



李忠英,赖曲芳,邓勇杰,等.齿梳式油茶花药采集器关键部件设计与试验[J].江西农业大学学报,2024,46(4):1037-1051.  
LI Z Y, LAI Q F, DENG Y J, et al. Design and testing of key components of comb-type *Camellia oleifera* anther collector[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(4): 1037-1051.

# 齿梳式油茶花药采集器关键部件设计与试验

李忠英<sup>1,2</sup>, 赖曲芳<sup>1</sup>, 邓勇杰<sup>1,2</sup>, 刘木华<sup>1,2</sup>, 胡淑芬<sup>1,2\*</sup>, 张露<sup>3</sup>,  
胡坚文<sup>1,2</sup>, 曹昕奕<sup>1,2</sup>, 林玉琴<sup>1</sup>

(1. 江西农业大学 工学院, 江西 南昌 330045; 2. 江西省现代农业装备重点实验室, 江西 南昌 330045; 3. 江西农业大学 林学院, 江西 南昌 330045)

**摘要:**【目的】针对油茶花粉人工采集难度大、耗时费工、尚未实现机械化等问题,为实现油茶花粉的机械化采收,提出一种通过采集油茶花药来收集花药裂开后释放全部花粉的研究思路,设计一种油茶花药采集装置,并对其工作过程及关键部件参数进行设计与分析。【方法】基于油茶采粉与授粉农艺性状和力学特性的分析,设计一种齿梳式油茶花药采集器,并对油茶花药与齿梳分离机构相互作用过程进行力学分析,确定影响花药采摘性能的主要因素。以花药采净率、花朵损伤率为评价指标,采用单因素试验法,确定齿梳间隙、齿梳安装角度、齿梳辊转速的取值范围;并以齿梳间隙、齿梳安装角度、齿梳辊转速为试验因素,开展三因素三水平正交试验;以花药采净率、花朵损伤率为考核指标,运用 Design-expert 软件对试验因素进行参数优化,获得了各因素的最优参数组合。根据优化后的工作参数,进行油茶花药采摘性能试验,以采摘一朵油茶花花药的时间作为评价指标,测定齿梳式油茶花药采集器的采集效率。【结果】各因素对花药采净率影响的主次排序是齿梳辊转速、齿梳安装角度、齿梳间隙;对花朵损伤率影响的主次排序是齿梳辊转速、齿梳安装角度、齿梳间隙。综合分析选取最优参数组合为:齿梳间隙为 0.59 mm,齿梳安装角度为 58°,齿梳辊转速为 322.23 r/min;该花药采集器采净率为 97.02%,花朵损伤率为 8.33%。采摘性能试验表明,齿梳式油茶花药采集器平均采集效率约为 3.88 s/朵。【结论】提出的齿梳机构采摘花药的方法可行,研制的齿梳式油茶花药采集器运行稳定,满足油茶生产农艺要求,可为油茶机械化采粉技术与装备研究提供参考。

**关键词:**油茶花药采集器;齿梳式;关键部件;采摘;正交试验

中图分类号:S225.93;S776.2 文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2286(2024)04-1037-15



## Design and testing of key components of comb-type *Camellia oleifera* anther collector

LI Zhongying<sup>1,2</sup>, LAI Qufang<sup>1</sup>, DENG Yongjie<sup>1,2</sup>, LIU Muhua<sup>1,2</sup>, HU Shufen<sup>1,2\*</sup>,  
ZHANG Lu<sup>3</sup>, HU Jianwen<sup>1,2</sup>, CAO Xinyi<sup>1,2</sup>, LIN Yuqin<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. Jiangxi Key Laboratory of Modern Agricultural Equipments, Nanchang 330045, China; 3. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

收稿日期:2024-01-22 修回日期:2024-03-08

基金项目:中央财政林业科技推广示范项目(JXTG[2024]01)

Project supported by Central Finance Forestry Science and Technology Promotion Demonstration Project (JXTG [2024]01)

作者简介:李忠英,硕士生,orcid.org/0009-0009-8251-2918,2816125706@qq.com;\*通信作者:胡淑芬,副教授,主要从事农业机械装备研究,orcid.org/0000-0003-0509-3130,812225371@qq.com。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

**Abstract:** [Objective] In order to address the difficulties of manual collection such as labor intensity and time consumption, as well as the lack of mechanization, this study proposes the design of a device for collecting *Camellia oleifera* anther, which aims to capture all the pollen released after the anther splits. Furthermore, the working process and key component parameters of the device have been designed and analyzed. [Method] Based on the analysis of the pollination and fertilization agronomic traits and mechanical properties of *Camellia oleifera*, a comb-type *Camellia oleifera* anther collector was designed. The interaction process between the *Camellia oleifera* anther and the comb separation mechanism was mechanically analyzed to determine the main factors affecting anther harvesting performance. Using anther cleaning rate and flower damage rate as evaluation indicators, a single-factor experimental method was employed to determine the range of values for the comb clearance, comb installation angle and comb roller speed. Furthermore, a three-factor and three-level orthogonal experiment was conducted with comb clearance, comb installation angle, and comb roller speed as the experimental factors. Using anther cleaning rate and flower damage rate as assessment indicators, the Design-expert software was utilized to optimize the experimental factors and obtain the optimal parameter combinations for each factor. Based on the optimized working parameters, a performance test was conducted on the *Camellia oleifera* anther harvesting by using the time taken to harvest the anther of a single *Camellia oleifera* flower as the evaluation metric. The harvesting efficiency of the comb-type *Camellia oleifera* anther collector was determined. [Result] The ranking of factors in terms of affecting the anther cleaning rate is comb roller speed, comb installation angle, and comb clearance. For the flower damage rate, the ranking of factors is comb roller speed, comb installation angle, and comb clearance. Based on the comprehensive analysis, the optimal combination of parameter is: comb clearance of 0.59 mm, comb installation angle of 58°, and comb roller speed of 322.23 r/min. With these parameters, the anther collector achieves an anther net collection rate of 97.02% and a flower damage rate of 8.33%. The harvesting performance test shows that the comb-type *Camellia oleifera* anther collector has an average harvesting efficiency of approximately 3.88 seconds per flower. [Conclusion] The proposed method of using the comb mechanism for anther collection is feasible, and the developed comb-type *Camellia oleifera* anther collector operates stably, meeting the agronomic requirements for *Camellia oleifera* production. It can provide a reference for research on the mechanization of pollen collection technology and equipment for *Camellia oleifera*.

**Keywords:** *Camellia oleifera* anther collector; comb-type; key components; harvesting; orthogonal experiment

【研究意义】油茶是我国特有的木本油料树种,油茶产业是我国乡村振兴的重要产业,对促进经济发展,增加农民收入发挥了重大作用<sup>[1]</sup>。油茶属于花果同期的林业经济作物,生长缓慢,生长周期长,每年秋冬季开花,次年秋冬季结实<sup>[2-3]</sup>。油茶自然授粉率低是影响油茶产量和油茶产业健康发展的主要原因之一<sup>[4]</sup>。人工辅助授粉是提高油茶产量的重要手段<sup>[5-6]</sup>。但人工辅助授粉必须要有足够的花粉量,且花粉必须保持良好的活性<sup>[7-9]</sup>。因此,油茶花粉采集是提高油茶产量的关键和基础。目前油茶花粉采集主要是人工采集方式。由于油茶多种植在山地丘陵地带,地形、树形复杂、坡度大、条带狭小<sup>[10]</sup>,人工采粉耗时、费工、成本高、作业危险,还容易损伤花朵;且裂开的油茶花粉质量非常轻,采集时易飞散到空中,不易收集;油茶花会分泌花蜜黏住花粉,难以采集<sup>[11-12]</sup>;单朵油茶花的花粉量很少,采集时间长、采集效率低,从而影响花粉活性。因此,人工采集花粉无法满足辅助授粉所需的花粉量和花粉活力,而我国现有劳动力缺乏,劳动力成本高成为制约油茶产业发展的痛点<sup>[13]</sup>。因此,机械化采集油茶花粉是油茶产业良性发展的必然趋势,研制轻简高效低损的油茶花粉采集装置对推动我国油茶产业健康发展具有重要的科学意义和应用前景。【前人研究进展】国内关于油茶花粉采集方法与机理的研究非常少,目前国内学者吴泽超等<sup>[14]</sup>以油茶花为研究对象,设计了一种智能采摘机械手末端执行装置,该采摘机械手爪利用连杆运动原理与电动推杆驱动相结合方式,实现手爪对油茶花朵的精准抓取与

