

引用格式:

赵周桥, 刘大为, 肖霄, 谢方平, 郑鹏, 李旭. 影响白萝卜拔取力关键因素的研究与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(4): 95–102.

ZHAO Z Q, LIU D W, XIAO X, XIE F P, ZHENG P, LI X. Study and experiment on the key factors affecting the extraction force of white radish[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2024, 50(4): 95–102.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



影响白萝卜拔取力关键因素的研究与试验

赵周桥¹, 刘大为^{1,2*}, 肖霄¹, 谢方平^{1,2}, 郑鹏¹, 李旭^{1,2}

(1.湖南农业大学机电工程学院, 湖南 长沙 410128; 2.智能农机装备湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410128)

摘要: 为研究影响白萝卜拔取力的关键因素, 设计一种白萝卜拔取装置。该装置采用直流电机驱动, 利用钢丝绳连接夹持器拉拽白萝卜缨叶, 并由计算机记录拔取过程中的拔取力峰值和时长。以‘捷夏美 50’白萝卜为试验材料, 分析白萝卜拔取受力情况, 确定以白萝卜拔取装置的拔取线速度、拔取角度、夹缨高度和土壤含水率为试验因素, 白萝卜拔取力峰值为试验指标, 进行单因素和响应面法试验, 探究各试验因素对白萝卜拔取力峰值的影响, 进而确定白萝卜拔取装置的最佳工作参数为夹缨高度 1 cm、拔取线速度 0.03 m/s、拔取角度为 35°、土壤含水率 21.63%, 此时, 白萝卜拔取力最小, 拔取力峰值为 52.5 N, 该结果与白萝卜最小拔取力峰值预测结果具有良好的拟合性。

关键词: 白萝卜拔取力; 拔取线速度; 夹缨高度; 拔取角度; 土壤含水率; 响应面法; 参数优化

中图分类号: S225.72

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2024)04-0095-08

Study and experiment on the key factors affecting the extraction force of white radish

ZHAO Zhouqiao¹, LIU Dawei^{1,2*}, XIAO Xiao¹, XIE Fangping^{1,2}, ZHENG Peng¹, LI Xu^{1,2}

(1.College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.Hunan Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: In order to study the key factors affecting the extraction force of white radish, an extraction device for white radish was designed. The device was driven by DC motor, and was designed to pull white radish leaves using a gripper connected to a wire rope. The peak value and duration of extraction force were recorded by computer. ‘Jixiamei 50’ white radish was used as test material, the extraction force of white radish was analyzed in this study. The extraction line speed, extraction angle and clip height of white radish extraction device and soil moisture content were determined as test factors, and the extraction force peak value of white radish was determined as test index. Single factor and response surface tests were carried out to explore the influence of each test factor on the extraction force peak value of white radish. Then, the optimum working parameters of the extraction device for white radish were determined to be the clip height of 1 cm, the extraction line speed of 0.03 m/s, the extraction angle of 35°, and the soil moisture content of 21.63%. With these conditions, the extraction force of white radish was the minimum, and the extraction force peak value was 52.5 N, which had a good fit with the prediction results of the extraction force peak value of white radish.

Keywords: white radish extraction force; extraction line speed; clip height; extraction angle; soil moisture content; response surface; parameter optimization

收稿日期: 2024-03-07

修回日期: 2024-08-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1600300-4-6)

作者简介: 赵周桥(1999—), 男, 湖南岳阳人, 硕士研究生, 主要从事农业工程与信息技术研究, 992815455@qq.com; *通信作者, 刘大为, 博士, 副教授, 主要从事农业机械结构创新设计与试验研究, liudawei8361@163.com

白萝卜是一种重要的根茎类蔬菜,但其收获机械化程度较低^[1-2]。中国的白萝卜收获机主要有拔取式和挖掘式2种类型。挖掘式收获机适用于播种在较为分散、疏松土质的土壤环境里的球型萝卜、小型萝卜的收获等。拔取式白萝卜收获机可以一次完成搂叶、拔取、切缨、装袋等功能,并实现根土分离,有较为明显的优势^[3-4],但在使用过程中存在夹持装置结构及参数设置不合理的问题,从而导致收获机械拔取阻力大、缨叶断裂,导致拔取失败或造成白萝卜损伤;因此,探究白萝卜拔取过程中的影响因素具有重要意义。

