

三点弯曲法测定槟榔干果纤维层弹性模量研究

Study on elastic modulus of fiber layer of dried betel nut by three points bend method determination

康效宁¹ 李 梁² 吉建邦¹

KANG Xiao-ning¹ LI Liang² JI Jian-bang¹

(1. 海南省农业科学院农产品加工设计研究所, 海南 海口 571100; 2. 西藏农牧学院食品科学学院, 西藏 林芝 860000)

(1. *Institute of Processing & Design of Agroproducts, Hainan Academy of Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571100, China*; 2. *Food Science College, Tibet Agriculture & Animal Husbandry University, Nyingchi, Tibet 860000, China*)

摘要:建立一种评价槟榔纤维层力学特性的新方法。利用三点弯曲法测定槟榔干果的弹性模量,优化测定参数。并采用扫描电子显微镜和感官评价测试方法与其进行对比,通过辐照软化槟榔干果来验证该方法的科学性。研究结果认为:样品的含水量及宽度对弹性模量有一定影响,而测定条件则无显著影响;作为一种简单有效的测量手段,三点弯曲法可直接量化出槟榔干果纤维层的柔软度。

关键词: 槟榔干果; 纤维层; 三点弯曲法; 弹性模量

Abstract: A new method for evaluating the mechanical properties of areca nut fiber layer is established. The elastic modulus of areca nut was determined by three-point bending method and the parameters were optimized. Scanning electron microscope (SEM) and sensory evaluation test were used to verify the scientific nature of the method. The results showed that the moisture content and width of the sample had a certain effect on the elastic modulus, but the measuring conditions had no significant effect on the elastic modulus, and the elastic modulus of areca nut dried fruit could be objectively and scientifically measured by the three-point bending method. As a simple and effective measurement method, the three-point bending method can directly quantify the softness of the fiber layer of areca nut.

Keywords: dried betel nut; fiber layer; three-points bend method; elastic modulus

槟榔(*Areca catechu* L.)是棕榈科植物成熟种子,四大南药之一^[1-2]。《本草纲目》记载槟榔有“下水肿、通关节、健脾调中、治心痛积聚”的作用,还具有治疗青光眼和降血压等功效^[3-5]。主产于印度、马来西亚等东南亚国家,在中国主要分布于海南和台湾两省。海南省槟榔种植面积约 1.5×10^5 hm²,年总产值超过150亿元人民币,居海南第一大热带经济作物,远超传统经济作物天然橡胶^[6]。

槟榔虽然是四大南药,但只有极少部分进入药材市场,绝大部分都用于鲜食和槟榔加工。槟榔加工分为两个阶段,第一阶段是将采摘后的鲜果烘干成干果的初级加工,第二阶段是把槟榔干果经深加工成食用槟榔产品^[7-8]。食用槟榔口感丰富,具有提神抗疲劳之功效,深受中国海南、湖南等地消费者的喜爱,享有“植物口香糖”之称。作为一个有着300年以上食用历史的传统产品,人们对其褒贬不一。有报告^[9-10]指出:长期、大量咀嚼食用槟榔,会损伤口腔组织黏膜,引发牙体表面磨损、牙根纵裂、牙齿过早脱落和口腔黏膜损伤等口腔疾病。其中的焦点问题之一就是食用槟榔的纤维层在咀嚼过程会对口腔黏膜产生强烈的物理性刺激,导致损伤,引发疾病。因此食用槟榔加工过程中的纤维层软化问题成为槟榔产业共性关键技术,纤维层的柔软程度也成为评价食用槟榔质量好坏的重要指标。

食用槟榔加工过程中有多种软化技术,但因没有科学、客观的柔软度评价标准和方法,只能通过技术人员的主观咀嚼做出评定,对软化新技术评价造成难点^[11-12]。探索出一种以量值客观表示纤维柔软度评价体系已成为槟榔加工学科发展的重要理论基础。质地多面分析法(TPA)研究了槟榔纤维层的含水量与质构特性的关系^[13],李小城等^[14]采用三点弯曲法研究了小麦茎秆的弯曲特性,姜松等^[15]研究了面条的弹性模量与感官评价的关系等报道指出,三点弯曲法^[16]已在饼干、榨菜、糙米等食品的力学特性分析中发挥重