收集。在其他作物的采摘方面,国内相关研究相对较多,万芳新等<sup>[15]</sup>设计了一种齿梳—气吸式花椒采摘装置,通过电机带动梳齿式刀片旋转以及轴流式风机产生的负压作用,对花椒果梗部位进行剪切以及收集;刘少华等<sup>[16]</sup>设计了梳脱式钙果采收试验台,通过梳齿部件不断周转运动,被梳脱下来的果实在惯性、梳齿的回拨及挡板的共同作用下,最后落入试验台后方的集果箱中,从而完成采收过程。这些研究为油茶花药采集提供了思路和经验。由于油茶是我国特有的油料树种,国外并没有相关研究,但在其他作物采摘技术和机械方面已有大量相关研究。Dehkordi等<sup>[17]</sup>设计了一种菊花采摘机,使用梳子结构采摘菊花,这台机器结构简单,但采摘过程会对植株造成很大损害;Ehlert等<sup>[18]</sup>对洋甘菊采收装置进行了对比试验,得出的结论是:带有双梳形部分的旋转搓鼓可以达到很好的采摘效果以及不同参数的梳齿刀片对洋甘菊采摘特性有很大的影响。

【本研究切入点】通过前期研究发现,将未开裂的油茶花药放入恒温干燥箱中,在25℃条件下干燥40 min左右,花药可以完全裂开释放出花粉,且能保证花粉萌发质量。基于此,本研究通过对油茶开花习性和花粉特性的研究,突破传统采集花粉的研究方法,创新性提出通过采集油茶花药来收集花药裂开后释放全部花粉的研究思路,并研究了一种齿梳式油茶花药采集器,采用梳齿间隙大于花丝直径而小于花药直径的齿梳,将尚未开裂的花药从花丝上分离,再通过负压收集机构收集花药。【拟解决的关键问题】本研究拟从油茶花农艺性状和力学特性研究入手,研制物理样机。以梳齿间隙、齿梳安装角度、齿梳辊转速为影响因素,以花药采净率、花朵损伤率为指标开展试验研究,明确各因素主次关系,并寻求最优参数组合。研究方法及获得的参数可为油茶机械化采粉技术与装备研究提供参考。

## 1 油茶花农艺性状及力学特性研究

### 1.1 试验材料

选取江西省南昌市进贤县江西省高氏林牧发展有限公司油茶基地的“长林4号”、“长林40号”和“长林53号”品种油茶树的油茶花作为试验对象<sup>[19-20]</sup>。

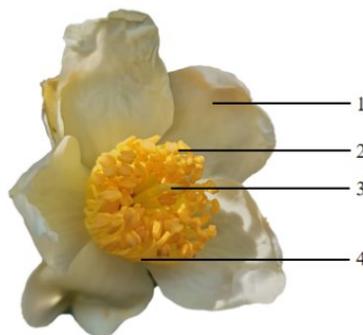
### 1.2 试验设备

数显游标卡尺(精度:0.01 mm)、数显拉力计(型号:ZMF-10,量程:0~10 N,精度:±1%)。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 油茶花器尺寸测量

试验时间为2023年11月18日—2023年12月9日,选择天晴的试验日。试验当天10:00前(10:00前大部分油茶花药尚未开裂),随机选取“长林4号”、“长林40号”和“长林53号”品种油茶树各5棵,共15棵,每棵树为1组,从每棵树随机选取10朵盛花期的油茶花(图1)作为测量样本,共计150个测量样本。用数显游标卡尺测量油茶花的花冠直径尺寸 $d_1$ 、花蕊直径 $d_2$ 、花丝直径 $d_3$ 、花药直径 $d_4$ 、花药长度 $l_1$ 和花丝长度 $l_2$ 。



1:花瓣;2:花药;3:柱头;4:花丝。

1: Petal; 2: Anther; 3: Stigma; 4: Filament.

图1 油茶花花器名称

Fig.1 Name of *Camellia oleifera* flower floral organ

1.3.2 花药、花丝分离力测定

试验当天 10:00 前,随机选取“长林 4 号”、“长林 40 号”和“长林 53 号”品种油茶树各 5 棵,共 15 棵,每棵树为 1 组。从每棵树中随机选取 10 朵盛花期的油茶花,对齿梳分离花药的分离力以及花丝从花朵上分离的分离力进行测定,共 150 个试验样本。试验时,借助细线作为钩住花药或花丝的工具,即细线一端与数显拉力计固定,另一端沿轴向拉力固定住花药或花丝,在油茶花药、花丝脱落的瞬间记录数据。

1.4 结果与分析

由表 1 可知,油茶花冠直径  $d_1$ 、花蕊直径  $d_2$  均值分别为 56.58 mm 和 16.95 mm,该测量结果对齿梳辊长度参数设计非常关键;油茶花药直径  $d_4$ 、长度  $l_1$  和花丝直径  $d_3$ 、长度  $l_2$  均值分别为 1.56, 2.02, 0.65, 14.21 mm。由此可以看出,花药截面尺寸明显大于花丝直径尺寸,该数据是梳齿间隙参数设计的依据。

表 1 油茶花花器测量参数  
Tab.1 Measurement parameters of *Camellia oleifera* flower

部位 Part	范围 Range	平均值 Average	标准差 Standard deviation
花冠直径 $d_1$ /mm The diameter of the flower crown	41.54~68.71	56.58	6.36
花蕊直径 $d_2$ /mm The diameter of the pistil	13.06~22.87	16.95	2.15
花丝直径 $d_3$ /mm The diameter of the stamen	0.33~1.00	0.65	0.14
花药直径 $d_4$ /mm The diameter of the anther	1.09~2.25	1.56	0.30
花药长度 $l_1$ /mm The length of the anther	1.41~3.27	2.02	0.33
花丝长度 $l_2$ /mm The length of the stamen	10.38~18.62	14.21	1.69

由图 2 可知,花丝从花朵上分离的分离力和齿梳将油茶花药从花丝上分离的分离力均值分别为 3.82 N 和 0.48 N。由此可知,在轴向拉力作用下,花药与花丝的分离力明显小于花丝与花朵的分离力。

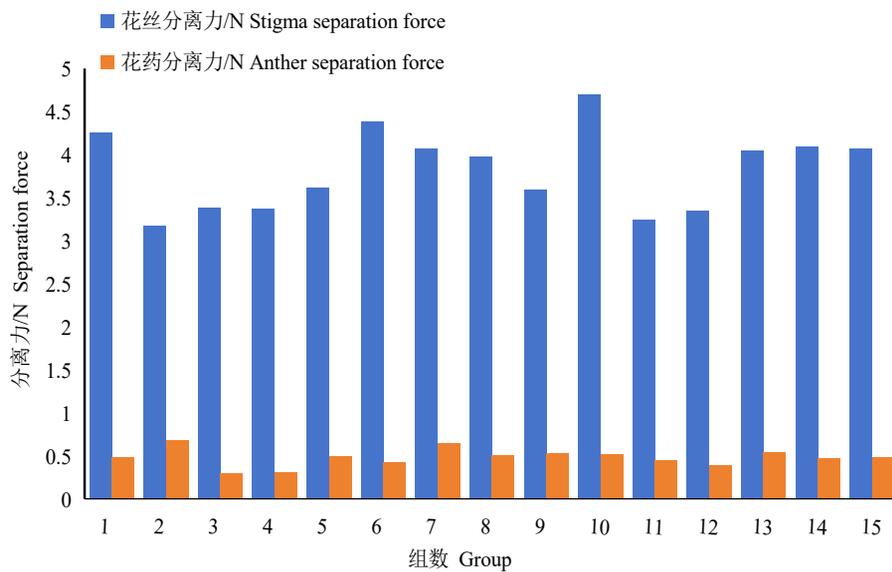


图 2 油茶花药、花丝分离力测定结果

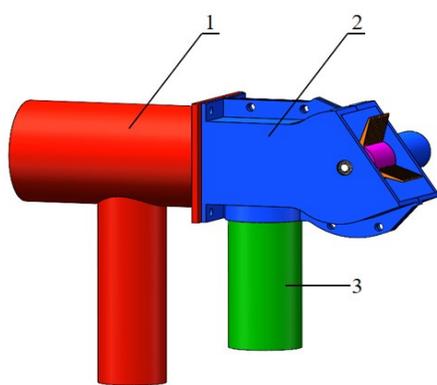
Fig.2 Determination results of separation power of *Camellia oleifera* anthers and filaments

