

## 基于高速摄影的冬枣果实振动脱落规律分析

傅隆生<sup>1,2</sup> 刘智豪<sup>1</sup> 冯亚利<sup>1</sup> 谢洪起<sup>1</sup> 彭俊<sup>1,3</sup> ELKAMIL Tola<sup>4</sup>

YAQOOB Majeed<sup>5</sup> 崔永杰<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学 机械与电子工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 农业部农业物联网重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

3. 西安交通大学机械工程学院, 西安 710049;

4. Precision Agriculture Research Chair, King Saud University, Riyadh 11451, Saudi Arabia;

5. Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Agriculture, Faisalabad 38000, Pakistan)

**摘要** 为研究冬枣振动采收过程中果实的运动规律和脱落轨迹,采用改装的电动往复锯连接自制振动采摘头对树枝进行高速振动,用高速相机记录不同振动频率(15、20、25 Hz)下冬枣果实的运动轨迹,对高速视频进行分析,计算在振动过程中的枣果脱落类型、脱落时间和运动轨迹,以及果实脱落时的速度、加速度和惯性力。结果表明:1)冬枣果实的主要脱落类型是旋倾型,15、20和25 Hz时,旋倾型脱落的果实个数比例分别为81%、66%和78%,参考已有研究经验,冬枣机械收获宜选用连续式振动设备;2)随着振动频率的增大,果实的平均脱落时间减小,3个频率的果实脱落时间分别为1.71、0.54和0.43 s,15 Hz时果实脱落时间与20和25 Hz时的果实脱落时间存在显著性差异,而20与25 Hz时的果实脱落时间无显著性差异;3)果实的速度和加速度随着振动频率的增大而增大,但不同频率的果实平均脱落惯性力不存在显著性差异,3个频率下分别为0.48、0.43和0.49 N。本研究结果可为机械收获装备的设计选型与研发提供理论依据。

**关键词** 冬枣; 振动收获; 高速视频; 分离力; 脱落类型

中图分类号 S225.93

文章编号 1007-4333(2018)08-0135-07

文献标志码 A

## Analysis of winter jujube fruit motion in vibration harvesting based on high-speed videos

FU Longsheng<sup>1,2</sup>, LIU Zhihao<sup>1</sup>, FENG Yali<sup>1</sup>, XIE Hongqi<sup>1</sup>, PENG Jun<sup>1,3</sup>,

ELKAMIL Tola<sup>4</sup>, YAQOOB Majeed<sup>5</sup>, CUI Yongjie<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Key Laboratory of Agricultural Internet of Things, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China;

3. College of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

4. Precision Agriculture Research Chair, King Saud University, Riyadh 11451, Saudi Arabia;

5. Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Agriculture, Faisalabad 38000, Pakistan)

**Abstract** Winter jujube fruit (WJF) is rich in nutrition, but its harvesting is labor-intensive. Therefore, it is necessary to study the mechanical harvesting of WJF. This study focused on the evaluation of the effect of different vibration frequencies on fruit motion, detaching time and detachment force during mechanical WJF harvesting with a shaker. The shaker was modified from a jigsaw by replacing its saw with a vibrating head. A high-speed camera in 750 fps was used to capture the fruit trajectory on 15 branches excited at the frequencies of 15, 20 and 25 Hz. The fruit detaching time, motion patterns, acceleration and inertial force of fruit detaching from limbs were extracted from the high-speed videos.

收稿日期: 2017-08-11

基金项目: 陕西省重点研发计划一般项目-农业领域(2017NY-164); 国家自然科学基金青年科学基金项目(31301242); 中国博士后科学基金项目(2015M572602); 西北农林科技大学国际科技合作种子基金项目(A213021505)

