 y 方向有效行程计算式为

$$s_L = kR\cos(2\pi f_{u1}t + \varphi) \tag{2}$$

式中 R ——偏心轴承长径,mm

s_L —— y 方向有效行程,mm

k ——割刀劲度系数

φ ——相位角,rad

f_{u1} ——割刀摆动圆频率,Hz

$A-A'$ 和 $A'-A$ 段运动轨迹应向合力方向弯曲且与合速度方向相切,叶菜根系在割刀切割作用下的运动轨迹如图 4 所示。

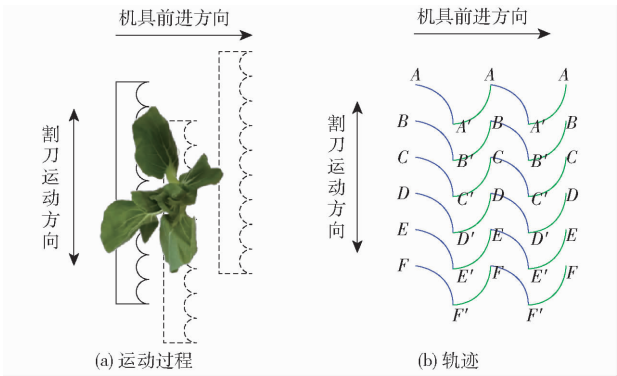


图 4 根系运动轨迹

Fig.4 Trajectory of root

2.2 基于能量耗散机制的根系损伤模型

根据文献[17-18]研究,根系对垄体斜坡有摩擦加筋效应。由图 4b 可知,在切根过程,根系微观运动轨迹呈类周期性振荡的动态特征。此现象对根系周围土壤产生扰动,出现局部疏松现象,削弱了土体抗剪强度。根系能否被成功切断,关键取决于能否克服土壤因加筋作用所增加的土体抗剪阻力^[19-20],根系在割刀作用下可能呈拔出、断裂和固定 3 种力学状态。基于 Griffith 断裂准则^[21],根系裂纹扩展机制如图 5 所示^[22]。

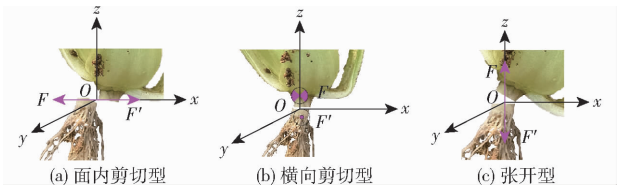


图 5 根系裂纹形式

Fig.5 Forms of root cracking

在根土复合体中,根系失效破坏通常被视为一种张开、面内剪切型裂纹产生的过程^[23]。如图 6a 所示,在切根过程,土体间出现错动,导致土壤剪切

力增大,进而引发根系断裂和拔出,为深入探究其力学行为,将叶菜根系等效为柔性体,建立根-土体相互作用力学模型。植株在生长过程,由于垄体两侧 1、4 行植株受到垄体边坡重力的分力作用,中间垄体 2、3 行植株距离垄体边坡较远,垄体边坡重力的分力对植株生长形态、结构发育和内部应力分布影响较小,故垄体两侧 1、4 行植株承受显著的侧向力,中间垄体 2、3 行植株主要承受垂直方向的土体作用力,侧向力忽略不计。图 6b 为割台高度与夹持输送带倾斜角关系。割台高度通过绕中心枢轴点 O 转动夹持输送装置调节,割台高度上升,夹持输送带倾斜角减小;割台高度下降,夹持输送带倾斜角增大。

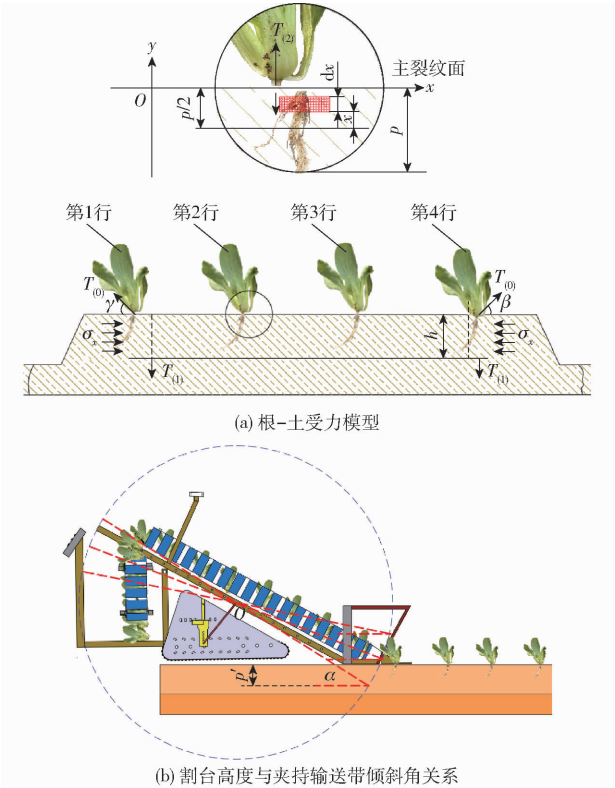


图 6 根-土相互作用力学模型

Fig. 6 Mechanical modeling of root - soil interaction

(1) 中间垄体植株的力学分析

结合植物材料断裂力学理论^[24],在进行根系断裂力学分析时,主要考虑 2 种能量组分:断裂长度为 p 的根段所储存的弹性势能;根系相对于土壤基质发生错动所耗散的变形功。 n 根根系单位截面上相应的断裂功 G_d 计算式为

$$G_d = n \int_{-p/2}^{p/2} (dU_f + dU_{fm}) dx = n \int_{-p/2}^{p/2} \frac{\pi \tau^2}{E_f} \left(\frac{p}{2} + x \right)^2 dx \tag{3}$$

其中
$$dU_f = \frac{\sigma^2}{2E_f} \pi R_f^2 dx \tag{4}$$

$$dU_{fm} = \pi R_f \tau dx u(x) \tag{5}$$

$$u(x) = \int_{-p/2}^x \frac{\sigma}{E_f} dx \tag{6}$$

$$\sigma = \frac{\tau}{R_f} \left(\frac{p}{2} + x \right) \tag{7}$$

式中 σ ——根系断裂时最大拉应力,Pa
 τ ——土体中根系断裂时界面剪应力,Pa
 U_f ——储藏在长度为 dx 的根系弹性势能,kJ
 E_f ——根系弹性模量,Pa
 R_f ——根系平均半径,mm
 $u(x)$ ——单根相对于基本组织移动距离,mm
 U_{fm} ——单根相对土体错动 $u(x)$ 所做功,kJ
 n ——根系数量,根