白萝卜的大部分肉质根在收获过程中的阻力主要来自土壤黏附力、土壤与肉质根之间的摩擦力及萝卜根系对土壤的紧固作用力^[5-7]。夹持拔取的过程伴随着土壤团粒结构的破坏,进而对白萝卜收获机拔取造成影响。有学者^[8-9]对萝卜在拔取过程中所施加力的临界值进行了试验研究,发现摩擦力或拔取力过大或超过根茎结合部最大抗拉强度都会导致萝卜损伤。刘雄等^[10]对棉秆起拔力关键因素进行研究,发现棉秆直径、土壤含水率及起拔角度对起拔力有较大的影响。薛党勤等^[11]设计了一种移动式棉秆拔取力测试装置,以起拔角度、机具前进速度、土壤含水率为影响因素,并得出了棉秆测力装置的最佳起拔条件。曾功俊等^[12]设计了一种拉拽式胡萝卜根茎分离实验台,该装置主要由机架、拉拽装置、输送装置构成,能对胡萝卜进行拔取作业,但试验时并没有对装置在胡萝卜缨叶上的拉拽位置进行探讨。刘强等^[13]研究了拔取胡萝卜过程对土壤扰动范围的影响,发现拔取过程不仅与拔取速度和拔取角度相关,还与拔取时施加力的位置有关。

国内对白萝卜拔取收获过程中的影响因素研究较少,很多影响白萝卜拔取力的试验因素以及因素之间的交互作用还需要试验验证。参照对棉秆、胡萝卜等的相关研究,笔者设计一种白萝卜拔取装置,测量白萝卜田间拔取力峰值,并基于响应面法选取白萝卜收获机夹持拔取过程中的影响因素进行试验,以拔取力峰值为响应指标,优化夹持拔取时的参数,以期为白萝卜收获机夹持机构的研发提供依据。

1 白萝卜拔取装置的设计

为减小白萝卜人工拔取时测量拔取力峰值所造成的误差,更加直观的探究白萝卜拔取过程中

的影响因素,设计一种由直流电机驱动白萝卜拔取力测量台架,主要由夹持部件、拉伸部件、测量部件3部分组成,如图1所示。其中,钢丝绳一端固定在直流电机上,绕过龙门架上的滑轮上方后与拉力传感器和夹持器连接,并由调速直流电机驱动,拔取过程由拉力传感器记录数据并上传至计算机保存,运用计算机中的测量软件记录拔取白萝卜时的拔取力峰值。

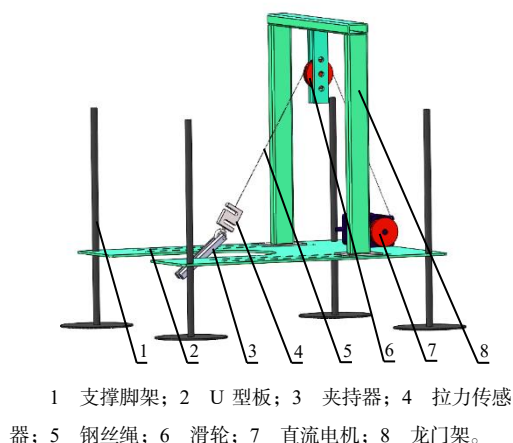


图1 白萝卜拔取力测量台架

Fig.1 White radish extraction force measurement bench

根据冲量定理可知,物体相互作用的时间越短,力的作用越剧烈,因而拔取速度不宜过快,不然试验过程中可能会导致缨叶断裂。试验选用泰州伟创机电设备有限公司生产的松岗DC24V直流电机,并配备减速比为1:50的减速器,采用东力减速电机厂生产的直流调速器实现直流电机的启动、停止、正转、反转以及无级调速(速度控制在6~25 r/min),采用大洋传感系统工程有限公司生产的DYLY-103型拉压力传感器测量白萝卜拔取力。

2 影响白萝卜拔取力关键因素的测量试验与结果分析

2.1 试验条件

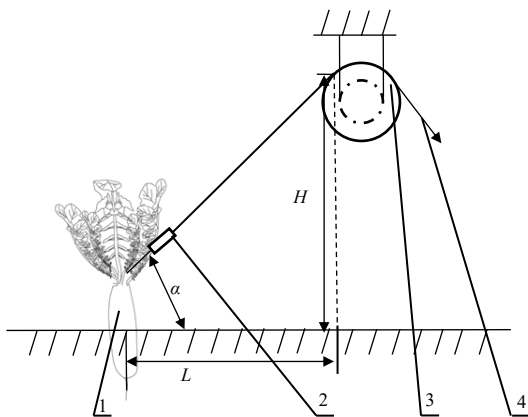
试验地位于湖南省浏阳市沙市镇白萝卜种植基地(113°63'E, 28°15'N, 中亚热带季风性湿润气候)。供试白萝卜品种为‘捷夏美50’,缨叶平均长度约为37.7 cm,根系主要为直根系。白萝卜于2023年9月进行机械直播,单垄单行种植,株距100 mm,行距370 mm,生长时间为60 d。土壤为砂壤土。采用LD-JS型一体式土壤坚实度仪分别于早(8:00)、中(14:00)、晚(17:00)3个时段测量土