第一作者: 傅隆生, 副教授, 主要从事农业智能化技术与装备研究, E-mail: fulsh@nwfau.edu.cn

The results showed that the majority of the three identified motion patterns were tilting, column, and beam-column. The tilting motion were accounting for 81%, 66% and 78% of all the motion patterns at 15, 20 and 25 Hz, respectively. A continuous shaker thus could be used for mechanical harvesting of WJF. Fruit detaching times were significantly affected by the vibration frequency with fruits being fast detached at high frequencies, and their values at the three frequencies were 1.71, 0.54 and 0.43 s, respectively. The fruit detaching time at 15 Hz was significantly different from that those at 20 Hz and 25 Hz, whereas there was no significant difference in fruit detaching time between 20 Hz and 25 Hz. The velocity and acceleration of WJF were increased with the increasing of vibration frequency, but the average inertial force of fruit detachment changed less. The detaching force of white ripe WJF was less than that of crisp ripe WJF. In conclusion, higher frequency generates high harvest efficiency, but when the frequency reached a certain value, the increase of frequency had less effect on the detaching time of fruit, and frequency also has little effect on inertia force of fruit detachment. Overall, the results indicate that 20 Hz might be the optimal vibrating frequency and it was possible to selectively harvest the crisp ripe fruit.

**Keywords** winter jujube fruit; vibration harvesting; high-speed video; motion pattern; fruit detachment

目前我国冬枣的收获方式主要依靠人工采摘,如果枣果采收不及时将造成很大经济损失<sup>[1]</sup>。近年来,研究人员对枣果收获机械进行了深入探索,包括棒杆式红枣采摘机<sup>[2-3]</sup>和自走式矮化密植红枣收获机<sup>[4]</sup>,但主要集中在振动收获装备的试制,未进一步探索振动脱落过程中枣果的运动规律。相关研究在从事林果机械化采收相关方面工作时,首先对果实脱落运动规律方面进行深入分析。为减少果实在振动收获过程中的损伤,研究了振动幅度对果实-果柄系统的影响,其中将果实-果柄运动分为六大基本运动类型<sup>[5-6]</sup>。通过模拟计算和试验分析明确了果实在振动收获过程中的运动类型,以及找到了振动脱落的最佳频率范围<sup>[7]</sup>。因此,有必要在研发采收装备之前对冬枣的脱落规律进行深入研究。

研究果实的运动规律及其在脱落过程中的动态参数主要有2种方法:一种是利用加速度传感器,例如:1)检测柑橘在振动过程中果实的加速度响应以及得出果实与果柄的惯性分离力<sup>[8-10]</sup>;2)测定樱桃树在振动作用下的加速度并分析樱桃机械收获的能量利用效率<sup>[11-13]</sup>;3)测量柑橘在振动过程中的加速度<sup>[14]</sup>;4)采集加速度数据对山核桃树体的振动响应进行分析<sup>[15-16]</sup>。另一种是基于高速摄影技术,例如:1)研究杏果实振动脱落的惯性力<sup>[17]</sup>;2)对桑葚的振动脱落规律进行研究<sup>[18]</sup>;3)对蓝莓采收过程进行拍摄,确定了最佳振动速度和持续振动时间<sup>[19]</sup>;4)研究柑橘果实在振动脱落过程中的一些特性参数<sup>[20]</sup>;5)拍摄樱桃在振动脱落过程中的运动轨迹,视频分析得出振动收获中频率对樱桃果实运动、脱落时间及果实损伤的影响<sup>[21-22]</sup>;6)运用高速相机和图像处理的方法确定咖啡果实与果柄系统的模态特性<sup>[23]</sup>;

7)运用视频分析方法研究橄榄收获机械与果实之间的相互作用,以确定果实损伤的原因<sup>[24]</sup>。以上研究结果和相关方法表明采用高速相机研究果实运动规律的可行性。

本研究运用高速摄影技术研究冬枣果实振动过程中的运动规律,包括果实运动的轨迹、速度及加速度。通过对比分析不同频率振动下,果实的脱落时间及脱落惯性力,有望明确冬枣果实的主要脱落类型,得出果实脱落时间,确定运动参数与激振频率的关系,从而为设计制造冬枣振动收获机械装备提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于2015年9月在陕西省大荔县冬枣种植园内选取了5颗树龄6年的冬枣树进行试验。仪器及设备包括高速相机(i-speed TR, Olympus Corporation),可最高采集10 000帧/s的黑白高速视频;TCH电动往复锯(M8202,浙江特长恒实业有限公司)改装的可调频率振动发生器,其最大往复频率为3 000 r/min(50 Hz),行程为18 mm,频率采用外接脉冲宽度调制器控制电锯的变速器进行无极调节,将锯片替换为自制振动头,通过连接固定装置带动其对果树进行快速振动<sup>[25]</sup>。