根系断裂时临界拉应力 σ_1 和 n 根根系单位横截面相应断裂功 G_{d1} 计算式分别为

$$\sigma_1 = \frac{p\tau}{R_f} \tag{8}$$

$$G_{d1} = \frac{V_f p \sigma_1^2}{3E_f} \tag{9}$$

式中 V_f ——土体中根系体积分数
在临界情况下,根系拔出所做功 G_b 计算式为

$$G_b = n \int_0^{p/2} \pi R_f^2 \sigma_2 dx \tag{10}$$

其中
$$\sigma_2 = \frac{(p/2 - x) \tau_1}{R_f} \tag{11}$$

式中 σ_2 ——根系拔出时最大拉应力,Pa
 τ_1 ——根系拔出时界面剪应力,Pa

割刀切根做功 G_u 计算式为
$$G_u = 2\tau_0 L f_{u1} \tag{12}$$

式中 L ——偏心轮单次有效行程,mm
 τ_0 ——茎秆剪切强度,Pa

故割刀所做的功 G_u 亦介于 G_d 和 G_b 之间时,满足条件为

$$G_d \leq G_u \leq G_b \tag{13}$$

综上所述,只有当切根时割刀所做的功 G_u 介于 G_d 和 G_b 之间时,可确保根系被切断且不会被拔出。若 G_u 大于 G_b ,根系直接被拔出,后期仍需人工进行切根;若 G_u 小于 G_d ,根系无法被切断和拔出,损伤率增加。

(2) 两侧垄体植株力学分析

位于垄体两侧的植株根系除受到拉力,还受到垄体斜面对其的侧向力,计算式为

$$\sigma_x = K_0 \sigma_z = K_0 \xi z \tag{14}$$

其中
$$K_0 = \mu / (1 - \mu) \tag{15}$$

式中 σ_z ——土体竖向应力,kPa
 K_0 ——静止土压力系数

σ_x ——土体水平侧向应力, kPa

ξ ——土体容重, kg/m³

z ——土体厚度, mm

μ ——泊松比

在面积为 A 的茎体中, 有 j 个根, 根土复合体所增加总的抗剪强度计算式为

$$\tau_r = \frac{\sum_{j=1}^n T_{(0)j} \cos \beta_j + \sum_{j=1}^n T_{(0)j} \sin \beta_j \tan \phi}{A} \quad (16)$$

$$\text{其中} \quad T_{(0)} = \frac{\sigma_x p}{\cos \beta} \quad (17)$$

式中 τ_r ——茎体两侧土体中根系界面剪应力, Pa

$T_{(0)}$ ——植株斜拉力, N

β ——植株相对于茎面的倾斜角, (°)

ϕ ——土体的内摩擦角, (°)

斜垄作用下根系单位横截面断裂功 G_{dl} 和拔出功 G_{bl} 计算式分别为

$$G_{dl} = n \int_{-p/2}^{p/2} \frac{\pi \tau_r^2}{E_f} \left(\frac{p}{2} + x \right)^2 dx \quad (18)$$

$$G_{bl} = n \int_0^{p/2} \pi R_f \left(\frac{p}{2} - x \right) \tau_r dx \quad (19)$$

故割刀所做的功 G_u 亦介于 G_{dl} 和 G_{bl} 之间时, 满足条件为

$$G_{dl} \leq G_u \leq G_{bl} \quad (20)$$

融合植株在中间、两侧茎体力学分析, 割刀所做功需满足

$$G_u \in \left[\left(\frac{V_d p \sigma_1^2}{3E_f}, \frac{V_d p \sigma_1}{8} \right) \cup \left(\frac{V_d p^2 \tau_r}{8R_f}, \frac{V_d p^3 \tau_r^2}{3E_f} \right) \right] \quad (21)$$

综上所述, 植株损伤主要受割刀作用于根系机械功的影响。模型分析结果表明, 植株损伤率最低发生条件在割刀做功处于特定阈值区间内 (G_a, G_b) $\cup$ (G_{dl}, G_{bl})。割刀做功随割刀摆动频率的增大而增大, 植株损伤率增加。此外, 割刀做功取值与根系断裂长度 p 有关, 断裂长度 p 与切割深度 p' 呈正相关。如图 6b 所示, 切割深度 p' 与夹持输送带倾斜角 α 呈负相关。因此, G_u 的主要影响因素为割刀摆动频率 f_{u1} 、夹持输送带倾斜角 α 。

3 夹收过程植株动态分析

3.1 夹持输送过程

植株进入柔性夹持装置中位置不同, 受到夹持力方向也不同。根据植株在夹持输送装置中的运动状态, 可将其划分为 3 个阶段, 夹持损伤运动模型如图 7 所示。

阶段 I_{cj}: 植株的初始线速度低于夹持输送速

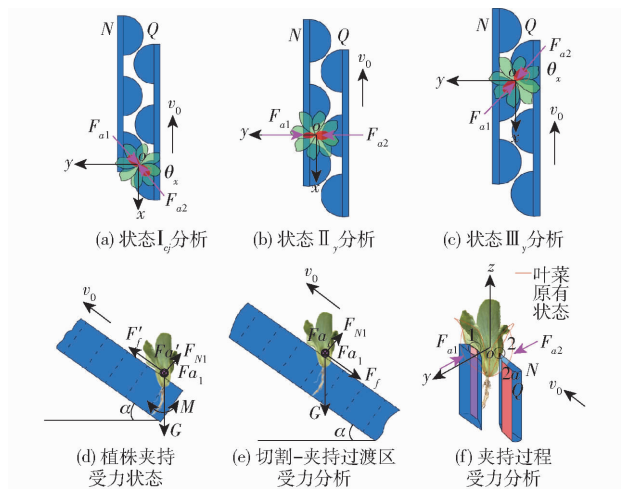


图 7 夹持损伤模型

Fig. 7 Leafy vegetable clamping damage models

度。在割刀往复运动过程, 植株除了受到夹持输送带向上的摩擦力, 还会产生扭转转矩。因此, 阶段 I_{cj} 的主要损伤形式表现为在与夹持输送带接触初始点的挤压损伤、弯曲损伤和冲击损伤, 受力分析如图 7d 所示。

阶段 II_y 和 III_y: 阶段 I_{cj} 中, 植株在夹持输送带方向初始速度为零, 并逐渐加速直至与夹持输送带达到共速状态, 在沿垂直于输送带方向 (y 轴) 的速度逐渐减小至零。与输送带共速后, 植株承受的主要载荷包括双侧夹持输送带的挤压力、两侧夹持输送带的反向弹力、向下的摩擦力以及自身重力。阶段 II_y 和 III_y 中, 植株的主要损伤形式为挤压损伤, 受力分析如图 7e 所示。