壤坚实度,测量结果分别为 79.0、106.5、134.0 N/cm^2 ;同时,采用 SUNNE 水分子测定仪测量早、中、晚时段的土壤含水率,测量结果分别为 24.66%、21.63%、18.60%。

于 2023 年 11 月,进行白萝卜拔取田间试验。参考前期研究结果及文献[10,14–15],探求拔取力峰值与白萝卜直径的关系,发现白萝卜的直径大小对侧向土壤的紧固作用有影响,进而使拔取力峰值存在差异。为减小试验误差,选用根部平均直径为 55~65 mm 和地下部分平均长度为 25~30 cm 的白萝卜为试验对象,去除垄中土壤外部肉质根距离垄中心线左右超过 5 mm 及高度超过 70 mm 的萝卜后进行试验。

2.2 拔取角度的确定

将钢丝绳与地面的夹角设为 α ,即白萝卜拔取角度(图 2)。



1 白萝卜; 2 夹持器; 3 滑轮; 4 钢丝绳; H 白萝卜夹持点与滑轮连线相切点在垂直方向上的间距; L 白萝卜夹持点与滑轮连线相切点在水平方向上的间距。

图 2 白萝卜拔取角度示意图

Fig.2 Schematic diagram of white radish extraction angle

根据图 2 所示的几何关系,有

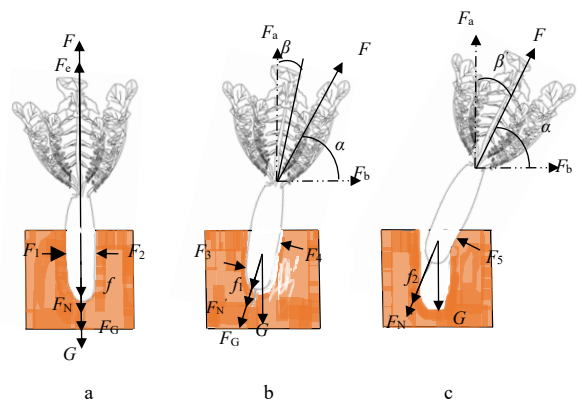
$$\alpha = \arctan \frac{H}{L} \quad (1)$$

拔取作业前,先对钢丝绳进行预紧并将整个装置进行调平。将张开的夹持器放置到白萝卜缨叶的夹取高度并利用轧带进行紧固,调节龙门架在 U 形板上滑槽的位置,以达到拔取所需角度。拔取作业时,直流电机绕顺时针方向转动,回收钢丝绳,带动夹持器将白萝卜拔出地表。

2.3 白萝卜拔取受力情况分析

白萝卜在田间的生长、拔取示意图如图 3 所示。自然生长状态下的白萝卜在未被拔取时会受到自身重力(G)和地面支撑力(F_G)的作用。白萝卜生长时会将两侧土壤紧固,土壤会对白萝卜两侧肉质根施加均匀的压力 F_1 、 F_2 。此时进行垂直拔取时,白萝卜会受到两侧土壤的摩擦力(f)、白萝卜根系与土壤的黏附力(F_G)以及土壤对萝卜肉质根的黏附力(F_N)工作作用,如图 3-a 所示。根据本次的试验条件,整个试验过程在相同试验田进行且白萝卜都为直系根,若不考虑白萝卜其余须根,则去除两侧土壤后对白萝卜施加垂直的拔取力,即可测量 F_G 。理想情况下,可将 F_G 作为定值。

采用白萝卜拔取装置对白萝卜进行拔取时(初拔取阶段),拔取力使自然生长状态下的白萝卜产生偏移,形成偏移角 β ,由于土壤结构发生破坏,白萝卜肉质根与土壤的接触面积发生变化, F_N 发生改变,变为 F_N' ,此外白萝卜在两侧会受到较大的土壤压力 F_3 、 F_4 , f 随着土壤压力的变化变为 f_1 ,如图 3-b 所示。随着拔取时间的增加(后拔取阶段),白萝卜两侧土壤结构进一步被破坏, F 可分解为垂直拔取力(F_a)和水平拔取力(F_b), F_a 提供白萝卜垂直向上的力,当 F_a 逐渐增加直至大于 F_G 时, F_G 不再对 F 造成影响。 F_b 会使一侧土壤正压力不断减小直至消失,同时使另一侧土壤的正压力(F_5)不断增大,此时摩擦力由 f_1 变为 f_2 ,如图 3-c 所示。此时 F 需克服摩擦力 f_2 、 F_N 进行拔取作业。