### 1.2 试验方法

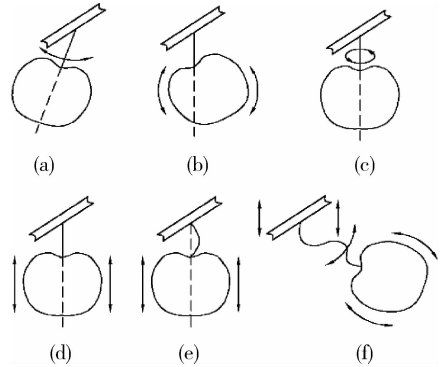
冬枣果实在同一颗树上的成熟有先后,采摘期的果实主要为白熟果和脆熟果,分布在同一树枝。首先从5颗树上分别选择3枝成熟度合适的枣果树枝(同时包含白熟果的脆熟果)为试验对象,以3个频率(15、20和25 Hz)在侧枝根部合适位置依次进

行振动采摘。每棵树的实验树枝按顺序编号，例如树 1 的 3 个树枝编号为 1、2、3，树 2 的 3 个树枝编号为 4、5、6，依此类推。

以每个实验树枝顶部的一簇果实为分析对象，对果实按“树枝号-N”的方式编号并用固定尺寸的胶布(12 mm×9 mm)粘贴做标记。高速相机通过三角架置于与果实同一水平面并使其光轴与振动方向垂直，离目标果实簇处 1.1 m 左右以将其及受振运动过程全部包含并记录。再在侧枝上施加水平方向的振动激励，以侧枝在主干上的分叉点为参考点，测量施振点距离参考点的距离作为振动位置，当枝干受到强迫振动时，冬枣果实也发生受迫振动。高速相机以 750 帧/s(图像分辨率:1 280 像素×720 像素)的速度记录果实的运动过程。田间振动采收冬枣果实的振动位置和试验设置示意图 1。

在实验室运用高速相机配套的 i-speed 控制软件对采集的视频进行分析处理，对 750 帧/s 的高速视频，每隔 1 帧取 1 幅图像(即 375 幅/s)，标记果实不同图像中的同一位置，再通过软件导出果实的运动参数。利用标记在图像中的像素大小和实际尺寸，分析果实的运动轨迹和脱落类型，测量果实脱落时间，计算果实脱落过程中的速度、加速度和脱落惯性力。

果柄与果实连接点为中心做旋转运动；旋转型—果实以果柄与树枝连接点为中心做圆锥摆运动；柱型—果实沿果柄方向做直线运动，运动过程中果柄一直处于拉伸状态；梁柱型—果实沿果柄方向做直线运动，运动过程中果柄可以处于拉伸和压缩状态；综合型—果实运动中同时存在梁柱型、摇摆型和旋倾型(图 2)。



(a) 摇摆型; (b) 旋倾型; (c) 旋转型; (d) 柱型; (e) 梁柱型; (f) 综合型  
 (a)Pendulum; (b)Tilting; (c)Rotation; (d)Column; (e)Beam-Column; (f)Beam-Column-Pendulum-Tilting

图 2 果实的 6 种常见脱落类型

Fig. 2 Six common elemental motion patterns of fruit under vibratory excitation

通过人眼对不同振动频率下果实运动视频观察分析，得出冬枣果实脱落类型包括 3 类:旋倾型、柱型和梁柱型。统计得出不同振动频率下的冬枣果实脱落类型比例(图 3)，主要脱落类型是旋倾型，15、20 和 25 Hz 下旋倾型所占比例分别为 81%、66% 和 78%；其次是柱型，15、20 和 25 Hz 下所占比例分别为 14%、20% 和 17%；梁柱型脱落类型比例最少，20 Hz 时约占 14%。