在夹持过程, 植株的基径、叶柄以及叶片在夹持力作用下对向收缩。橙色轨迹为叶菜切割后未被夹持的状态, 如图 7f 所示。

假设叶柄部与夹持输送带的碰撞满足 Hertz 接触条件^[25], 将叶柄部等效为圆柱体, 其特征接触区域如图 7f 红色部分所示。叶柄部在产生塑性变形前为完全弹性接触, 最大接触压力 p_0 和两圆柱体轴线间的总变形量 δ 计算式^[26-27] 分别为

$$p_0 = \frac{2F_{a1}}{\pi B l} \quad (22)$$

$$\delta = \frac{2F_{a1}}{\pi E^* l} \left(\ln \frac{4R^*}{B} + \frac{1}{2} \right) \quad (23)$$

其中

$$B = \sqrt{\frac{4F_{a1} R^*}{\pi l E^*}} \quad (24)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (25)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \quad (26)$$

式中 B ——接触区域半宽, m

- F_{a1} ——法向载荷, N
- R^* ——等效曲率半径, m
- l ——接触长度, m
- E^* ——等效弹性模量, Pa
- R_1 ——夹持输送带半径, m
- R_2 ——叶柄部半径, m
- E_1 ——夹持输送带弹性模量, Pa
- E_2 ——叶柄部弹性模量, Pa
- μ_1 ——夹持输送带泊松比
- μ_2 ——叶柄部泊松比

总变形量随着载荷的增大而增大,但增加速率减小。

在阶段 I_{cj}, 割刀往复运动和夹持输送 x 轴分运动使植株与夹持输送装置发生剧烈碰撞冲击。假设质量为 m 的夹持装置以速度 v_1 对叶菜进行冲击, 柔性夹持装置的能量转化为接触变形的弹性能和植株弯曲变形能 2 部分。根系将要被割刀割断时, 将植株等效为悬臂梁, 其变形能计算式为

$$W_b = \frac{p_0 h_0^3}{2 E_2 I} \tag{27}$$

其中
$$I = \frac{\pi d^4}{64} \tag{28}$$

- 式中 W_b ——茎秆弯曲变形能, J
- I ——叶柄部横截面惯性矩, m⁴
- h_0 ——割刀距离根系距离, m
- d ——叶柄部横截面直径, m

根据能量守恒定律有

$$\frac{1}{2} m v_1^2 = \int_0^x p_0(\delta) d\delta + W_b + G_u \tag{29}$$

其中
$$p_0 \approx \sqrt{\frac{E^{*2} \delta}{2 R^* C}} \tag{30}$$

式中 C ——常数

当 v_1 大于叶柄部初始屈服冲击速度时, 叶柄部产生塑性变形, 根据式 (29) 可得到最大冲击压缩量 δ_{max} 计算式为

$$\delta_{max} \approx \left[\frac{5}{4 E^* \pi} \sqrt{\frac{2 C}{R^*}} \left(\frac{1}{2} m v_1^2 - \frac{p_{0p} h_0^3}{2 E_2 I} - G_u \right) \right]^{2/5} \tag{31}$$

式中 p_{0p} ——茎秆法向接触压力, Pa

因此, 叶柄部在夹持-切割过程碰撞变形量的主要影响因素为切根长度和割刀所做的机械功。

3.2 集收过程植株的运动状态分析

集收过程可分为 3 个阶段, 阶段 I 为植株离开夹持输送装置到接触滑辊前的自由运动; 阶段 II 为植株与滑辊接触后, 向集收装置的传递过程; 阶段 III 为植株与集收装置接触, 完成集收作业过程。

在阶段 I 前一时刻, 植株即将离开夹持输送装置, 仍受到夹持输送装置对其的摩擦力, 计算式为

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix} F_f = \begin{bmatrix} m a_{1x} \\ m a_{1y} - G \end{bmatrix} \tag{32}$$

式中 a_{1x} ——植株在 x 方向加速度, m/s²

a_{1y} ——植株在 y 方向加速度, m/s²

F_f ——切割-夹持过渡输送带对植株的摩擦力, N

植株在阶段 I 可能出现 $v_0/v_1 < 1$ 、 $v_0/v_1 = 1$ 、 $v_0/v_1 > 1$ 的 3 种情况, 如图 8a、8b、8c 所示。植株离开夹持输送装置向 x 轴负方向运动条件为合速度方向为 x 轴负方向。阶段 I 合加速度 a_1 计算式为

$$a_1 = \frac{\sqrt{F_f^2 + G^2 + 2 G F_f \sin \alpha}}{m} \tag{33}$$

a_1 方向与合力方向一致, 随 α 增大而增大, x 、 y 方向位移分别随 a_1 增大而减小, 随 a_1 减小而增大, $\alpha \in \left[0, \frac{\pi}{2} \right]$ 。

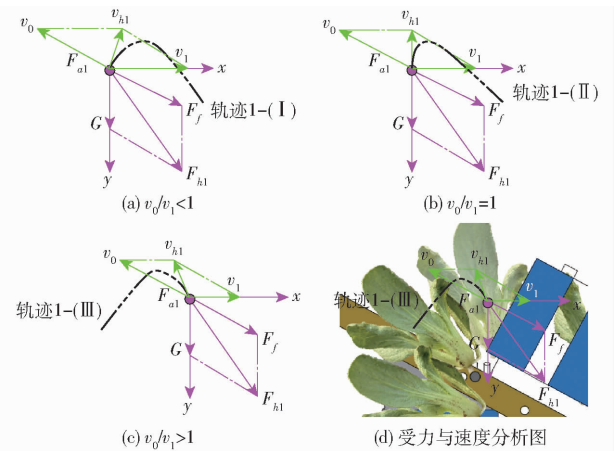


图 8 阶段 I 受力和速度分析

Fig. 8 Force and velocity analysis diagrams for stage I

阶段 II 受力和速度分析如图 9 所示, 植株减小损伤的主要条件为此阶段运动轨迹呈向下收敛型, 即 $v_5/v_{50} \geq 1$ 时, 如图 9a、9b 所示。

由图 9 可知, 植株平动方程为

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_t \\ F_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m a_{1x} \\ G - m a_{1y} \end{bmatrix} \tag{34}$$

其中 $F_t = \sqrt{F_f^2 + G^2 + 2 G F_f \sin \alpha}$ (35)