a 预拔取阶段; b 初拔取阶段; c 后拔取阶段。

图 3 白萝卜拔取受力分析

Fig.3 Analysis of the force on the extraction of white radish

当处于稳定拔取过程时,根据图 3-b 对白萝卜进行拔取受力分析,有

$$F \sin \alpha \geq G + (f_1 + F_G + F_N') \cos \beta \quad (2)$$

化简得

$$F \geq \frac{G + (f_1 + F_G + F_N') \cos \beta}{\sin \alpha} \quad (3)$$

白萝卜拔取装置在确定 α 后, F 与 F_N' 、 f_1 和 β 相关。前期试验及文献[4,12-13]表明, 拔取过程中引起白萝卜发生偏移的因素主要有拔取角度和夹缨高度。此外, f_1 由土壤的滑移摩擦力(F_f)和土壤间的黏附力产生的滑移阻力(F_c)两部分组成, 两者关系如下。

$$F_f = \mu_1 F_N' S \quad (4)$$

$$F_c = \mu_1 (F_3 + F_4) \quad (5)$$

$$f_1 = F_f + F_c = \mu_1 (F_3 + F_4 + F_N' S) = \mu (F_3 + F_4) \quad (6)$$

式中: μ 为土壤摩擦因数; S 为实际接触的黏附面积; μ_1 为比例系数。推导可得

$$\mu = \mu_1 + \frac{\mu_1 F_N' S}{F_3 + F_4} = \mu_1 \left(1 + \frac{F_f}{F_3 + F_4} \right) \quad (7)$$

根据公式(7)可知, 在拔取作业时, μ 与 F_N' 、 F_3 、 F_4 和 S 相关。黏附力是产生土壤摩擦力的重要原因。根据文献[6,16]可知, 土壤强度会随着土壤含水率的增加而降低, 土壤压力也随之发生改变, 其黏附力也随之减小或呈先增大后减小的趋势。可见, 土壤含水率对白萝卜拔取力峰值有较大的影响。

根据白萝卜拔取装置的运动分析(图4), 白萝卜在拔取时存在2种状态, 一是由夹持器拉动一定角度, 二是完全拔出至土壤表面。结合图3-c的受力图对2种状态进行分析可以得出, 土壤的实际黏附面积在拔取时呈减小趋势。根据冲量定理, 在理想情况下, 选取质量相同的白萝卜在保持拔取

装置的拔取速度(v)不变时, 力作用时间越短, 其拔取力越大, 可见, 实际黏附面积减小的快慢在一定程度上也会影响拔取力的大小, 而土壤实际黏附面积减小的快慢可通过控制拔取线速度实现。

参照棉秆拔取力测量方法^[10,14,17-19], 确定以夹缨高度、土壤含水率、拔取角度、拔取线速度为影响因素进行单因素试验。

2.4 单因素试验

2.4.1 单因素试验设计

在保持拔取线速度 0.03 m/s、拔取角度 40°、夹缨高度 3 cm 等试验因素不变的情况下, 根据试验田土壤环境选择土壤含水率为 18.60%、21.63%、24.66%时测量拔取力峰值。

在保持拔取线速度 0.03 m/s、拔取角度 40°、土壤含水率 21.63%等试验因素不变且不影响肉质根损伤的情况下, 根据‘捷夏美 50’萝卜缨叶的生长特性, 选择不同夹缨高度(1、3、5、7、9 cm)测量拔取力峰值。

在保持拔取线速度 0.03 m/s、夹缨高度 3 cm、土壤含水率 21.63%等试验因素不变的情况下, 选择不同拔取角度测量拔取力峰, 参照文献[12,20]中对萝卜收获机的研究结果, 在不影响其整机结构的布置下, 选择拔取角度为 40°较适宜, 考虑到白萝卜收获机整体布局, 此次试验拔取角度选为 30°、40°、50°。

前期研究^[4]结果表明, 白萝卜收获机械在拔取时的最优夹持转速为 115 r/min。由于测量系统利用钢丝绳连接夹持器, 即使试验前进行预紧也会因为过快的夹持速度将缨叶直接拉断, 且拔取线速度过快会使测量软件的数据收集出现较大误差; 因此, 需根据预试验确定白萝卜拔取装置的拔取线速度。在同一地块和时间段且保持其他因素不变(土壤含水率 21.63%、拔取角度 40°、夹缨高度 3 cm)的情况下, 以不同的拔取速度进行白萝卜拔取预试验, 并记录测量装置有较长时间稳定读数时的拔取速度。预试验中, 当白萝卜拔取装置的拔取线速度选为 0.03 m/s 时, 测量系统能够较