## 2 装置结构原理与采摘影响因素分析

### 2.1 试验装置结构原理

#### 2.1.1 装置结构

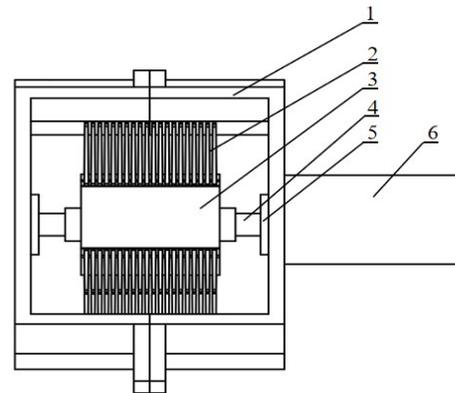
根据油茶花农艺性状和力学特性,设计了一种齿梳式油茶花药采集器<sup>[21]</sup>(图3)。该采集器主要由齿梳采摘机构、花药收集盒和负压收集机构组成。齿梳采摘机构(图4)由外壳、齿梳、齿梳辊、传动轴、滚动轴承和微型电机等组成,每排齿梳通过齿梳安装卡槽固定在齿梳辊上,齿梳辊通过滚动轴承连接在外壳上。齿梳采摘机构的后端通过螺栓与负压收集机构的进风口连接。



1:负压收集机构;2:齿梳采摘机构;3:花药收集盒。  
1: Negative pressure filtration mechanism; 2: Comb harvesting mechanism; 3: Anther collection box.

图3 齿梳式油茶花药采集器

Fig.3 Three dimensional diagram of comb type *Camellia oleifera* anther collector mechanism



1:外壳;2:齿梳;3:齿梳辊;4:传动轴;5:滚动轴承;  
6:微型电机。

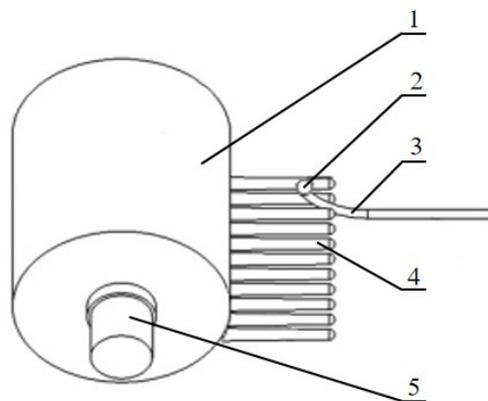
1: Shell; 2: Comb; 3: Comb roller; 4: Transmission shaft; 5: Roller bearing; 6: Micro motor.

图4 齿梳采摘机构结构

Fig.4 Structural diagram of comb picking

#### 2.1.2 工作原理

齿梳采摘机构分离油茶花药的工作原理如图5所示。工作时,将梳齿间隙大于花丝直径小于花药直径的齿梳对准油茶花的花药,启动开关,微型电机带动齿梳辊旋转,齿梳辊上的多排齿梳对花药进行牵拉分离,将花药从花丝上分离下来;采摘下来的花药通过负压风机的负压收集到花药收集盒内,从而实现采集花药的目的。



1:齿梳辊;2:花药;3:花丝;4:齿梳;5:传动轴。

1: Comb roller; 2: Anther; 3: Stamen; 4: Comb; 5: Transmission shaft.

图5 齿梳采摘机构分离油茶花药原理

Fig.5 Principle diagram of comb harvesting mechanism for separating *Camellia oleifera* anthers

### 2.2 油茶花药与齿梳相互作用力影响因素分析

工作时,将花丝和花药同时喂入齿梳采摘机构,花丝被梳齿拉直,花药在梳齿分离力和摩擦力共同作用下,将花药从花丝上分离采摘下来。采摘过程可视为梳齿对花药的碰撞过程。为了方便力学分析,

将花药、花丝与梳齿简化为规则刚体。采摘花药时,花药在相邻两梳齿间的受力状况如图 6 所示。

花药被分离采摘力学条件<sup>[22-23]</sup>:

$$F - F_f \cos \beta \geq T \tag{1}$$

其中,

$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cos 2\gamma} = 2F_1 \sin \gamma \tag{2}$$

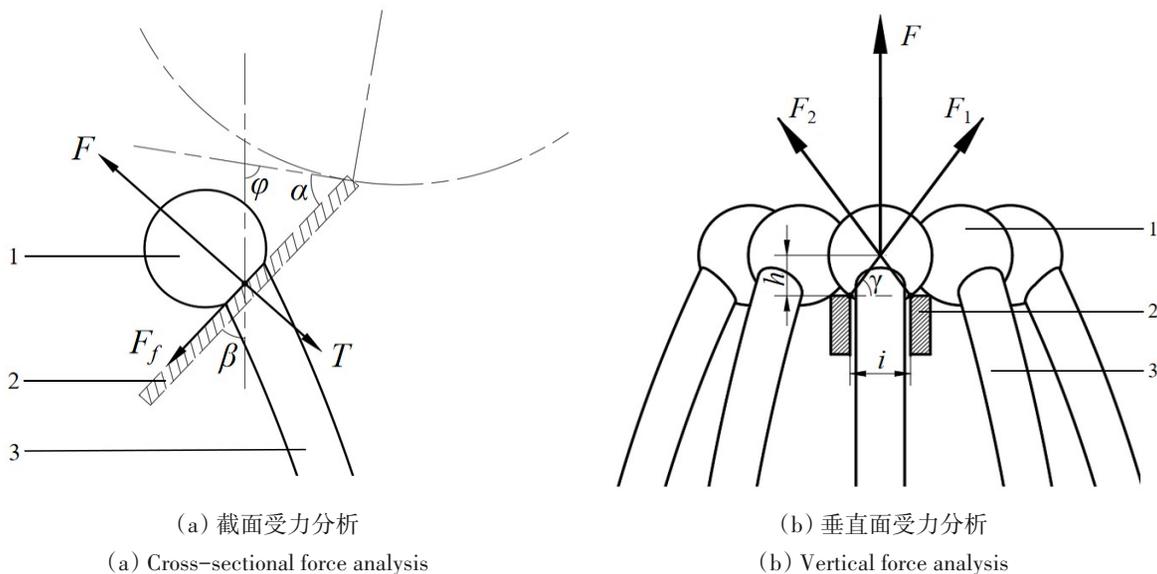
$$\sin \gamma = \frac{h}{\sqrt{h^2 + \left(\frac{i}{2}\right)^2}} \tag{3}$$

$$\alpha + \beta + \phi = 180^\circ \tag{4}$$

由上式可得

$$F_1 \geq \frac{(T + F_f \cos \beta) \sqrt{4h^2 + i^2}}{4h} \tag{5}$$

式(2)~(5)中  $F_1$  为左梳齿对花药的分离力,  $N$ ;  $F_2$  为右梳齿对花药的分离力,  $N$ ;  $F$  为相邻两梳齿对花药分离力的合力,  $N$ ;  $F_f$  为花药所受摩擦力,  $N$ ;  $T$  为花药和花丝之间的结合力,  $N$ ;  $i$  为相邻两梳齿间距,  $\text{mm}$ ;  $h$  为梳齿在花药接触点和花药重心的距离,  $\text{mm}$ ;  $\alpha$  为齿梳安装角,  $(^\circ)$ ;  $\beta$  为齿梳切线与垂直方向之间的夹角,  $(^\circ)$ ;  $\gamma$  为  $F_1$  与水平方向的夹角,  $(^\circ)$ ;  $\phi$  为齿梳辊表面切线与垂直方向之间的夹角,  $(^\circ)$ 。



1: 花药; 2: 梳齿; 3: 花丝。

1: Anther; 2: Comb; 3: Stamen.