式中 F_t ——夹持输送带在阶段 I 对叶菜推力, N

a_{1x} ——阶段 II 在 x 方向加速度, m/s²

a_{1y} ——阶段 II 在 y 方向加速度, m/s²

转动方程为

$$M_1 = I_{er} \omega_{er} \tag{36}$$

式中 M_1 ——滑辊转动转矩, N·m

I_{er} ——植株在阶段 II 转动惯量, kg·m²

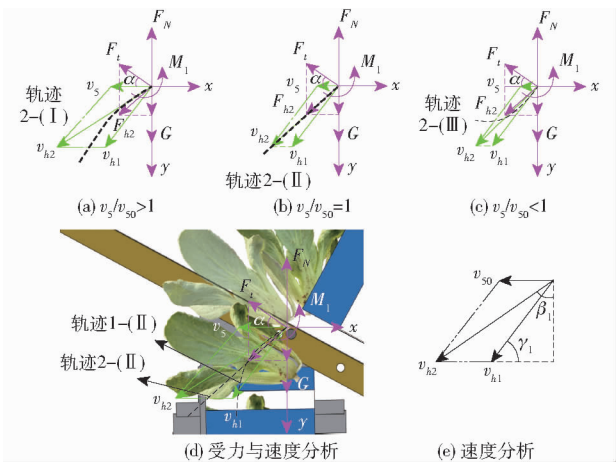


图 9 阶段 II 植株的动态分析

Fig. 9 Dynamic analysis of stage II plants

ω_{er} ——植株在阶段 II 转动角速度, rad/s

根据余弦定理和勾股定理, 阶段 II 植株运动合速度 v_{h2} 计算式分别为

$$v_{h2}^2 = v_{50}^2 + v_{h1}^2 + 2v_{50}v_{h1}\cos\gamma_1 \quad (37)$$

$$v_{h2} = \frac{v_{50} + v_{h1}\sin\gamma_1}{\sin\beta_1} \quad (38)$$

式中 γ_1 —— v_{h1} 与水平面夹角, ($^\circ$)

β_1 —— F_{h2} 与垂直面夹角, ($^\circ$)

v_{50} —— v_{h2} 与 F_{h1} 共线时水平速度, m/s

v_{h1} ——阶段 I 速度, m/s

联立式 (37)、(38) 可得

$$v_{50} = \left\{ \frac{-2\sin\gamma_1 + 2(\sin\beta_1)^2\cos\gamma_1}{2(\cos\beta_1)^2} + \frac{\sqrt{[2\sin\gamma_1 + 2(\sin\beta_1)^2\cos\gamma_1]^2 + 4(\cos\beta_1)^2[(\sin\beta_1)^2 - (\sin\gamma_1)^2]}}{2(\cos\beta_1)^2} \right\} v_{h1} \quad (39)$$

在阶段 III 时, 植株与集收输送带的瞬时接触引发冲击载荷, 其分析方法与先前夹持输送过程的力学分析存在共性, 此处不做赘述。运动过程受力和速度分析如图 10 所示。若集收输送带的输送速度低于阶段 II 叶菜做斜抛运动的末速度, 植株在接触集收输送装置后做加速运动, 增大了植株机械损伤的风险; 若集收输送带的输送速度高于植株斜抛运动的末速度, 将因高速冲击而发生弹跳, 碰撞频率增加, 势能-动能相互转化, 损伤程度显著加剧。阶段 III 加速度 a_{III} 和合速度 v_{h3} 计算式分别为

$$a_{III} = \frac{F_p + F_{f2} - G}{m} \quad (40)$$

$$v_{h3} = \frac{(F_p + F_{f2} - G)\Delta t}{m} + v_6 \quad (41)$$

式中 Δt ——碰撞接触时间, s

F_{f2} ——集收爪对叶菜的摩擦力, N

v_6 ——集收输送带输送速度, m/s

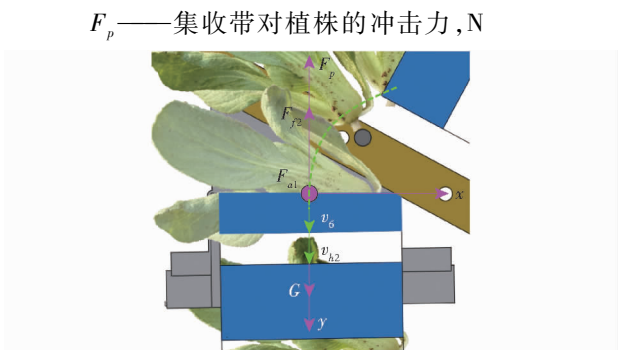


图 10 阶段 III 后一刻动态分析

Fig. 10 Dynamic analysis at moment after stage III

综上所述, 植株的损伤与其运动轨迹直接相关。在阶段 I 中, 为了有效降低植株的损伤, 并确保机械结构间的平稳衔接, x 方向位移和加速度 a_1 不宜过大。在阶段 II 中, 植株在滑辊的作用下做平抛运动, 水平位移是决定植株能否落入集收装置的关键因素。在阶段 III 中, 植株损伤与集收输送速度、植株落入速度直接相关。综上, 集收过程影响植株损伤率的主要因素为夹持输送带倾斜角 α 、前进速度 v_0 和夹持输送速度 v_1 。

4 基于 EDEM 离散元仿真

土壤-根系-割刀团聚体的运动宏观不可见, 切根过程相较于输送过程存在的不确定因素较多, 应用离散元仿真进一步分析根系-土壤团聚体在切割装置作用下的叶菜主根与短缩径间的相对位移, 便于后期田间试验确定切割频率。

4.1 接触模型和参数选取

为了提高仿真结果的精确度, 根据宜机化种植模式设置根系-土壤-割刀团聚体仿真模型。土壤、植株元颗粒均采用 Hertz - Mindlin with Bonding V2 模型。模拟成熟期根茎叶颗粒之间的粘结作用, 观察主根-短缩径之间的破碎断裂程度。通过调研、试验及参考文献 [28 - 31], 确定仿真所需基本物理参数, 如表 1 所示。

4.2 离散元建模

为了保证仿真结果贴合实际, 设置土壤颗粒半径为 5 mm, 颗粒之间接触半径为 5.5 mm^[32]。主根颗粒半径为 6 mm, 接触半径为 6.5 mm; 侧根颗粒半径为 2.0 mm, 接触半径为 2.2 mm; 叶片颗粒半径为 3 mm, 接触半径为 3.3 mm; 短缩径由不同半径颗粒组成, 采用 Meta - Particle 模块生成根茎叶颗粒模型如图 11 所示。

4.3 仿真试验设计

根据宜机化种植模式, 建立 200 mm × 800 mm × 200 mm 的虚拟土槽, 土壤颗粒数为 35 000 个。避免

表 1 仿真试验物理参数

Tab. 1 Physical parameters for simulation tests	
参数	数值
割刀泊松比	0.5
割刀剪切模量/Pa	7.01×10^7
割刀密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 800
土壤-土壤恢复系数	0.3
土壤-土壤动摩擦因数	0.15
土壤-土壤静摩擦因数	0.5
土壤-割刀恢复系数	0.3
土壤-割刀动摩擦因数	0.01
土壤-割刀静摩擦因数	0.5
土壤-根系恢复系数	0.5
土壤-根系动摩擦因数	0.02
土壤-根系静摩擦因数	0.43