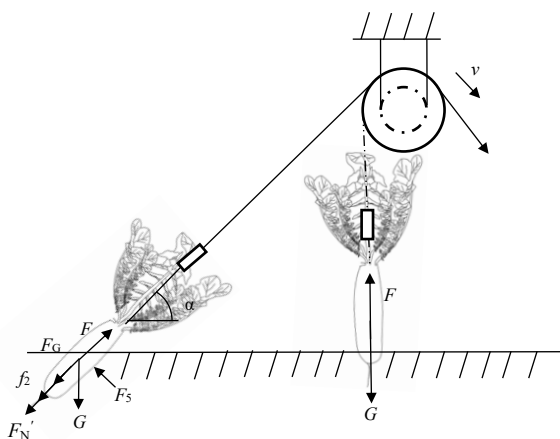


图4 白萝卜拔取运动分析

Fig.4 Extraction movement analysis of white radish

好地读取数据，因而在保证正常收获效率的情况下，试验选择拔取线速度为 0.02、0.03、0.04 m/s。

各因素单因素试验均进行 3 次试验，每次试验重复 3 次。

2.4.2 单因素试验结果与分析

在单因素试验过程中，夹纒高度超过 5 cm 时开始出现纒叶断裂以及夹持器出现滑动的情况，导致拉力传感器传回至计算机的数据波动幅度较

大，拔取成功率下降，因而夹纒高度测试范围调整为 1、3、5 cm。从图 5 可知，在试验选取的土壤含水率(18.6%、21.63%、24.66%)、夹纒高度(1、3、5 cm)、拔取线速度(0.02、0.03、0.04 m/s)、拔取角度(30°、40°、50°)等单因素范围内，拔取力峰值均随着各因素值的增大而增大。可见，只考虑单因素的情况下，根据拔取力峰值，后续试验选择土壤含水率 18.6%、夹纒高度 1 cm、拔取线速度 0.02 m/s、拔取角度 30°较适。

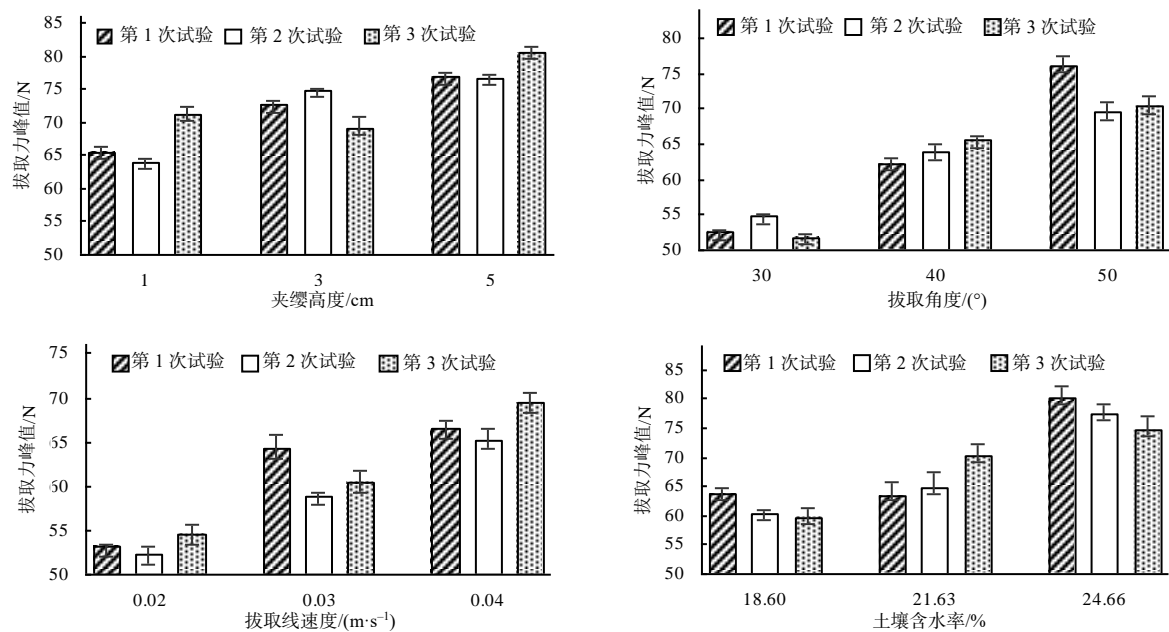


图 5 单因素试验的拔取力峰值
Fig.5 The extraction force peak value of single factor test

2.5 响应面法试验

2.5.1 响应面法试验方案

从单因素试验来看，土壤含水率、拔取角度、拔取线速度和夹纒高度对拔取力均有影响。根据 Box-Behnken(BBD)试验设计原理，选取夹纒高度(A)、拔取角度(B)、拔取线速度(C)、土壤含水率(D)为试验因素。拔取装置在作业时会造成白萝卜纒叶断裂及损伤。本试验中，主要对影响拔取力峰值的主要因素进行分析，在拔取过程中白萝卜拔起即视为拔取成功，因而只选取白萝卜拔取力峰值(F_M)作为评价指标，进行四因素三水平的中心响应面优化试验，优化白萝卜收获机的各项参数。白萝卜拔取力响应面试验设计因素与水平如表 1 所示。