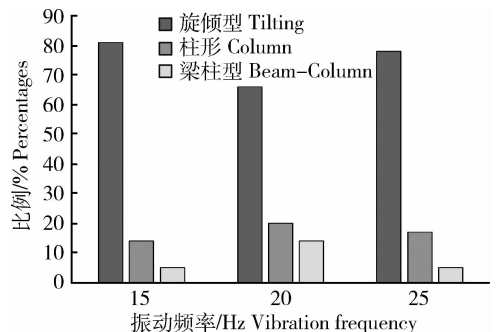


图 3 不同振动频率下的冬枣果实脱落类型比例  
 Fig. 3 Percentage of each motion pattern in the detachment of winter jujube fruits at three vibration frequencies

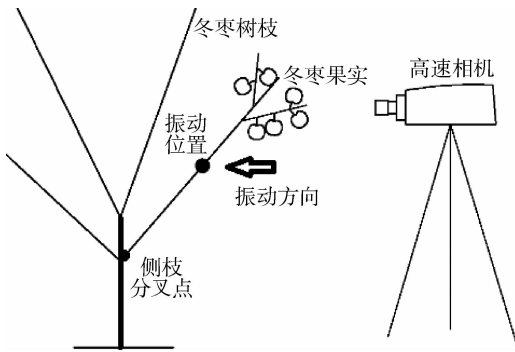


图 1 田间采收冬枣果实的振动位置和试验设置示意  
 Fig. 1 Sketch map of vibration position and field experiment setup for harvesting winter jujube fruit

## 2 结果与分析

### 2.1 果实脱落类型

果实与果柄系统在振动激励下的运动轨迹比较复杂，通常可将其分为六大类：摇摆型、旋倾型、旋转型、柱型、梁柱型和综合型<sup>[6]</sup>。摇摆型—果实以果柄与树枝连接点为中心做钟摆运动；旋倾型—果实以

枣果振动过程中的主要脱落类型为旋倾型的原因是枣果果柄相对于果实尺寸很短,脱落时大多是果实与果柄分离。这与橄榄<sup>[26-27]</sup>和开心果<sup>[28-29]</sup>生长结构及脱落类型相似,橄榄振动收获主要运用了连续式振动装备作用树枝或树干进行振动收获<sup>[26-27]</sup>,故冬枣振动收获宜选用连续式振动设备。

## 2.2 果实脱落时间

机械振动收获时,振动激励持续时间是很重

要的参数,它不仅关乎果实是否可以脱落,还关系到果实和果树的损伤,以及振动能量利用效率等问题。故对果实振动脱落时间进行分析,以便为确定振动持续时间提供参考依据。果实的振动位置,顶部簇的果实数量、脱落时间及平均果重见表1。可以看出:振动位置与脱落时间没有很强的相关性,相同频率下,振动位置对果实脱落时间影响不大。

表1 冬枣果实在3个振动频率下的振动位置、脱落时间及平均重量

Table 1 Shaking position, detaching time and weight in each frequency treatment of winter jujube fruit

频率/Hz Frequency	树枝编号 Branch No.	振动位置/m Vibration position	果实数量/个 Fruit number	果实平均质量/g Average fruit weight	脱落时间/s Detachment time
15	1	0.68	6	20.80±4.36	1.80±1.62
	4	0.91	7	23.70±3.37	1.50±0.56
	7	0.39	5	29.19±4.91	1.83±0.83
	10	0.57	6	25.47±4.61	1.78±0.75
	13	0.73	5	23.49±3.97	1.66±0.59
均值±方差 Mean±Std		0.66±0.19	6±1 a	24.56±4.26 a	1.71±0.18 a
20	2	0.60	7	17.94±2.75	0.93±0.37
	5	0.77	6	24.72±3.51	0.24±0.04
	8	1.14	5	25.24±3.35	0.47±0.13
	11	0.94	6	20.37±3.84	0.58±0.21
	14	0.73	7	26.13±4.16	0.51±0.11
均值±方差 Mean±Std		0.84±0.21	6±1 a	22.63±4.07 a	0.54±0.35 b
25	3	0.7	6	24.61±4.09	0.59±0.53
	6	0.94	6	22.39±4.16	0.30±0.03
	9	0.55	5	20.55±2.66	0.41±0.04
	12	0.79	7	24.79±2.81	0.46±0.07
	15	0.65	7	20.13±1.97	0.40±0.05
均值±方差 Mean±Std		0.73±0.15	6±1 a	22.52±2.03 a	0.43±0.15 b

注:每列相同字母表示在0.05水平上无显著差异。下表同。

Note: Same letters within same column represent not significantly different ( $P < 0.05$ ). The same below.