图 11 上海青模型

Fig. 11 *Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *communis* model

土壤颗粒生成时重力和过大的生成速度破坏模型中 Bonding 键,土壤颗粒向下运动,与 z 轴负向一致,速度设置为 -0.5 m/s 。根系-土壤-割刀模型如图 12 所示。

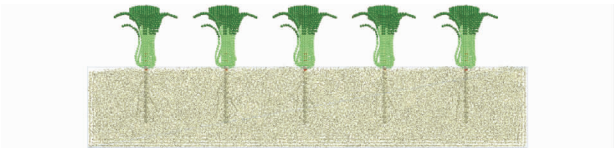


图 12 植株-土壤-割刀模型

Fig. 12 Leafy vegetable - soil - cutter model

在仿真试验过程割刀作业幅宽为 200 mm ,割刀切割频率设置为 $4 \sim 28 \text{ Hz}$,割刀前进速度为 0.5 m/s ,切根深度为 180 mm ,设置仿真步长 $5.139\,09 \times 10^{-6} \text{ s}$,网格单元为最小半径的 3 倍,仿真试验时间为 2 s 。

4.4 植株-土壤-割刀团聚体运动分析

离散元仿真过程通过主根与短缩径的相对位移表示切割的完整程度。仿真运动模型如图 13 所示,仿真结果如图 14 所示。

由图 14 可知,主根相对于短缩径位移随着割刀频率增大先增加后减小。由于仿真模拟试验中短缩径直径为 12 mm ,规定主根与短缩径之间相对位移大于等于 6 mm ,两者发生相对位移。在 0.15 s 割刀不接触植株,主根与短缩径相对位移为 0 mm ;在 0.2 s 割刀开始接触叶菜根系,主根与短缩径间的相对位

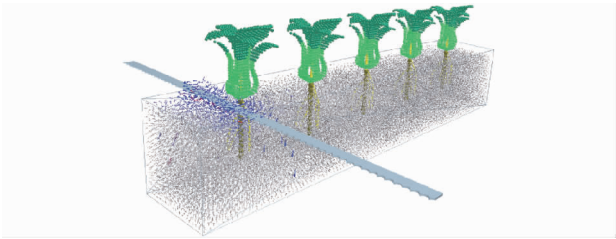


图 13 植株-土壤-割刀运动模型

Fig. 13 Plants - soil - cutter motion model

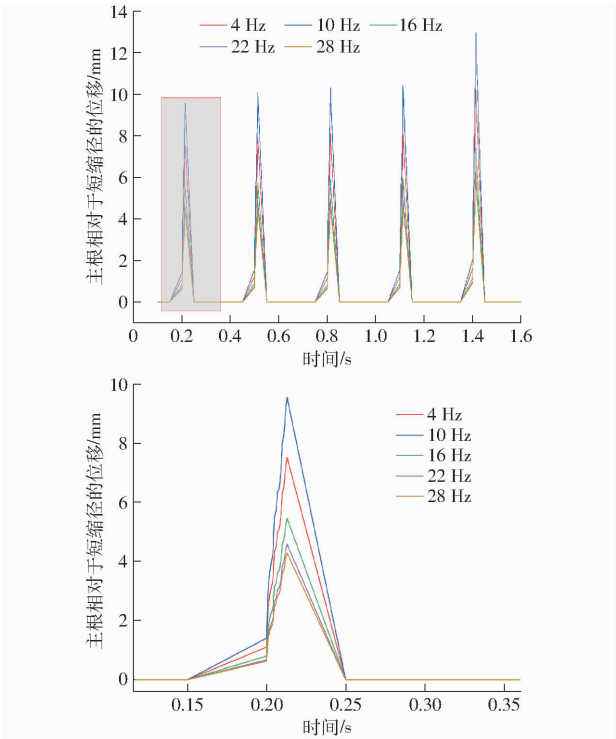


图 14 仿真结果

Fig. 14 Simulation results

移最小,其随着切根时间的增加而增大;在 0.21 s 割刀切根完成刚刚离开植株,主根与短缩径间的相对位移最大,随后割刀离开根系,割刀与各株根系均未接触,主根与短缩径间相对位移为 0 mm ,直至与第 2 株接触后相对位移发生变化。根据仿真试验结果可知,最佳割刀切割频率为 $4 \sim 22 \text{ Hz}$ 。

5 田间收获试验

2025 年 5 月,田间试验在中国山东省潍坊市中科滕森(山东)智能装备有限公司试验基地进行。栽培品种为“京冠一号”,种植行距为 30 cm ,垄宽为 120 cm 。采用智能电动叶菜收获机进行收获,其他测量设备包括卷尺、电子秤、秒表和集收筐。

在正常作业条件下智能电动叶菜收获机进行切割、采收工作,收获作业结束后,分别记录收获的植株总数量和损伤植株的数量,损伤率计算式为

$$W = \frac{N_2}{N_1} \times 100\%$$

(42)

式中 W ——植株损伤率, %
 N_1 ——收获作业植株总数量, 株
 N_2 ——收获作业损伤植株数量, 株

选取割刀摆动频率 $f_{\text{割}}$ 、夹持输送带倾斜角 α 、夹持输送速度与前进速度比 ε 为试验因素, 以损伤率为试验指标进行试验, 田间试验如图 15 所示。



图 15 田间试验
Fig. 15 Field trial

5.1 单因素试验

割刀切根长度 p 取决于割台下降高度 p' , 割台

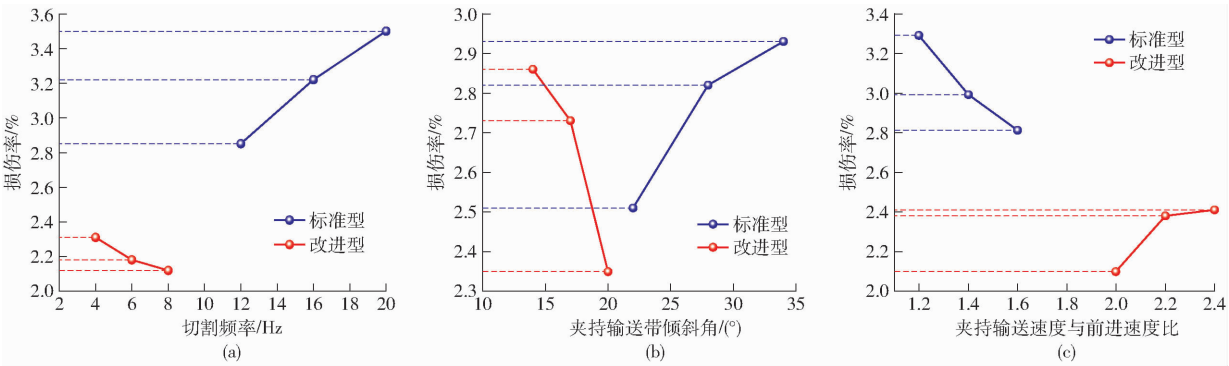


图 16 单因素试验结果
Fig. 16 Single-factor experiment results

以推测出损伤率随着切割频率增大呈先减小后增大趋势。由图 16b 可知, 改进型参数没有在损伤率方面表现出较突出的优势, 但可推测出损伤率随着夹持输送带倾角增大呈先减小后增大的变化规律。由图 16c 可知, 改进型参数最大损伤率小于标准型参数最小损伤率, 可推测出损伤率随着夹持输送速度与前进速度比增大呈先减小后增大趋势。