表 1 Box-Behnken 试验因素及水平

Table 1 Factors and levels of Box-Behnken design				
水平	A/cm	B/(°)	C/(m·s ⁻¹)	D/%
-1	1	30	0.02	18.60
0	3	40	0.03	21.63
1	5	50	0.04	24.66

2.5.2 响应面法试验结果与分析

BBD 试验方案及结果如表 2 所示。对白萝卜拔取力峰值的回归模型的方差分析结果如表 3 所示。从表 3 可以看出，回归模型 $P<0.0001$ ，表明拟合的模型极显著；失拟项的 P 为 0.6196，不显著，表明方程模拟效果好。根据 F 可以推断，在所取的试验因素范围内，对拔取力峰值的影响程度由高到低的因素依次为 B、A、D、C，其中交互项 AB、AC、BD、BC、CD 对白萝卜拔取力峰值的影响显著，AD 对白萝卜拔取力峰值的影响不显著，

二次项 C^2 的影响不显著。

表 2 Box-Behnken 试验设计与结果

Table 2 Design and results of Box-Behnken experiment					
试验号	水平				拔取力峰值/N
	A	B	C	D	
1	-1	0	-1	0	52.1
2	-1	-1	0	0	68.3
3	-1	0	0	1	62.3
4	-1	0	0	-1	74.9
5	-1	1	0	0	63.8
6	-1	0	1	0	69.5
7	0	-1	-1	0	51.8
8	0	0	-1	1	65.5
9	0	0	-1	-1	65.4
10	0	1	-1	0	71.1
11	0	-1	0	-1	68.5
12	0	-1	0	1	68.2
13	0	0	0	0	63.2
14	0	0	0	0	61.4
15	0	0	0	0	65.6
16	0	0	0	0	65.6
17	0	0	0	0	59.3
18	0	1	0	-1	86.5
19	0	1	0	1	70.1
20	0	-1	1	0	64.3
21	0	0	1	-1	76.6
22	0	0	1	1	64.2
23	0	1	1	0	70.4
24	1	0	-1	0	71.0
25	1	-1	0	0	69.5
26	1	0	0	1	71.1
27	1	0	0	-1	80.1
28	1	1	0	0	84.2
29	1	0	1	0	70.1

表 3 回归模型的方差分析

Table 3 Analysis of variance of regression model					
来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	1 586.96	14	113.35	16.97	<0.000 1
A	253.00	1	253.00	37.89	<0.000 1
B	256.69	1	256.69	38.44	<0.000 1
C	121.60	1	121.60	18.21	0.000 8
D	213.36	1	213.36	31.95	<0.000 1
AB	92.16	1	92.16	13.80	0.002 3
AC	83.72	1	83.72	12.54	0.003 3
AD	3.24	1	3.24	0.49	0.497 5
BC	43.56	1	43.56	6.52	0.022 9
BD	64.80	1	64.80	9.70	0.007 6
CD	39.06	1	39.06	5.85	0.029 8

表 3(续)

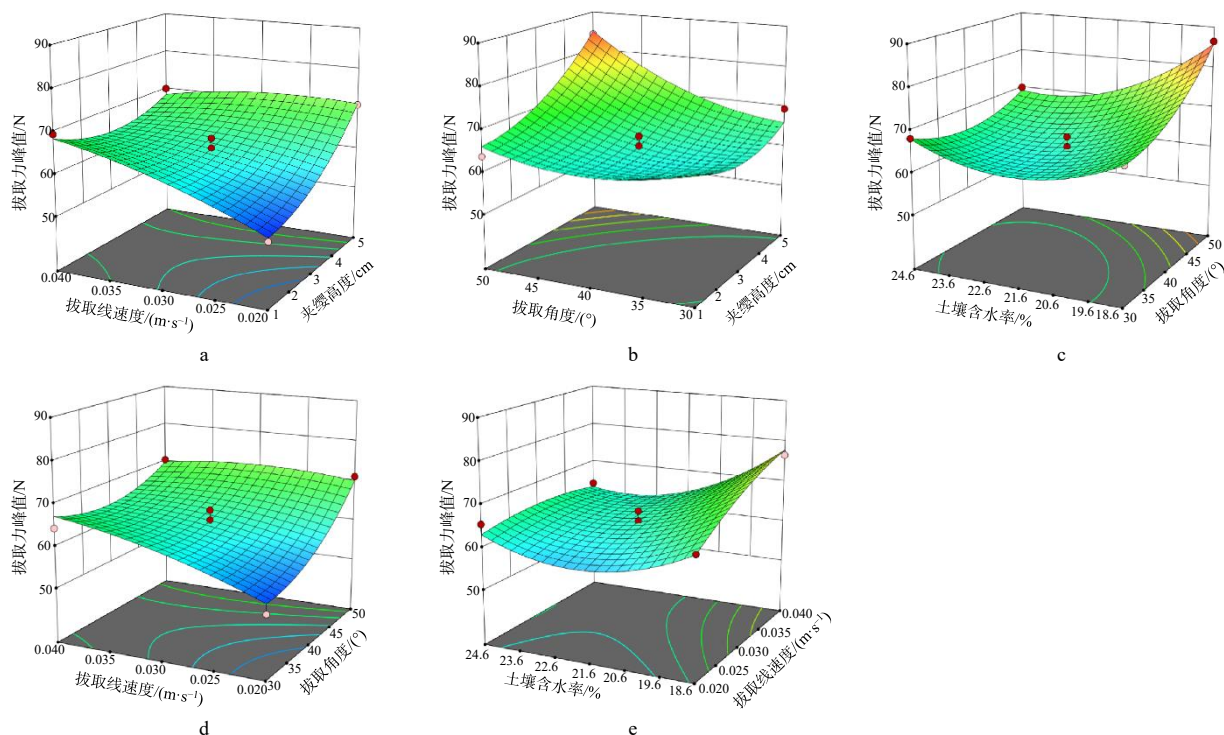
来源	平方和	自由度	均方	F	P
A^2	101.55	1	101.55	15.21	0.001 6
B^2	100.27	1	100.27	15.02	0.001 7
C^2	17.78	1	17.78	2.66	0.125 0
D^2	235.01	1	235.01	35.19	<0.000 1
残差	93.49	14	6.68		
失拟项	63.68	10	6.37	0.854 5	0.619 6
纯误差	29.81	4	7.45		
总离差	1 680.45	28			