图 6 花药受力示意

Fig.6 Anther force diagram

由式(4)可知,  $\beta$ 角与齿梳安装角  $\alpha$  相关, 齿梳安装角  $\alpha$  不同, 对应的  $\beta$ 角不同。由式(5)可知, 在梳齿间隙  $i$  一定的情况下, 当齿梳安装角  $\alpha$  增大时, 油茶花药在梳齿作用下的  $\beta$ 角将减小, 油茶花药受齿梳分离力  $F_1$  将随之增大; 由式(5)可知, 在  $\beta$  一定情况下,  $F_1$  与  $i$  正相关, 梳齿间隙  $i$  变大, 油茶花药受齿梳的分离力  $F_1$  也将随之增大, 花药更容易脱落。

设油茶花药质量为  $m$ 、油茶花药和花丝喂入的初始速度为  $v_0$ 、油茶花药分离速度为  $v$ 、油茶花药与梳齿作用时间为  $\Delta t$ 、油茶花药受梳齿的合力为  $F$  时, 由动量定理可得:

$$F\Delta t = m(v - v_0) \tag{6}$$

由式(6)可知, 当齿梳辊转速增大时, 油茶花药在梳齿作用下分离的速度  $v$  将增大, 即油茶花药受梳齿合力  $F$  也将随之增大。综上分析可得, 油茶花药在梳齿作用下的分离力与梳齿间隙、齿梳安装角度、齿梳辊转速有关。

### 3 关键部件设计与参数确定

齿梳采摘机构是齿梳式油茶花药采集器的关键部件,齿梳辊和齿梳的结构参数均会影响花药采摘效果。以油茶花器物料参数为依据,设计齿梳采摘机构结构参数。

#### 3.1 齿梳辊结构参数确定

齿梳辊的结构参数是齿梳采摘机构的重要参数(图7),决定了齿梳排数以及花药采摘空间区域的大小。

齿梳旋转频率和齿梳辊转速<sup>[24]</sup>为:

$$f = \frac{zn}{60} \quad (7)$$

$$n = \frac{60v_c}{\pi d} \quad (8)$$

式(7)(8)中 $f$ 为齿梳旋转频率; $z$ 为齿梳排数, $n$ 为齿梳辊转速,r/min; $v_c$ 为齿梳辊表面线速度,m/s; $d$ 为齿梳辊直径,mm。

由式(7)和式(8)可得

$$d = \frac{zv_c}{\pi f} \quad (9)$$

由式(9)可知,在齿梳辊表面线速度 $v_c$ 和齿梳旋转频率 $f$ 一定的情况下,齿梳辊直径 $d$ 与齿梳排数 $z$ 正相关,齿梳辊直径 $d$ 越大,齿梳排数也将增多。同时,齿梳辊直径 $d$ 越大,花药采集器消耗的功率也会随之增加,从而增加成本。综合考虑,齿梳辊的直径取28 mm。

综合考虑齿梳辊的结构尺寸与花药采摘的效果,设计齿梳辊的齿梳数为4排。齿梳辊的长度应大于油茶花蕊直径而小于花冠直径。经试验测量,油茶花蕊直径为13.06~22.87 mm,花冠直径为41.54~68.71 mm,因此,设计齿梳辊的长度为35 mm。

#### 3.2 梳齿长度参数确定

梳齿长度是齿梳采摘机构的重要参数,梳齿长度直接影响油茶花丝和花药的喂入效果,从而影响油茶花药的采摘效果。油茶花药采摘模型如图8所示。梳齿工作长度的确定,要综合考虑油茶花蕊直径与花丝长度两方面因素。

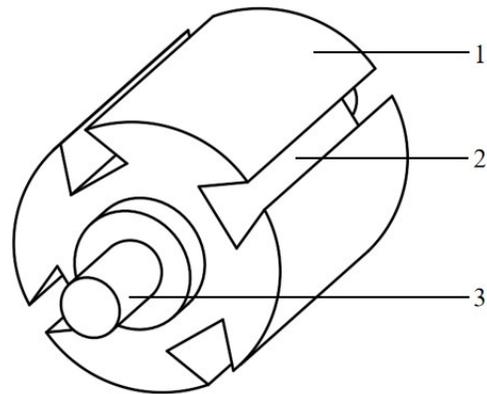
《农业机械学》中介绍了梳齿长度与农作物秆长之的关系式<sup>[25]</sup>:

$$l = l_1 \cos \theta \quad (10)$$

$$\theta = 2\arcsin\left(\frac{b}{2a}\right) \quad (11)$$

式(10)(11)中 $l$ 为梳齿有效工作段长度,mm; $l_1$ 为花丝长度,mm; $\theta$ 为梳齿采摘每朵油茶花的花药所转过的角度, $^\circ$ ; $a$ 为旋转中心至梳齿顶端的距离,mm; $b$ 为花蕊直径,mm。

经试验测量,油茶花蕊直径为13.06~22.87,油茶花丝长度平均为14.21 mm。由式(10)(11)可得梳齿有效工作长度 $l=11.89\sim 13.45$  mm,梳齿的实际长度应大于梳齿有效工作长度,设计梳齿实际工作长度为23 mm。



1:齿梳辊;2:齿梳安装卡槽;3:传动轴。

1: Comb roller; 2: Comb installation slot; 3: Transmission shaft.

图7 齿梳采摘滚筒结构

Fig.7 Structure diagram of the harvesting roller with comb

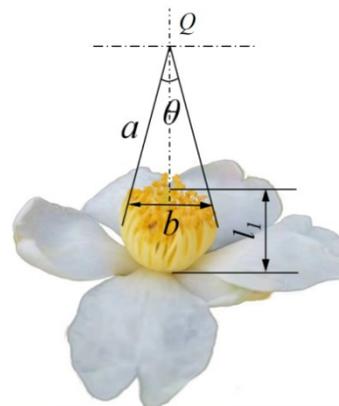


图8 油茶花药采摘模型

Fig.8 *Camellia oleifera* anthers harvesting model

### 3.3 梳齿间隙与梳齿厚度参数确定

梳齿间隙与梳齿厚度直接影响花丝与花药的分离效果,是高效采摘花药的关键。梳齿间隙过大,可能造成花药与花丝无法分离,出现漏采;梳齿间隙过小或梳齿厚度过大,梳齿则不能顺利进入花丝间隙,造成梳齿堵塞,同样影响花药的采摘;梳齿厚度过小,容易对花药造成损伤。因此,为防止采摘花药时梳齿间发生堵塞,梳齿间隙应当大于油茶花丝直径;为防止梳齿采摘花药时发生漏摘,梳齿间隙应当小于油茶花药直径;梳齿厚度应小于花药直径大于花丝直径。经试验测量,油茶花丝直径为 0.33~1.00 mm,油茶花药尺寸为 1.09~3.27 mm。因此,梳齿间隙的理论值取值范围为 0.33~1.09 mm,梳齿厚度取值范围为 0.4~0.8 mm。将作业参数设置相同进行预实验,发现齿梳厚度 0.6 mm 时效果最好,最终设计齿梳厚度为 0.6 mm。由于花药在采摘时会发生挤压变形,因此,梳齿最佳采摘间隙需要通过试验确定。

## 4 林间试验

### 4.1 试验条件

试验材料为江西省南昌市进贤县江西省高氏林牧发展有限公司油茶基地的“长林 4 号”、“长林 40 号”和“长林 53 号”油茶树的油茶花。通过 3D 打印技术加工出齿梳式油茶花药采集器样机(图 9)。根据试验需要,选取盛花期的油茶花作为试验样本。试验于 2023 年 11 月 22—24 日 10:00 前点进行。