由图 16 可知, 损伤率随着试验因素变化的大致规律, 然而损伤率对应的各参数最优区间仍不确定。图 16b 出现了改进型参数对应的损伤率大于标准型参数对应的损伤率, 原因可推测为夹持输送带倾斜角度存在与其交互试验因素, 需实施交互试验进一步验证。

5.2 多因素交互试验

以切割频率、夹持输送带倾斜角、夹持输送速度与前进速度比作为试验因素进行三因素三水平正交试验, 分析改进型参数对植株损伤率的影响, 试验方案及结果见表 2、3, A 、 B 、 C 为试验因素编码值。根

下降高度与夹持输送带倾斜角 α 直接相关。从实测数据看, 根系长度保持在 10 ~ 30 mm 为最佳的储存状态, 结合垄高和割台最佳切根高度, 选择 α 为 14°、17°、20°; 割刀切割频率不宜过大, 选择割刀切割频率为 4、6、8 Hz; 结合试验收获机实际前进速度和夹持输送速度范围, 选择前进速度与夹持输送速比 2.0、2.2、2.4。因为 2 种模式参数数值长度不同, 水平数量也不相同。如果将 2 种模式参数范围取并集, 在保证做相同次数试验情况下将导致改进型或标准型水平数不相同, 试验误差大; 在保证 2 种模式参数水平间隔相同的情况下, 将导致试验次数增多。因此按照水平数相同间隔不同进行单因素对比试验, 2 种模式试验结果曲线如图 16 所示。

由图 16a 可知, 改进型参数对应的损伤率较小, 且改进型最大损伤率小于标准型最小损伤率, 可

据单因素试验结果, 试验因素取值范围为切割频率 [4 Hz, 10 Hz], 夹持输送带倾斜角范围 [14°, 22°], 夹持输送速度与前进速度比 [2.0, 2.4]。

表 2 试验因素编码
Tab. 2 Coding of experimental factors

编码	因素		
	切割频率/ Hz	夹持输送带倾 斜角/(°)	夹持输送速度与 前进速度比
1	10	22	2.4
0	7	18	2.2
-1	4	14	2.0

采用 Design-Expert 软件^[33]对试验数据进行二次回归分析与多元回归拟合, 正交试验方差分析结果如表 4 所示。

从表 4 可知, 模型显著型检验 $P < 0.01$, 决定系数 R^2 为 0.994 7, 缺乏拟合 $P > 0.01$, 拟合良好。A、B、C 和二次项 BC 、 A^2 、 B^2 、 C^2 均对回归方程有极显著的影响 ($P < 0.01$), AB 对回归方程有显著影响 ($0.01 \leq P < 0.05$)。各因素对植株损失率的影响由

表 3 改进型各因素参数对叶菜损伤率正交试验结果

Tab.3 Results of orthogonal test of improved parameters of factors on damage rate of leafy vegetables

序号	因素			损伤率/%
	A	B	C	
1	-1	-1	0	2.46
2	1	-1	0	2.43
3	-1	1	0	2.41
4	1	1	0	2.29
5	-1	0	-1	2.34
6	1	0	-1	2.25
7	-1	0	1	2.60
8	1	0	1	2.51
9	0	-1	-1	2.22
10	0	1	-1	2.18
11	0	-1	1	2.54
12	0	1	1	2.34
13	0	0	0	2.12
14	0	0	0	2.14
15	0	0	0	2.10
16	0	0	0	2.09
17	0	0	0	2.13

表 4 回归方差分析

Tab.4 Regression ANOVA

来源	平方和	均方	F	P
模型	0.441 4	0.049 0	146.40	<0.000 1
A	0.013 6	0.013 6	40.63	0.000 4 **
B	0.023 1	0.023 1	68.99	<0.000 1 **
C	0.125 0	0.125 0	373.13	<0.000 1 **
AB	0.002 0	0.002 0	6.04	0.043 6 *
AC	0.000 0	0.000 0	0.00	1.000 0
BC	0.006 4	0.006 4	19.10	0.003 3 **
A ²	0.157 2	0.157 2	469.39	<0.000 1 **
B ²	0.032 8	0.032 8	97.89	<0.000 1 **
C ²	0.056 4	0.056 4	168.40	<0.000 1 **
失拟项	0.000 6	0.000 2	0.484 5	0.711 0
纯误差	0.001 7	0.000 4		
R ²	0.994 7			

注: ** 表示极显著 ($P < 0.01$); * 表示显著 ($0.01 \leq P < 0.05$)。

大到小依次为 C、B、A。足以说明各因素间确实存在交互作用,验证单因素试验结果推测的合理性。将不显著的交互作用项回归平方及自由度并入残差项,由此得到各试验因素对叶菜损伤率的回归方程为

$$W = 2.12 - 0.041A - 0.054B + 0.125C - 0.023AB - 0.040BC + 0.193A^2 + 0.088B^2 + 0.116C^2$$

(43)

图 17a 为 B 和 C 因素相互作用的结果,图 17b 为 A 和 B 因素相互作用的结果。可以看到夹持输送速度与前进速度比为 2.2 时,最小损伤率约为 2.13%,损伤率随着夹持输送速度与前进速度比的