运用 Design-Expert 13 对响应面试验数据进行回归拟合, 得到 4 个试验因素的回归方程 $F_M=63.02+4.59A+4.62B+3.18C-4.22D+4.80AB-4.58AC+0.90AD-3.30BC-4.03BD-3.12CD+3.96A^2+3.93B^2-1.66C^2+6.02D^2$ 。试验模型的相关性分析结果如表 4 所示。由表 4 可知, 试验模型 $R^2=0.944\ 4$, $R^2_{adj}=0.888\ 7$, 说明该模型具有较高的拟合度; 变异系数为 3.80%, 则说明该模型可真实反映试验结果。可见, 利用该模型来分析和预测白萝卜拔取力峰值是可行的。

表 4 模型相关性分析结果

Table 4 Model correlation analysis results			
参数	数值	参数	数值
拔取力峰值标准差/N	2.58	模型 R^2	0.944 4
拔取力峰值均值/N	68.09	模型调整后的 R^2_{adj}	0.888 7
拔取力峰值变异系数/%	3.80	预测的 R^2	0.754 0
		相对准确度	17.684 5

通过 Design-Expert 13 对数据进行处理, 得到各因素之间交互项作用对拔取力峰值指标影响的响应面如图 6 所示。从图 6 可以看出: 随着拔取线速度减小, 夹纒高度减小, 拔取角度减小, 拔取力峰值逐渐减小; 随着土壤含水率的增大, 拔取力峰值先减小后增大。分析造成拔取力峰值变化原因可能有: 白萝卜肉质根与土壤的相互作用主要受摩擦作用和锚固作用影响, 当拔取线速度较小时, 土壤内部有时间发生缺陷扩展并引发土壤崩塌, 土壤遭受破坏的程度较大, 白萝卜肉质根与土壤的接触面积减小, 肉质根在土壤中所受摩擦力以及根系与土壤的黏附力较小, 所需要的拔取力也较小; 当拔取线速度升高时, 土壤没有足够时间使内部缺陷扩展, 拔取力需要克服较大的摩擦力与黏附力, 白萝卜的拔取力峰值呈升高趋势; 当土壤含水率在一定区间增加时, 土壤间隙



a 拔取角度为 40° ，土壤含水率为 21.63%；b 拔取线速度为 0.03 m/s，拔取角度为 40° ；c 拔取线速度为 0.03 m/s，夹纒高度为 3 cm；d 夹纒高度为 3 cm，土壤含水率为 21.63%；e 拔取角度为 40° ，夹纒高度为 3 cm。

图 6 各因素对拔取力峰值影响的响应曲面

Fig.6 Response surface of the influence of various factors on the extraction force peak value

会被水分子填满，此时土壤的黏附力会增加，白萝卜在拔取时会受到较强的土壤黏附，从而会出现较大的拔取力；当土壤含水率逐渐减小，土壤间水分子减少，土壤遭受破坏的程度会随着拔取线速度发生变化，拔取力峰值受其影响较大；当土壤中水分子持续减少，拔取力峰值出现上升趋势，并随着拔取线速度的升高而持续升高。