图 9 齿梳式油茶花药采集器样机

Fig.9 The prototype of the comb-type *camellia oleifera* anther collector

### 4.2 影响因素和评价指标

由前述油茶花药与梳齿相互作用力学分析可知,影响梳齿采摘力的主要因素有梳齿间隙(因素 A)、齿梳安装角度(因素 B)和齿梳辊转速(因素 C)。按照齿梳式油茶花药采集器工作性能要求,本试验选用花药采净率  $T_1$ 、花朵损伤率  $T_2$  作为采摘效果评价指标<sup>[26-31]</sup>。

1) 花药采净率  $T_1$ : 单朵油茶花被机器采摘的花药颗数与该朵油茶花花药总颗数的百分比,其计算式为:

$$T_1 = \frac{W_1}{W_1 + W_2} \times 100\% \quad (12)$$

式(12)中  $W_1$  为被齿梳采摘下的花药总颗数;  $W_2$  为被齿梳采摘后花朵上面残留的花药颗数。

2) 花朵损伤率  $T_2$ : 被采摘花药的油茶花朵中破损的花朵(有明显花丝和柱头损伤)数与被采摘花药的油茶花朵总数的百分比,其计算式为:

$$T_2 = \frac{W_3}{W_3 + W_4} \times 100\% \quad (13)$$

式(13)中  $W_3$  为被采摘花药的油茶花朵损伤数;  $W_4$  为被采摘花药的油茶花朵未损伤数。

### 4.3 单因素试验

#### 4.3.1 试验方案

为分析各试验因素对试验评价指标的影响规律,选取梳齿间隙、齿梳安装角度、齿梳辊转速为试验

因素,通过预试验,定义各试验因素的确定值为 0.6 mm、60°、320 r/min,以 60 朵油茶花(每朵花采摘花药时间为 6 s)的花药采净率  $T_1$  和花朵损伤率  $T_2$  为评价指标,分别进行单因素试验,如表 2 所示。

表 2 单因素试验因素水平表  
Tab.2 Single factor test factor level table

水平 Level	因素 Factor		
	齿梳间隙/mm	齿梳安装角/(°)	齿梳辊转速/(r·min <sup>-1</sup> )
	Comb gap	Comb installation angle	Comb roller speed
1	0.4	45	220
2	0.6	60	270
3	0.8	75	320
4	1.0	90	370

4.3.2 结果与分析

单因素试验数据分析结果如图 10 所示。由图 10(a)可知,当梳齿间隙为 0.4~0.6 mm 时,花药采净率随着梳齿间隙的增大而逐渐增加;当梳齿间隙为 0.6~1 mm 时,花药采净率随着梳齿间隙的增大而呈下降趋势。原因如下:当齿梳间隙过小,花丝所受齿梳的挤压力和摩擦力增大,会造成花丝喂入困难,不能完成花药的采摘;齿梳间隙过大,不利于齿梳携带花药分离,会造成花药漏采,花药采净率下降。在梳齿间隙为 0.4~0.8 mm 时,花朵损伤率变化不大,表现不明显;齿梳间隙超过 0.8 mm 时,花朵损伤率快速增加,表现明显。可以看出,梳齿间隙在 0.4~0.8 mm 时,梳齿间隙对花药采净率影响较小。由此,确定梳齿间隙取值范围为 0.4~0.8 mm。

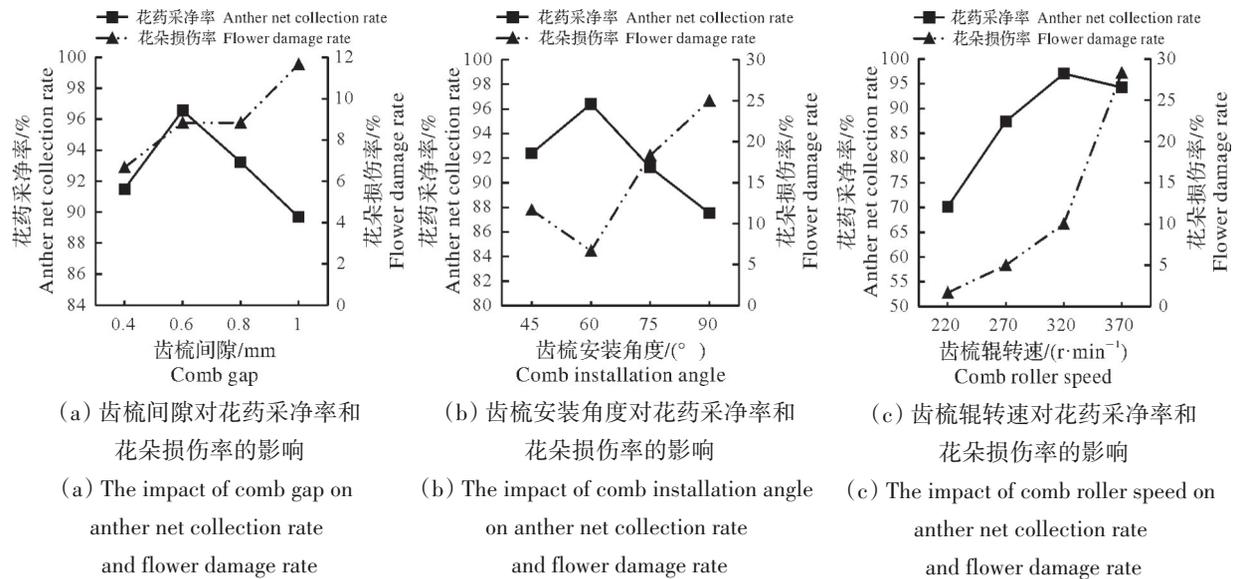


图 10 单因素试验结果  
Fig.10 Single factor test result

由图 10(b)可知,当齿梳安装角度在 45°~60° 范围内时,花药采净率会随齿梳安装角度的增大呈逐渐上升趋势,而此时花朵损伤率会随齿梳安装角度的增大呈逐渐下降趋势;当齿梳安装角度在 60°~90° 范围内时,花药采净率会随齿梳安装角度的增大呈逐渐下降趋势,而此时花朵损伤率会随齿梳安装角度的增大呈逐渐上升趋势。原因如下:当齿梳安装角度较小时,会出现花丝未能完全喂入齿梳的情况,此时花药采净率较低;当齿梳安装角度较大时,花药受到齿梳的压力较大,容易对油茶花造成损伤,花朵损伤率提升。由此,确定齿梳安装角度取值范围为 45°~75°。

由图 10(c)可知,当齿梳辊转速为 220~320 r/min 时,花药采净率、花朵损伤率随齿梳辊转速的增大呈逐渐上升趋势;当齿梳辊转速为 320~370 r/min 时,花药采净率随着齿梳辊转速的增大呈逐渐下降趋势,而此时花朵损伤率随着齿梳辊转速的增大明显上升。原因如下:齿梳辊转速过小,齿梳作用在花药上的力也小,会降低花药采摘效率;齿梳辊转速过大,齿梳对油茶花药、花朵的冲击也大,容易造成对花药、花

朵的损伤,影响花药的采摘效果。由此,确定齿梳辊转速取值为270~370 r/min。

#### 4.4 正交试验

##### 4.4.1 试验方案

为分析梳齿间隙、齿梳安装角度和齿梳辊转速对齿梳式花药采集器机械作业性能的影响,寻找最佳参数组合,开展正交试验研究。采用三因素三水平的Box Behnken试验设计原理进行正交试验,结合单因素试验因素取值范围,分析各因素对各指标的影响程度。正交试验因素与水平如表3所示。

表3 正交试验因素水平表  
Tab.3 Test factor level table

水平 Level	齿梳间隙/mm Comb gap	齿梳安装角/(°) Comb installation angle	齿梳辊转速/(r·min <sup>-1</sup> ) Comb roller speed
-1	0.4	45	270
0	0.6	60	320
1	0.8	75	370

##### 4.4.2 回归模型建立与显著性分析

正交试验结果如表4所示,利用Design-Expert软件对试验结果进行多元回归拟合,如表5、表6所示。

表4 花药采摘正交试验结果  
Tab.4 Orthogonal experimental results of anther harvesting

试验号 Test number	因素 Factor			评价指标 Evaluation indexes	
	A/mm	B/(°)	C/(r·min <sup>-1</sup> )	T <sub>1</sub> /%	T <sub>2</sub> /%
1	0.4	45	320	92.23	13.33
2	0.8	45	320	91.21	11.66
3	0.4	75	320	90.74	18.33
4	0.8	75	320	89.55	15
5	0.4	60	270	86.89	5
6	0.8	60	270	85.17	8.33
7	0.4	60	370	94.85	26.67
8	0.8	60	370	94.97	25
9	0.6	45	270	87.06	8.33
10	0.6	75	270	84.79	6.67
11	0.6	45	370	94.31	25
12	0.6	75	370	93.27	31.67
13	0.6	60	320	97.28	10
14	0.6	60	320	96.71	8.33
15	0.6	60	320	96.63	6.67
16	0.6	60	320	96.98	8.33
17	0.6	60	320	97.09	10

A为齿梳间隙,B为齿梳辊安装角度,C为齿梳辊转速。

A is comb gap, B is comb installation angle, C is comb roller speed.