增大呈先减小后增大的趋势,随切割频率的增加呈先减小后增大的趋势,随夹持输送带的倾斜角度的增大呈先减小后增大的趋势,与单因素试验结果一致。

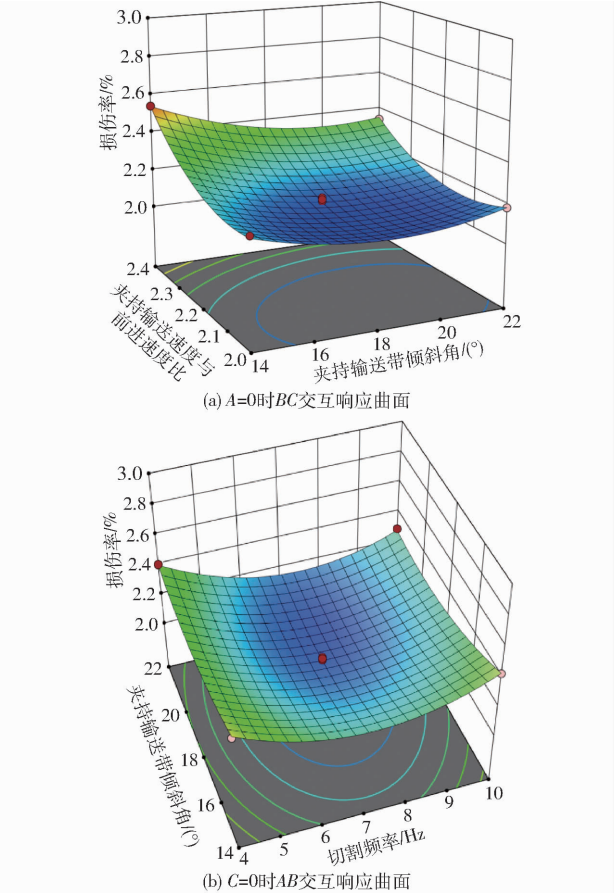


图 17 各因素交互作用

Fig.17 Interaction analysis of factors

夹持输送速度与前进速度比的变化趋势呈此现象原因推测为:根据图 8 可知,当 $\varepsilon \geq 1$ 但比值较小时,进入夹持输送装置的叶菜数量增多,植株水平位移较小,与集收装置前侧碰撞冲击,损伤植株数量增多;当 $\varepsilon \geq 1$ 且比值较大时,进入夹持输送装置植株数量减少,水平位移增大,与集收装置后侧发生碰撞冲击,损伤植株数量增多。

切割频率的变化趋势呈此现象原因为:根据式 (12)、(13)、(20) 可知,当 f_{cl} 较小时,割刀做功较小,根系无法切断,导致根系被撕扯,损伤率增加;当 f_{cl} 较大时,割刀机械功增加,割刀与植株冲击增加,单次切割不彻底,亦会导致损伤率增加。

夹持输送带倾斜角的变化趋势呈此现象的原因推测为: α 较小时,植株由切割向夹持过渡过程衔接不连贯,不易被有效夹持,且与夹持输送装置碰撞次数增多,损伤率增加; α 较大时,植株在夹持输送带的摩擦力减小,有向下滑动的趋势,与夹持输送带的相互摩擦导致植株损伤率增大。

5.3 最优工作参数确定

为了进一步降低叶菜损伤率,对切割频率、夹持输送带倾斜角以及夹持输送速度与前进速度比回归模型进行优化求解。建立性能指标全因子二次回归方程为

$$\begin{cases} \min W(A,B,C) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq A \leq 1 \\ -1 \leq B \leq 1 \\ -1 \leq C \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (44)$$

通过优化求解,得到切割频率为 6.92 Hz,夹持输送带倾斜角为 18.44°,夹持输送速度与前进速度比为 2.08 时,损伤率为 2.08%。

调节收获参数为切割频率 7 Hz,夹持输送带倾斜角度 18°,夹持输送速度与前进速度比 2.1。试验结果表明,损伤率平均值为 2.12%,与模型优化所得结果的相对误差小于 5%。

6 结论

(1)利用运动学、土体力学和植物材料断裂力学理论,建立土壤-根系-割刀运动模型,确定了主根在割刀摆动作用下呈类周期性振荡的运动轨迹,基于 Griffith 断裂准则探明了满足割刀机械功 G_u 作业

条件 $G_d \leq G_u \leq G_b$,解析了影响损伤率的主要因素为割刀摆动频率 f_{ui} 和夹持输送带倾斜角 α 。

(2)基于物理学原理构建了植株夹收模型,探明了植株在夹持作用下总变形量随外载荷增大而增大变化速率减小的运动规律,确定叶柄部在夹持过程损伤率的主要影响因素为切根长度和割刀所做的机械功 G_u ,集收过程植株损伤率主要影响因素为夹持输送带倾斜角 α 、前进速度 v_0 和夹持输送速度 v_1 。

(3)应用离散元方法建立了土壤-根系-割刀团聚体模型,模拟了收获时割刀全程作业,得到了割刀频率为 4~28 Hz 时,土壤-根系-割刀团聚体在割刀作用下主根-短缩径相对位移曲线,确定了最佳割刀频率为 4~22 Hz。

(4)通过单因素试验,对比了主要影响参数分别在标准型和改进型参数选取范围的损伤率,得到了改进型损伤率小于标准型;通过三因素三水平正交优化试验,建立了切割频率、夹持输送带倾斜角度、夹持输送速度与前进速度比和损伤率的回归模型,进行交互响应优化分析,结果表明,切割频率为 7 Hz,夹持输送带倾斜角为 18°,夹持输送速度与前进速度比为 2.1 时,叶菜损伤率平均值为 2.12%。

参 考 文 献

[1] 梁树建,刘立晶,刘芳建,等. 叶类蔬菜机械化收获技术装备发展现状[J]. 中国农机化学报,2025,46(1):346-352.
LIANG Shujian, LIU Lijing, LIU Fangjian, et al. Development status of mechanized harvesting technology and equipment for leafy vegetables[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(1): 346-352. (in Chinese)

[2] 陈波,陈苗苗,杨昌敏,等. 蔬菜机械化生产技术现状与发展趋势[J]. 南方农机,2024,55(增刊1):16-18.
CHEN Bo, CHEN Miaomiao, YANG Changmin, et al. The current situation and development trend of vegetable mechanization production technology[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp. 1): 16-18. (in Chinese)

[3] 姚森,杨其长,马伟,等. 蔬菜全程机械化生产研究现状及发展趋势[J]. 中国蔬菜,2021(10):1-7.
YAO Sen, YANG Qichang, MA Wei, et al. The current situation and development trend of vegetable mechanization production technology[J]. China Vegetables, 2021(10):1-7. (in Chinese)

[4] NAG H R, SHARMA K P, MANI I, et al. Cost-Economic evaluation of leafy vegetable harvester versus conventional harvesting: a comparative study[J]. International Journal of Environment and Climate Change, 2023, 13(9): 3145-3153.

[5] ZHANG F, LUO Z, LI W, et al. Structural design and optimization of crushing and strip-laying device based on discrete element method with wet-adhesive flexible straw model[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 237(PA): 110537.

[6] MA X, YU Z, LIU M, et al. Mechanical properties and critical state characteristics of maize root-soil composites at different soil depths[J]. Biosystems Engineering, 2025, 250:163-173.