为得到白萝卜拔取装置的最佳作业参数，以各因素的试验范围为约束条件，建立参数化数学模型。运用 Design-Expert 13 对指标回归模型进行约束优化求解。优化结果为夹纒高度 1.27 cm、拔取线速度 0.03 m/s、拔取角度 35.17° 、土壤含水率 21.61%，此时白萝卜拔取力峰值最小，为 52.31 N。

为验证回归模型的正确性，采用上述优化结果进行白萝卜拔取力试验，考虑到实际试验的操作方便，将试验参数修正为夹纒高度 1 cm、拔取线速度为 0.03 m/s、拔取角度为 35° 、土壤含水率为 21.63%。白萝卜拔取装置调整参数后进行田间试验，每组试验重复 5 次，对试验数据进行均值化处理。实际测得拔取力峰值为 52.5 N，与 Design-Expert 13 仿真优化所得拔取力峰值的相对误差在

1%以内，证明了基于响应面法优化所得的白萝卜拔取装置参数的可靠性，具有实用价值。

3 结论

为探究影响白萝卜拔取力的关键因素，笔者设计了一种基于直流电机牵引的白萝卜拔取装置，并得出影响白萝卜拔取力的相关试验因素有拔取角度、夹纒高度、土壤含水率、拔取线速度。运用 Design Expert 13 设计了四因素三水平试验，结合响应曲面，由方差分析结果可知，对白萝卜拔取力影响程度由高到低的因素依次为拔取角度、夹纒高度、土壤含水率、拔取线速度；对指标回归模型进行约束优化求解，并结合试验验证，得出了工作参数的最优组合：夹纒高度 1 cm、拔取线速度 0.03 m/s、拔取角度 35° 、土壤含水率 21.63%，此时白萝卜在拔取作业时存在较小的拔取力峰值，为 52.5 N，且验证试验结果与仿真优化结果相对误差小于 1%。可见，模型优化可靠。

参考文献：

- [1] 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.

- [2] 王伟, 吕晓兰, 王士林, 等. 茎叶类蔬菜机械化收获技术研究现状与发展[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(4): 117-127.
- [3] 胡志超, 彭宝良, 尹文庆, 等. 多功能根茎类作物联合收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(8): 58-61.
- [4] XIAO X, XIE F, ZHAO Z, et al. Design and experimentation of a self-propelled picking type white radish combine harvester[J]. Agriculture, 2023, 13(8): 1578.
- [5] 付威, 陈海涛, 坎杂. 萝卜收获机振动松土铲参数的优化[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 46-50.
- [6] 赵东晖, 冀晓东, 张晓, 等. 冀西北地区白桦根系-土壤界面摩擦性能[J]. 农业工程学报, 2021, 37(3): 124-131.
- [7] 刘露, 王莲冀, 胡红, 等. 农机触土部件仿生减粘技术研究现状及展望[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(7): 27-31.
- [8] 陈海涛, 任珂珂, 余嘉. 北方垄作萝卜物理力学特性[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 163-169.
- [9] 李凯锋, 杨炳南, 杨德秋, 等. 胡萝卜物理力学特性的试验研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(5): 169-175.
- [10] 刘雄, 张佳喜, 陈明江, 等. 棉秆起拔力关键因素的研究与试验[J]. 农机化研究, 2021, 43(9): 157-163.
- [11] 薛党勤, 张林海, 张佳喜, 等. 基于响应曲面法的移动式棉秆拔取力测试装置设计及试验研究[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(5): 6-12.
- [12] 曾功俊, 陈建能, 夏旭东, 等. 基于响应面法的拉拽式胡萝卜根茎分离试验研究[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(9): 1-8.
- [13] 刘强, 许令峰, 刘贤喜, 等. 基于离散元的胡萝卜机械拔取动态行为研究[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(6): 61-65.
- [14] 李怡, 张国忠, 周勇, 等. 棉秆田间起拔力测量系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 43-50.
- [15] 谭谦, 孙松林, 李军政, 等. 收获期烟秆的拉拔力及影响因素[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2013, 39(3): 319-322.
- [16] 张惠忍, 李法虎, 吕威. 冻融状态和初始含水率对土壤力学性能的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 128-133.
- [17] 贾智博, 侯加林, 刘敬伟, 等. 大葱茎秆起拔力测试系统的设计与试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(2): 109-113.
- [18] 谢建华, 吴仕花, 曹肆林, 等. 夹持辊式棉秆拔取装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 101-111.
- [19] 刘强, 田冲, 许令峰, 等. 土壤物理特性对胡萝卜机械拔取过程的影响[J]. 农业工程, 2019, 9(1): 63-66.
- [20] 王家胜, 尚书旗. 自走式双行胡萝卜联合收获机的研制及试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 38-43.

责任编辑: 邹慧玲

英文编辑: 柳 正