由表5花药采净率二次多项式回归模型的方差分析可知,花药采净率的回归模型( $P < 0.0001$ )极显著,并且花朵损伤率的拟合方差( $P > 0.05$ )不显著,说明回归方程拟合很好。各因素对花药采净率影响的重要性依次为齿梳辊转速、齿梳安装角度、梳齿间隙。齿梳辊转速对花药采净率影响最大,齿梳安装角度与梳齿间隙对花药采净率影响相对较小,其中,梳齿间隙与齿梳辊转速对花药采净率的交互影响显著。

表 5 花药采净率二次多项式回归模型的方差分析  
Tab.5 Variance analysis of quadratic regression model of anther net collection rate

方差来源 Source	均方 Mean square	自由度 Freedom	平方和 Sum of squares	<i>F</i>	<i>P</i>	
模型 Model	300.73	9	33.41	274.03	<0.000 1	**
A	1.81	1	1.81	14.88	0.006 2	*
B	5.22	1	5.22	42.78	0.000 3	**
C	140.20	1	140.20	1 149.83	<0.000 1	**
AB	0.007 2	1	0.007 2	0.059 3	0.814 7	
AC	0.846 4	1	0.846 4	6.94	0.033 7	**
BC	0.378 2	1	0.378 2	3.10	0.121 6	
A <sup>2</sup>	30.62	1	30.62	251.09	<0.000 1	**
B <sup>2</sup>	46.10	1	46.10	378.11	<0.000 1	**
C <sup>2</sup>	59.89	1	59.89	491.20	<0.000 1	**
残差 Residual	0.853 5	7	0.121 9			
失拟项 Lack of Fit	0.564 8	3	0.188 3	2.61	0.188 5	
纯误差 Pure Error	0.288 7	4	0.072 2			
总误差 Cor Total	301.58	16				

“\*\*”表示极显著( $P<0.01$ ),“\*”表示显著( $P<0.05$ )。

“\*\*”indicates extremely significant correlation( $P<0.01$ )and significant correlation( $P<0.05$ ).

表 6 花朵损伤率二次多项式回归模型的方差分析  
Tab.6 Variance analysis of quadratic regression model of flower damage rate

方差来源 Source	均方 Mean square	自由度 Freedom	平方和 Sum of squares	<i>F</i>	<i>P</i>	
模型 Model	1 073.39	9	119.27	51.90	<0.000 1	**
A	1.39	1	1.39	0.606 89	0.461 5	
B	22.28	1	22.28	9.69	0.017 0	*
C	800.20	1	800.20	348.22	<0.000 1	**
AB	0.688 9	1	0.688 9	0.299 8	0.601 0	
AC	6.25	1	6.25	2.72	0.143 1	
BC	17.35	1	17.35	7.55	0.028 6	*
A <sup>2</sup>	18.98	1	18.98	8.26	0.023 9	*
B <sup>2</sup>	60.50	1	60.50	26.33	0.001 4	*
C <sup>2</sup>	125.56	1	125.56	54.64	0.000 2	**
残差 Residual	16.09	7	2.30			
失拟项 Lack of Fit	8.32	3	2.77	1.43	0.358 9	
纯误差 Pure Error	7.77	4	1.94			
总误差 Cor Total	1 089.48	16				

“\*\*”表示极显著( $P<0.01$ ),“\*”表示显著( $P<0.05$ )。

“\*\*”indicates extremely significant correlation( $P<0.01$ )and significant correlation( $P<0.05$ ).

由表 6 花朵损伤率二次多项式回归模型的方差分析可知,花朵损伤率的回归模型( $P<0.000 1$ )极显著,并且花朵损伤率的拟合方差( $P>0.05$ )不显著,说明回归方程有意义且拟合很好。各因素对花朵损伤率影响的重要性依次为齿梳辊转速、齿梳安装角度、梳齿间隙。齿梳辊转速对花朵损伤率影响最大,齿梳安装角度对花朵损伤率影响相对较小,梳齿间隙对花朵损伤率影响不显著,其中梳齿间隙与齿梳辊转速对花药采净率的交互影响显著。