[7] BAN Y, LIU Y, BA S, et al. Finite element modeling of the biomechanical properties of *Populus tomentosa* branches and analysis of pruning mechanisms[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 236:110502.

[8] CHE H, ZHOU H, ZHANG Y, et al. Parameter optimization and numerical analysis of the double disc digging shovel for corn root-soil complex[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 235:110386.

[9] ALI M, LEE Y, KABIR N S M, et al. Kinematic analysis for design of the transportation part of a tractor-mounted Chinese cabbage collector[J]. Journal of Biosystems Engineering, 2019, 44(29):226-235.

[10] WANG H, QI C, LUO Q, et al. Optimization of clamping and conveying parameters for spinach orderly harvesting with low damage by simulation and experiment[J]. Agronomy, 2024, 14(9):2164.

[11] 王伟. 小青菜有序收获机关键部件设计与试验研究[D]. 镇江:江苏大学, 2022.
WANG Wei. Design and experimental study on key components of *Brassica chinensis* orderly harvester[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022. (in Chinese)

[12] 高峰. 叶菜收获机关键部件的设计及试验研究[D]. 镇江:江苏大学, 2021.

- GAO Feng. Design and experimental study on key components of leaf vegetable harvester[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021. (in Chinese)
- [13] 邹亮亮,刘雪美,李金光,等. 基于流变特性分析的菠菜有序收获机夹持输送装置研究[J]. 农业机械学报,2019,50(10):72-79.
- ZOU Liangliang, LIU Xuemei, LI Jinguang, et al. Clamping conveyer device of ordered spinach harvester based on rheological property analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(10):72-79. (in Chinese)
- [14] 路尔韦,刘腾. 浅谈农机农艺融合条件下蔬菜规模化种植技术[J]. 山东农机化,2025(1):19-20.
- LU Erwei, LIU Teng. A brief discussion on the large scale vegetable planting technology under the integration of agricultural machinery and agronomy[J]. Shangdong Agricultural Mechanization, 2025(1):19-20. (in Chinese)
- [15] 刘鹏伟,杨敏丽,张小军,等. 基于高质高效的西南丘陵山区机械化生产模式评价[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊1):140-149.
- LIU Pengwei, YANG Minli, ZHANG Xiaojun, et al. Evaluation of mechanized production model based on high quality and high efficiency in southwest hilly and mountainous areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(Supp.1):140-149. (in Chinese)
- [16] 周海燕,贾如,赵凤敏,等. 广西农业机械化发展路径研究[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊2):240-245.
- ZHOU Haiyan, JIA Ru, ZHAO Fengmin, et al. Development path of agricultural mechanization in Guangxi[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(Supp.2):240-245. (in Chinese)
- [17] 言志信,宋云,江平,等. 植物摩擦型根-岩土相互作用的初步研究[J]. 中国科学:技术科学,2010,40(9):1109-1113.
- YAN Zhixin, SONG Yun, JIANG Ping, et al. Preliminary study on the friction type root soil interaction of plants[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2010,40(9):1109-1113. (in Chinese)
- [18] 黄梦琦. 不同基质吸力下苜蓿根系对黄土抗剪力学性能的影响[D]. 太原:太原理工大学,2024.
- HUANG Mengqi. Effect of alfalfa root system on shear mechanical properties of loess under different matric suctions[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2024. (in Chinese)
- [19] CAO Y, SU X, ZHOU Z, et al. Effects of root traits on shear performance of root-soil complex and soil reinforcement in the Loess Plateau[J]. Soil & Tillage Research, 2025,252:106625.
- [20] MIDIKIZI T D, SALL A O, SARR D, et al. Characterization and modeling of reinforced earth structures[J]. Open Journal of Applied Sciences, 2024,14(10):2943-2954.
- [21] ARUTYUNYAN R A, ARUTYUNYAN A R. Application of the griffith energy concept to the formulation of the strength criteria for nonlinear-elastic medium with a crack[J]. Mechanics of Solids,2018,53(3):349-353.
- [22] 赵成刚. 土力学原理[M]. 北京:清华大学出版社,2009.
- [23] 哇子凡,易文. 基于 Griffith 断裂准则的根系固土力学模型[J]. 中南林业科技大学学报,2021,41(6):167-174.
- SUI Zifan, YI Wen. A root-reinforced soil mechanics model based on the Griffith fracture criterion[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021,41(6):167-174. (in Chinese)
- [24] 邵卓平. 植物材料(木、竹)断裂力学[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [25] LIU B, FU B, STEFANO B. Generalisation of the linear theory of rolling contact to a single double-elliptic contact region and its application to solve non-Hertzian contact problems using extended FASTSIM[J]. Vehicle System Dynamics,2023,61(10):2473-2491.
- [26] 薛康. 基于刚柔流耦合动力学的水稻大苗机插茎秆损伤机理研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2022.
- XUE Kang. Study on damage mechanism of big rice seedling stalks by mechanical transplantation based on rigid-flexible-fluid coupling dynamics[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [27] 王玉锁,杨竣翔,肖宗扬,等. 落石对缓冲土层的冲击力及冲击深度理论与试验研究[J]. 西南交通大学学报,2024,59(5):1078-1085.
- WANG Yusuo, YANG Junxiang, XIAO Zongyang, et al. Theoretical and test study of impact force and impact depth of falling rocks on buffering soil layers[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2024,59(5):1078-1085. (in Chinese)
- [28] 王国宾,张同升,兰玉彬,等. 基于变径槽轮的无人机条施装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2025,41(7):13-21.
- WANG Guobin, ZHANG Tongsheng, LAN Yubin, et al. Strip fertilization device of unmanned aerial vehicle using a variable-diameter grooved wheel[J]. Transactions of the CSAE, 2025,41(7):13-21. (in Chinese)
- [29] HAN X, WANG P, GUO Y, et al. Agglomeration mechanism of wet coal powder vibration screening based on discrete element method[J]. Powder Technology, 2025,457:120886.
- [30] ZHAO Y, YANG R, XI X, et al. Numerical simulation and optimisation of depodding performance in a fresh green soybean harvester[J]. Biosystems Engineering, 2025,253:104127.
- [31] CHEN S, FENG Q, KAN Z, et al. Achieving optimal cutting results for melon rootstock: precision linear cutting and parameter simulation optimization[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025,230:109883.
- [32] 毕津硕,卢彩云,李洪文,等. 动态滑切分段式驱动圆盘防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(10):291-300,374.
- BI Jinshuo, LU Caiyun, LI Hongwen, et al. Design and testing of dynamic sliding cutting segmented drive disc anti-blocking device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(10):291-300,374. (in Chinese)
- [33] 葛宜元,梁秋艳,王桂莲. 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,2015.