振动频率为15、20和25 Hz时,果实的平均脱落时间分别为1.71、0.54和0.43 s,表明随着频率的增大,果实脱落时间减小。当频率从15 Hz增加到20 Hz时,脱落时间显著性降低;当频率从20 Hz增加到25 Hz时,果实脱落时间减少、但不显著。

15 Hz时果实脱落时间与20 Hz和25 Hz时的果实脱落时间存在显著性差异,而20 Hz与25 Hz时的果实脱落时间无显著性差异,这表明高振动频率下,果实的脱落快、收获效率高,但频率达到某一值后,再增加频率对果实脱落时间影响不大。

## 2.3 果实运动参数

为了解果实在振动过程中的动态响应,对果实的运动参数进行了分析,主要研究不同频率下果实的速度、加速度及脱落惯性力。对于拍摄的果实脱落过程高速视频,用 i-speed 控制软件进行后续跟踪分析,计算果实在脱落过程中的速度及加速度。每个果实都用固定尺寸标签编号并标记,以便跟踪标记点和计算图片中的距离和实际中的距离的比例,标签的实际长度与其在图片中长度的比值可由式(1)得出:

$$R = \frac{L_r}{L_i} \quad (1)$$

式中: $R$  为实际尺寸与图片中尺寸的比例,  $\text{m}/\text{像素}$ ;  $L_r$  为标签的实际长度,  $\text{m}$ ;  $L_i$  为图片中标签的长度, 像素。果实运动过程中的运动参数计算如下:

$$v_{F_x} = \frac{\Delta x_F \cdot R}{\Delta t}$$

$$v_{F_y} = \frac{\Delta y_F \cdot R}{\Delta t} \quad (2)$$

$$a_{F_x} = \frac{\Delta v_{F_x} \cdot R}{\Delta t}$$

$$a_{F_y} = \frac{\Delta v_{F_y} \cdot R}{\Delta t}$$

$$a_F = \sqrt{a_{F_x}^2 + a_{F_y}^2} \quad (3)$$

$$F_i = m \cdot a_F \quad (4)$$

式中: $v_{F_x}$  为果实在  $x$  轴方向的速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $v_{F_y}$  为果实在  $y$  轴方向的速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $a_{F_x}$  为果实在  $x$  轴方向的加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ ;  $a_{F_y}$  为果实在  $y$  轴方向的加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ ;  $a_F$  为果实的合加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ ;  $F_i$  为果实的脱落惯性力,  $\text{N}$ ;  $m$  为果实的质量,  $\text{kg}$ ;  $\Delta x_F$  为果实在图片中  $x$  轴的位移增量, 像素;  $\Delta y_F$  为果实在图片中  $y$  轴的位移增量, 像素;  $\Delta v_{F_x}$  为果实在  $x$  轴的速度增量,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\Delta v_{F_y}$  为果实在  $y$  轴的速度增量,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\Delta t$  为时间增量,  $\text{s}$ 。

从 i-speed 控制软件中获得的果实运动轨迹示例见图 4, 以树 5 的树枝 13 为例, 果实运动轨迹复杂, 不同位置果实的运动轨迹的长度存在差异。如, 果实 13-1 运动轨迹集中、运动幅度小, 而果实 13-4 运动轨迹运动幅度大。这与果实生长位置有关, 13-1 果实所处位置运动幅度相对较小, 且果实周围果实较少, 受其他果实的约束也少。

以树 1 为例, 冬枣果实在 3 个振动频率下脱落时的运动参数如表 2 所示。可知, 随着振动频率的



绿色为果实编号 13-1、红色为果实编号 13-4。

Green for fruit No. 13-1 and red for fruit No. 13-4.