剔除回归模型中的不显著影响因素( $P>0.05$ )后,得到花药采净率  $T_1$ 、花朵损伤率  $T_2$  的回归方程。

$$T_1=96.94-0.4762A-0.8075B+4.19C+0.46AC-2.7A^2-3.31B^2-3.77C^2 \quad (14)$$

$$T_2=8.67+1.67B+10C+2.08BC+2.12A^2+3.79B^2+5.46C^2 \tag{15}$$

式(14)(15)中A为梳齿间隙,mm,B为齿梳安装角度,(°),C为齿梳辊转速,r/min。

#### 4.4.3 响应曲面分析

为直观分析试验因素交互作用对评价指标的影响规律,绘制回归模型的响应曲面图,如图 11 所示。

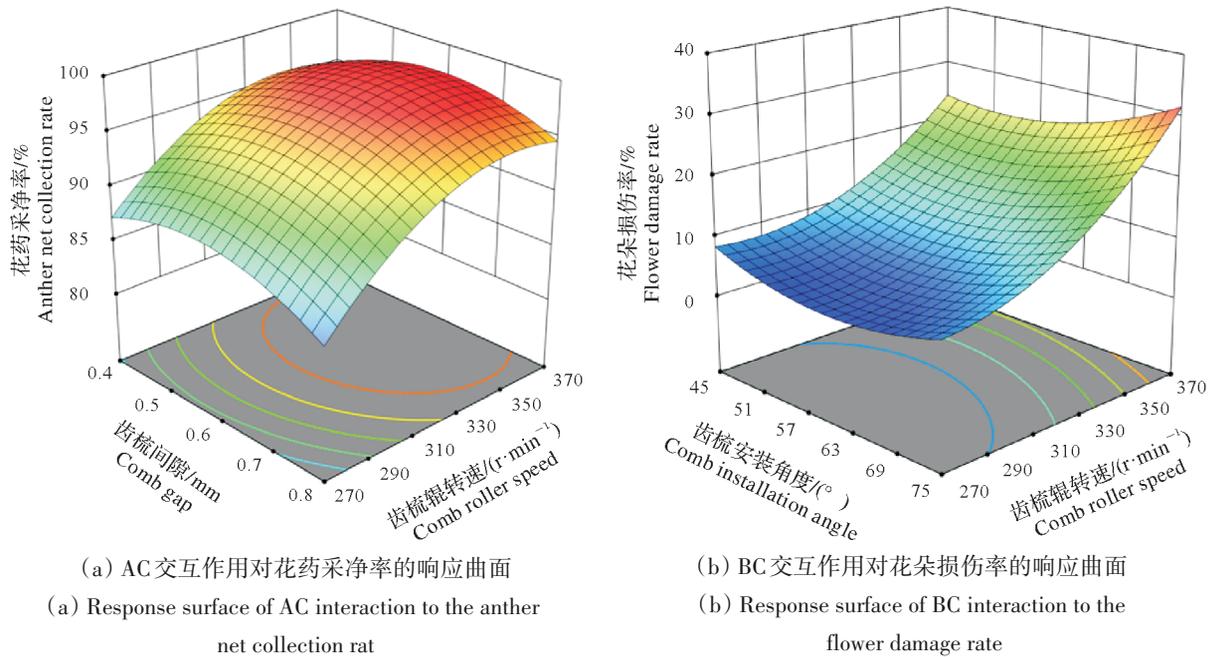


图 11 交互效应 3D 响应曲面  
Fig.11 Interaction 3D response surface

(1)花药采净率响应曲面分析。当固定在 0 水平( $B=60^\circ$ )时,梳齿间隙与齿梳辊转速的交互作用对花药采净率的影响如图 11(a)所示。当梳齿间隙一定时,花药采净率随着齿梳辊转速的增大而增大,当齿梳辊转速为 310~350 r/min 时,花药采净率最大可达到 97.28%。当齿梳辊转速一定时,当梳齿间隙为 0.4~0.6 mm 时,花药采净率随着梳齿间隙增大而增大;当梳齿间隙为 0.6~0.8 mm 时,花药采净率随着梳齿间隙增大而减小;当梳齿间隙为 0.5~0.7 mm 时,花药采净率最大可达到 97.28%。由响应曲面可知,花药采净率沿着齿梳辊转速方向变化较快,沿着梳齿间隙方向变化较慢,齿梳辊转速对花药采净率的影响要比梳齿间隙显著。

(2)花朵损伤率响应曲面分析。当固定在 0 水平( $A=0.6$  mm)时,齿梳安装角度与齿梳辊转速的交互作用对花药采净率的影响如图 11(b)所示。当齿梳安装角度一定时,花朵损伤率随着齿梳辊转速的增大而增大,且增加趋势逐渐增大。齿梳辊转速为 270~330 r/min 时,花朵损伤率最小可达到 5%。当齿梳辊转速一定,齿梳安装角度为  $45^\circ\sim 60^\circ$  时,花朵损伤率随着齿梳安装角度的增大而减小;当齿梳安装角度为  $60^\circ\sim 75^\circ$  时,花朵损伤率随着齿梳安装角度增大而增大;当齿梳安装角度为  $51^\circ\sim 63^\circ$  时,花朵损伤率最小可达到 3.33%。由响应曲面可知,花朵损伤率沿着齿梳辊转速方向变化较快,沿着齿梳安装角度方向变化较慢,齿梳辊转速对花朵损伤率的影响要比齿梳安装角度显著。因此,在满足花朵最低损伤率要求的前提下,优先选用该范围内较大的齿梳辊转速。

#### 4.4.4 参数优化

为获得该齿梳式油茶花药采集器采摘头最优工作参数组合,运用 Design-Expert 12 软件对上述 2 个回归模型进行约束目标求解。采摘花药时,应保证花药采净率最高,在此基础上降低花朵损伤率。因此,设置目标函数  $\max Y_1$ ,花朵损伤率小于 10%,优化所得最佳参数为:梳齿间隙为 0.59 mm、齿梳安装角度为  $57.69^\circ$ 、齿梳辊转速为 322.28 r/min,此时,花药采净率可达 97.18%,花朵损伤率为 8.97%。根据优化结果,将齿梳安装角度设为  $58^\circ$ ,其他条件不变,再次利用软件求优,优化参数结果:梳齿间隙为 0.59 mm、

齿梳安装角度为 $58^\circ$ 、齿梳辊转速为 $322.23\text{ r/min}$ ,此时,花药采净率为 $97.18\%$ ,花朵损伤率为 $8.98\%$ 。根据优化后的工作参数,进行3次重复试验,得到花药采净率为 $97.02\%$ ,花朵损伤率为 $8.33\%$ ,试验结果与理论优化结果一致。

## 4.5 采摘性能试验

### 4.5.1 试验方案

为检验齿梳式油茶花药采集器的采摘性能,根据优化后的工作参数,以花药采集效率(采摘一朵油茶花花药的时间)为评价指标,设计了油茶花药采摘试验。随机选择10棵油茶树,每棵油茶树标记10朵油茶花作为1个试验组,采用齿梳式油茶花药采集器进行花药采摘试验。采摘试验采取就近原则,即采摘完第1朵油茶花的花药后,立马采摘距离第1朵油茶花最近的1朵,直至完成该组中所有标记的油茶花花药的采摘。试验数据如表7所示。

### 4.5.2 结果与分析

由表7可知,齿梳式油茶花药采集器平均采集效率约为 $3.88\text{ s/朵}$ 。

表7 采摘试验结果

Tab.7 Harvesting test result

组别 Groups	采集平均时间/s Average time for harvesting	组别 Groups	采集平均时间/s Average time for harvesting
1	4.03	6	4.11
2	3.92	7	3.84
3	4.06	8	3.78
4	3.77	9	3.74
5	3.67	10	3.86

## 5 结论

基于油茶采粉与授粉农艺性状、力学特性及油茶花器物料性能,提出通过采集油茶花药来收集花药裂开后释放全部花粉的研究思路,并研究了一种齿梳式油茶花药采集器。

分析了油茶花药与齿梳采摘机构相互作用的影响因素,并通过单因素试验得到梳齿间隙区间为 $0.4\sim 0.8\text{ mm}$ ,齿梳安装角度区间为 $45^\circ\sim 75^\circ$ ,齿梳辊转速区间为 $270\sim 370\text{ r/min}$ 。

基于单因素试验结果,运用Design-Expert软件开展正交试验,分析齿梳采摘机构的梳齿间隙、齿梳安装角度和齿梳辊转速等因素对花药采净率、花朵损伤率的影响;并建立回归模型,进行参数优化和试验验证,得到最优参数组合:齿梳间隙 $0.59\text{ mm}$ 、齿梳安装角度 $58^\circ$ 、齿梳辊转速 $322.23\text{ r/min}$ ,对应的花药采净率为 $97.02\%$ 、花朵损伤率为 $8.33\%$ 。根据优化后的工作参数进行采摘性能试验,试验结果表明:齿梳式油茶花药采集器平均采集效率约为 $3.88\text{ s/朵}$ 。

致谢:江西省林业局油茶研究专项(JXYCZX[2023]231)(JXYCZX[2023]241)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

### 参考文献 References:

- [1] 邓海艳,陶丽萍.油茶产业与乡村振兴的耦合研究:以湖南邵阳县为例[J].武汉轻工大学学报,2023,42(6):27-36.  
DENG H Y,TAO L P.Study on the coupling of oil-tea *Camellia* industry and rural revitalization:taking in Shaoyang county, Hunan province as an example [J].Journal of Wuhan polytechnic university,2023,42(6):27-36.
- [2] 王湘南,陈永忠,王瑞,等.油茶主栽品种的开花授粉习性[J].中南林业科技大学学报,2013,33(12):1-6+181.  
WANG X N,CHEN Y Z,WANG R,et al.Flowering and pollinating specifications of *Camellia oleifera* cultivars [J].Journal of central south university of forestry & technology,2013,33(12):1-6+181.
- [3] 程钦华,徐奥文,任志华,等.江西10个主栽油茶品种花器特性与结实率研究[J].江西农业大学学报,2023,45(4):905-914.  
CHENG Q H,XU A W,REN Z H,et al.Floral organ characteristics and fruiting rate of 10 main *Camellia oleifera* varieties

- in Jiangxi Province[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2023, 45(4):905-914.
- [4] 李震, 黄强, 彭成涛, 等. 油茶授粉蜜蜂的培育与应用[J]. 江西农业大学学报, 2023, 45(4):944-951.  
LI Z, HUANG Q, PENG C T, et al. Cultivation and application of *Camellia oleifera* pollination bees[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2023, 45(4):944-951.
- [5] 胡淑芬, 曹昕奕, 邓勇杰, 等. 植保无人机飞行参数对油茶授粉雾滴分布及坐果率的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(20):92-100.  
HU S F, CAO X Y, DENG Y J, et al. Effects of the flight parameters of plant protection drone on the distribution of pollination droplets and the fruit setting rate of *Camellia*[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2023, 39(20):92-100.
- [6] 刘德承, 姚国琼, 彭雪迪, 等. 不同授粉方式对岑溪软枝油茶家系林座果率的影响研究[J]. 林业调查规划, 2023, 48(4):188-190.  
LIU D C, YAO G Q, PENG X D, et al. Effect of different pollination methods on fruit setting rate of *Camellia oleifera* Cenruan Clone Forest[J]. Forest inventory and planning, 2023, 48(4):188-190.
- [7] 李翱翔. 油茶高效液体授粉技术研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2023.  
LI A X. Study on efficient liquid pollination technology of *Camellia oleifera*[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2023.
- [8] 徐安糠, 陆欢欢, 晏巧, 等. 油茶花粉液配方初探[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2021, 38(6):129-136.  
XU A K, LU H H, YAN Q, et al. Primary exploration on pollinating solution of *Camellia oleifera*[J]. Journal of Chongqing normal university(natural science), 2021, 38(6):129-136.
- [9] 陈雅, 袁德义, 李葵, 等. 油茶“三华系列”花粉活力测定及花粉保存[J]. 江西农业大学学报, 2020, 42(1):118-126.  
CHEN Y, YUAN D Y, LI K, et al. Viability determination and preservation of pollen of *Camellia oleifera* ‘Huashuo’, ‘Huaxin’ and ‘Huajin’[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2020, 42(1):118-126.
- [10] 苏玉贞. 新时代乡村振兴战略下广东油茶产业发展现状与路径[J]. 中南林业调查规划, 2022, 41(1):51-54+65.  
SU Y Z. Development status and path of *Camellia oleifera* industry in Guangdong under rural revitalization strategy in new era[J]. Central south forest inventory and planning, 2022, 41(1):51-54+65.
- [11] 万炜, 韦小平, 于瀛龙, 等. 蜜蜂授粉在贵州油茶产业发展中的应用[J]. 蜜蜂杂志, 2020, 40(10):7-10.  
WAN W, WEI X P, YU Y L, et al. Application of honey bee pollination on *Camellia oleifera* in Guizhou Province[J]. Journal of bee, 2020, 40(10):7-10.
- [12] 吴泽超, 赵青, 李骏, 等. 油茶花粉采集分离系统的设计与研究[J]. 制造业自动化, 2023, 45(6):98-102.  
WU Z C, ZHAO Q, LI J, et al. Design and research of *Camellia* pollen collection and separation system[J]. Manufacturing automation, 2023, 45(6):98-102.
- [13] 刘洋, 曲振兴, 汤晶宇, 等. 油茶机械化作业现状与发展趋势[J]. 林业机械与木工设备, 2015, 43(10):6-8.  
LIU Y, QU Z X, TANG J Y, et al. Present situation and development trend of *Camellia oleifera* mechanized operation[J]. Forestry machinery & woodworking equipment, 2015, 43(10):6-8.
- [14] 吴泽超, 赵青, 李立君, 等. 三爪联动式油茶花采摘执行末端设计研究[J]. 中国工程机械学报, 2022, 20(1):69-74.  
WU Z C, ZHAO Q, LI L J, et al. Study on the design of three-claw linkage type *Camellia* flower picking execution terminal[J]. Chinese journal of construction machinery, 2022, 20(1):69-74.
- [15] 万芳新, 孙浩博, 蒲军, 等. 梳齿-气吸式花椒采摘机设计与试验[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(4):219-227.  
WAN F X, SUN H B, PU J, et al. The design and test of air suction pepper harvester device[J]. Agricultural research in the arid areas, 2021, 39(4):219-227.
- [16] 刘少华, 贺俊林, 吴楠, 等. 梳脱式钙果采收试验台设计与优化[J]. 农业工程, 2020, 10(3):81-85.  
LIU S H, HE J L, WU N, et al. Design and optimization of comb-type *Cerasus humilis* harvesting test bench[J]. Agricultural engineering, 2020, 10(3):81-85.
- [17] DEHKORDI S, HANJANI P J, CHEGINI G R. Design, construction and evaluation of chrysanthemum flower stem cleaner machine[J]. Financed by scientific research support fund, 2014, 8(6):369.
- [18] EHLERT D, BEIER K. Development of picking devices for chamomile harvesters[J]. Journal of applied research on medicinal and aromatic plants, 2014, 1(3):73-80.
- [19] 吕辉, 李立君, 赵青, 等. 剪切式油茶花采摘末端执行器设计与实验[J]. 农机化研究, 2024, 46(4):134-139.

- LYU H, LI L J, ZHAO Q, et al. Design and experiment of cutting end effector for *Camellia* picking[J]. Journal of agricultural mechanization research, 2024, 46(4): 134-139.
- [20] WU Z C, LI L J, ZHAO Q, et al. Design and research of a harvesting actuator for *Camellia oleifera* flowers during the budding period[J]. Agriculture, 2022, 12(10): 1698.
- [21] 胡淑芬, 李忠英, 宋乐, 等. 一种油茶花药分离与采集装置[P]. 江西省: CN218851350U, 2023-04-14.
- HU S F, LI Z Y, SONG L, et al. A device for separating and collecting *Camellia oleifera* anthers [P]. Jiangxi Province: CN218851350U, 2023-04-14.
- [22] 饶洪辉, 黄登昇, 王玉龙, 等. 液压驱动式油茶果采摘机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 133-139.
- RAO H H, HUANG D S, WANG Y L, et al. Design and experiment of hydraulic-driven *Camellia* fruit picking machine [J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2019, 50(5): 133-139.
- [23] 姬长英, 张纯, 顾宝兴, 等. 梳割气吸一体式贡菊采摘机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 137-145.
- JI C Y, ZHANG C, GU B X, et al. Design and experiment of shear-sucting mountain chrysanthemum picking machine [J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2017, 48(11): 137-145.
- [24] 房大伟. 梳齿式钙果采摘装置的设计与试验研究[D]. 太原: 山西农业大学, 2019.
- FANG D W. Design and experimental study of comb-type picking device for *Cerasus humilis* [D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2019.
- [25] 连国党, 曹卫彬, 牛驰, 等. 梳夹式红花采摘机构关键部件设计分析[J]. 机械设计与研究, 2019, 35(2): 187-190.
- LIAN G D, CAO W B, NIU C, et al. Design and study on the picking mechanism of comb-type safflower [J]. Machine design & research, 2019, 35(2): 187-190.
- [26] 马秋成, 陈强, 卢安舸, 等. 核桃定向破壳装置设计及试验[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(2): 473-485.
- MA Q C, CHENG Q, LU A G, et al. Design and test of walnut directional shell breaking device [J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2022, 44(2): 473-485.
- [27] 张振国, 邢振宇, 杨双平, 等. 圆弧渐进式红花丝采收装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(17): 10-21.
- ZHANG Z G, XING Z Y, YANG S P, et al. Design and experiments of the circular arc progressive type harvester for the safflower filaments [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2022, 38(17): 10-21.
- [28] 李云雁, 胡传荣. 实验设计与数据处理[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2015: 124-158.
- LI Y Y, HU C R. Experiment design and data processing [M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2015: 124-158.
- [29] 王荣炎, 于慧爽, 陈安迪, 等. 气动翻转梳齿式菊花采摘装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 184-193.
- WANG R Y, YU H S, CHEN A D, et al. Design and test of pneumatic flipping comb-type chrysanthemum picking device [J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2022, 53(10): 184-193.
- [30] 于英杰, 王剑, 赖庆辉, 等. 手持振动梳刷式小粒咖啡采摘装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 124-133.
- YU Y J, WANG J, LAI Q H, et al. Design and experiment of hand-held vibrating comb-type *Coffea arabica* L. Harvester [J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2021, 52(9): 124-133.
- [31] 饶洪辉, 罗时挺, 余佳佳, 等. 基于ANSYS Workbench的齿梳拨刀式油茶果采摘机拨果及花苞损伤仿真研究[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(12): 2134-2141.
- RAO H H, LUO S T, YU J J, et al. Study on simulation analysis of *Camellia* fruit picking and its bud damage with tooth comb dial knife machine based on ANSYS Workbench [J]. Acta agriculturae Zhejiangensis, 2017, 29(12): 2134-2141.