图 4 振动时冬枣果实的运动轨迹示意图

Fig. 4 Approximate trajectory of winter jujube fruits under vibration

增加, 速度和加速度也随之增大。果实的最大速度和最大加速度远大于平均速度和平均加速度, 前者大约为后者的 3~4 倍, 白熟果实的速度和加速度比脆熟果实的大。其他树上的分析结果基本与树 1 一致。果实的平均脱离惯性力随着频率的增加变化不大, 15、20 和 25 Hz 时, 分别为 0.46、0.36 和 0.45 N。经计算, 5 棵树上分别选的 3 枝枣果果枝, 脆熟果实的脱离惯性力略小于白熟果实, 与前期研究中发现的冬枣果实的静态分离力的规律相符<sup>[30]</sup>。

## 3 结论

1) 冬枣果实振动收获时主要的脱落类型是旋倾型, 15、20 和 25 Hz 下旋倾型所占比例分别为 81%、66% 和 78%。

2) 振动位置与脱落时间没有很强的相关性, 相同频率下, 振动位置对果实脱落时间影响不大。振动频率与脱落时间呈现一定的负相关性, 随着频率的增大, 果实脱落时间减少, 但频率达到 20 Hz 后, 增加频率对果实脱落时间无显著影响。15、20 和 25 Hz 时, 果实的平均脱落时间分别为 1.71、0.54 和 0.43 s, 15 Hz 时果实脱落时间与 20 和 25 Hz 时的果实脱落时间存在显著性差异。

3) 不同位置果实的运动轨迹的长度存在差异, 树枝顶端果实运动幅度更大。随着振动频率的增加, 速度和加速度也随之增大。果实的最大速度和最大加速度远大于平均速度和平均加速度, 白熟果实的速度和加速度比脆熟果实的大。果实的平均脱

表2 不同振动频率下冬枣果实脱落时的运动参数

Table 2 Motion parameters of winter jujube fruits under different vibration frequencies

频率/Hz Frequency	果实编号 Fruit number	果实成熟度 Maturity	最大速度/ (mm/s) Maximum speed	平均速度/ (mm/s) Average speed	最大加速度/ (m/s <sup>2</sup> ) Maximum acceleration	平均加速度/ (m/s <sup>2</sup> ) Average acceleration	最大脱离 惯性力/N Maximum inertia force	平均脱离 惯性力/N Mean inertia force
15	1-1	脆熟	554.64	160.63	60.82	9.63	2.07	0.31
	1-2	白熟	884.26	118.27	124.51	13.81	3.42	0.41
	1-3	脆熟	504.09	154.72	66.01	10.32	1.78	0.32
	1-4	白熟	619.57	108.18	63.82	11.11	2.24	0.41
	1-5	白熟	765.27	292.51	82.63	30.54	1.91	0.73
	1-6	白熟	525.17	216.48	65.17	25.53	1.57	0.59
均值±方差 Mean±Std			642.17± 151.45 a	175.13± 69.04 a	77.16± 24.43 a	16.82± 8.94 a	2.17± 0.66 a	0.46± 0.17 a
20	2-1	白熟	861.72	366.09	112.22	13.57	3.04	0.42
	2-2	白熟	676.14	337.24	58.38	17.12	1.54	0.41
	2-3	白熟	891.82	316.91	95.12	20.07	2.48	0.48
	2-4	脆熟	563.23	256.76	61.34	15.44	0.91	0.24
	2-5	脆熟	742.64	242.4	86.77	19.81	1.48	0.31
	2-6	白熟	970.61	277.48	108.51	21.09	1.76	0.37
	2-7	脆熟	638.72	257.82	68.32	18.91	1.42	0.32
均值±方差 Mean±Std			763.55± 148.75 b	293.53± 46.94 b	84.38± 22.15 a	18.00± 2.74 a	1.80± 0.72 b	0.36± 0.08 a
25	3-1	白熟	573.34	226.92	73.62	17.91	2.04	0.51
	3-2	脆熟	450.12	205.68	40.11	11.36	0.87	0.32
	3-3	白熟	474.49	181.04	43.77	12.61	1.26	0.38
	3-4	脆熟	664.27	301.52	55.58	11.87	1.51	0.29
	3-5	白熟	1 735.91	474.02	189.72	32.76	4.42	0.78
	3-6	白熟	887.63	438.47	90.04	23.02	1.68	0.39
均值±方差 Mean±Std			797.63± 486.16 b	304.61± 124.68 b	82.14± 55.95 a	18.26± 8.41 a	1.96± 1.27 b	0.45± 0.18 a

离力随着频率的增加变化不大,15、20 和 25 Hz 时,果实的平均脱离力分别为 0.48、0.43 和 0.49 N。脆熟果实的动态脱离力略小于白熟果实。

## 参考文献 References

- [1] Peng J, Xie H Q, Feng Y L, Fu L S, Sun S P, Cui Y J. Simulation study of vibratory harvesting of Chinese winter jujube (*Zizyphus jujuba* Mill cv *Dongzao*) [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017(143):57-65
- [2] 黄俊清,王伟,范修文,廖结安.一种振摇式红枣采收设备设计与仿真[J].塔里木大学学报,2012,24(4):45-47  
Huan J, Wang W, Fan X, Liao J. A kind of vibration wave type red jujube harvest equipment design simulation [J]. *Journal of Tarim University*, 2012, 24(4):45-47 (in Chinese)
- [3] 付威,何荣,曲金丽,孙雨,王丽红,坎杂.自走式矮化密植红枣

收获机的设计[J].农机化研究,2014,36(4):106-109

Fu W, He R, Qu J L, Sun Y, Wang L H, Kan Z. Design of self-propelled dwarf and close planting jujube harvester [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2014 (4): 106-109 (in Chinese)

- [4] 范修文,张宏,马少辉,李传峰,张洪洲,孟炜.棒杆式红枣采摘机的设计与计算[J].塔里木大学学报,2013,25(3):34-38  
Fan X W, Zhang H, Ma S H, Li C F, Zhang H Z, Meng W. Design and calculation of rod type red jujube picking machine [J]. *Journal of Tarim University*, 2013, 25 (3): 34-38 (in Chinese)
- [5] Diener R G, Mohsenin N N, Jenks B L. Vibration characteristics of trellis-trained apple trees with reference to fruit detachment [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1965, 8(1):20-24
- [6] Stafford J R, Diener R G. Design criteria for minimizing

- predetachment fruit damage during mechanical shaking [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1973, 16(5): 840-843
- [7] Parchomchuk P, Cooke J. Vibratory harvesting: An experimental analysis of fruit-stem dynamics [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1972, 15(4): 598-603
- [8] Bora G, Ehsani R, Hebel M, Lee K. *In-situ* measurement of the detachment force of individual oranges harvested by a canopy shaker harvesting machine [J]. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, 2007(120): 38-40
- [9] Savary S K J U, Ehsani R, Schueller J K, Rajaraman B P. Simulation study of citrus tree canopy motion [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2010, 53(5): 1373-1381
- [10] Savary S K J U, Ehsani R, Salyani M, Hebel M A, Bora G C. Study of force distribution in the citrus tree canopy during harvest using a continuous canopy shaker [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, 76(1): 51-58
- [11] Chen D, Du X, Zhang Q, Scharf P. Performance evaluation of mechanical cherry harvesters for fresh market grade fruits [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2012, 28(4): 483-489
- [12] He L, Zhou J, Du X, Chen D, Zhang Q, Karkee M. Energy efficacy analysis of a mechanical shaker in sweet cherry harvesting [J]. *Biosystems Engineering*, 2013, 116(4): 309-315
- [13] Du X, Chen D, Zhang Q, Scharf P A, Whiting M D. Dynamic responses of sweet cherry trees under vibratory excitations [J]. *Biosystems Engineering*, 2012, 111(3): 305-314
- [14] Castro-García S, Blanco-Roldán G L, Ferguson L, González-Sánchez E J, Gil-Ribes J A. Frequency response of late-season 'valencia' orange to selective harvesting by vibration for juice industry [J]. *Biosystems Engineering*, 2017, 155: 77-83
- [15] Du X, Chen S, Qiu G. Mechanical admittance measurement and analysis of dwarf chinese hickory trees under impact excitations [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2014, 57(2): 345-354
- [16] Du X, Wu C, He L, Tong J. Dynamic characteristics of dwarf chinese hickory trees under impact excitations for mechanical fruit harvesting [J]. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 2015, 8(1): 17-25
- [17] 蔡菲, 王春耀, 王学农, 蒋维栋, 李彦峰. 基于高速摄像技术的振动落果惯性力研究 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(4): 208-212
- Cai F, Wang C Y, Wang X N, Jiang W D, Li Y F. Inertia force of fruits abscised by vibration based on high-speed video camera technology [J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2013, 4(41): 208-212 (in Chinese)
- [18] 丁红星, 李敏通, 彭俊, 刘志杰. 桑葚振动采摘参数的试验研究 [J]. 农机化研究, 2016, 38(10): 183-186
- Ding H X, Li M T, Peng J, Liu Z J. Experimental study on the vibration parameters of mulberry picking [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2016, 38(10): 183-186 (in Chinese)
- [19] Fu L, Okamoto H, Hoshino Y. Optimal vibrating speed of jigsaw for harvesting high-bush blueberries in japan [J]. *International Agricultural Engineering Journal*, 2011, 20(4): 1-7
- [20] Torregrosa A, Albert F, Aleixos N, Ortiz C, Blasco J. Analysis of the detachment of citrus fruits by vibration using artificial vision [J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 119: 1-12
- [21] Zhou J, Karkee M, He L, Zhang Q. Effect of shaking frequency on fruit motion patterns and damage rate during cherry detaching process [C]. In: *Proceedings of the American Society of Agricultural and Biological Engineers International Meeting 2013*. Kansas: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2013
- [22] Zhou J, He L, Karkee M, Zhang Q. Analysis of shaking-induced cherry fruit motion and damage [J]. *Biosystems Engineering*, 2016, 144: 105-114
- [23] Villibor G P, Santos F L, Queiroz D M D, Junior J K K. Determination of modal properties of the coffee fruit-stem system using high speed digital video and digital image processing [J]. *Acta Scientiarum Technology*, 2016, 38(1): 41-45
- [24] Castro-García S, Rosa U A, Gliever C J, Smith D, Burns J K. Video evaluation of table olive damage during harvest with a canopy shaker [J]. *Horttechnology*, 2009, 19(2): 260-266
- [25] 傅隆生, 彭俊, 孙世鹏, 张发年, 张晨, 崔永杰, 李瑞. 一种振动式果实采摘器: 中国, ZL201310412642. 8[P]. 2015-12-09
- Fu L S, Peng J, Sun S P, Zhang F N, Zhang C, Cui Y J, Li R. A fruit vibration harvester: China, ZL201310412642. 8[P]. 2015-12-09 (in Chinese)
- [26] Castro-García S, Castillo-Ruiz F J, Jimenez-Jimenez F, Gil-Ribes J A, Blanco-Roldán G L. Suitability of spanish 'manzanilla' table olive orchards for trunk shaker harvesting [J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 129: 388-395
- [27] Tombesi S, Poni S, Palliotti A, Farinelli D. Mechanical vibration transmission and harvesting effectiveness is affected by the presence of branch suckers in olive trees [J]. *Biosystems Engineering*, 2017, 158: 1-9
- [28] Polat R, Gezer I, Guner M, Dursunc E, Erdogan D. Mechanical harvesting of pistachio nuts [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 79(4): 1131-1135
- [29] Ferguson L, Glozer K, Reyes H, Rosa U A, Castro-García S. Evaluating california pistachio trunk shaking harvesters [J]. *Acta Horticulturae*, 2014, 965(1028): 377-380
- [30] 彭俊, MANUEL Vázquez-Arellano, 孙世鹏, 李瑞, 杨有刚, 崔永杰, 傅隆生. 冬枣果实物理参数与生物特性研究 [J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(8): 95-100
- Peng J, Manuel V A, Sun S P, Li R, Yang Y G, Cui Y J, Fu L S. Study on the physical and biological properties of winter jujube fruit [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(8): 95-100 (in Chinese)