基金项目: 海南省自然科学基金面上项目(编号:317188);海南省科研院所技术开发专项(编号:KYYS-2018-09);海南省农业科学院农业科技创新专项(编号:KJCX-2018-06)

作者简介: 康效宁,女,海南省农业科学院农产品加工设计研究所副研究员,学士。

通信作者: 吉建邦(1962—),男,海南省农业科学院农产品加工设计研究所研究员,硕士。E-mail:763316486@qq.com

收稿日期: 2018-06-28

要作用,但在探讨槟榔纤维力学性质中还未见报道。本研究拟采用物性质构仪三点弯曲法,建立评价槟榔纤维层力学特性的新方法,为食用槟榔纤维软化技术研究和食用槟榔的感官评价提供一定理论支撑,并通过⁶⁰Co-γ射线辐照处理食用槟榔验证此方法的客观性和科学性。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

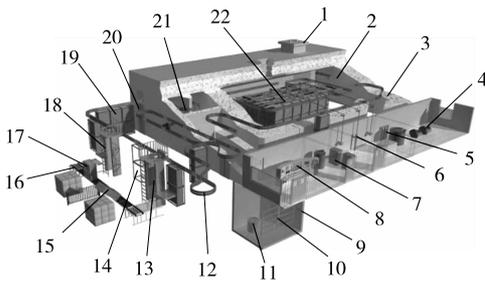
槟榔干果:购自海南省万宁市某加工企业,为热风干燥干果。挑选出尺寸、外形均匀一致的干果作为试样。其中试样在去除萼部后纵径为(4.75±0.25) cm,直径为(1.96±0.15) cm,重量为(5.50±0.80) g,含水量为(9.80±0.50)%。

1.2 试验设备

质构仪:TMS-PRO型,采用0~1 000 N的力量转换感应元及配套的三点弯曲测定平台,美国FTC公司;

扫描电子显微镜:S-3000N型,日本日立集团;

⁶⁰Co-γ射线工业辐照装置(见图1);SQ(H)悬挂链式,北京原子高科金辉辐射技术应用有限责任公司;



1. 辐照室顶屏蔽塞 2. 辐照室 3. 屏蔽体 4. 通风系统 5. 水处理系统 6. 液升升降系统 7. 空压机 8. 控制操作台 9. 储源井 10. 源架 11. 运输容器 12. 悬挂传输链 13. 装箱位 14. 货箱 15. 装货位 16. 传送带 17. 卸货位 18. 卸箱位 19. 吊具 20. 货物通道自动门 21. 迷道 22. 过源机构

图1 SQ(H)悬挂链式⁶⁰Co-γ射线工业辐照装置
Figure 1 SQ(H) suspension-type ⁶⁰Co-gamma ray industry radiation facility

电子分析天平:ME1002/02型,量程为0.5~1 200 g,精确度为0.01 mg,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;

水浴锅:HH-6型,金坛市鸿科仪器厂;

水分测定仪:DS103型,上海市海康仪器厂;

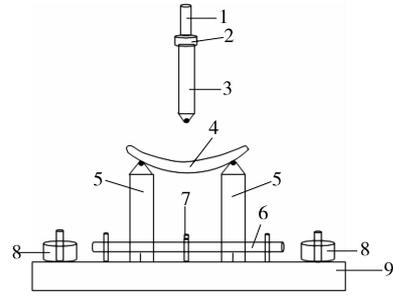
数显游标卡尺:量程为0~150 mm,精确度为0.01 mm,上海宝工工具有限公司;

电热鼓风干燥箱:101系列型,上海叶托仪器公司。

1.3 试验方法

1.3.1 试验原理 三点弯曲法测定原理是质构仪带动探头垂直向下运动,由牛顿第三定律可知探头与样品接触后二者之间产生一对大小相同,方向相反的力。在样品弯曲的过程中,探头连接的力量感应元可以感知样品所受的力,质构仪依此绘制出该力与样品弯曲位移关系曲线图,见图2。

1.3.2 样品弹性模量的计算 槟榔干果呈橄榄形且内部存在干瘪的仁,外壳纤维层纵切界面呈现具有一定弯曲的弧



1. 探头连接杆 2. 探头连接螺丝 3. 探头 4. 样品 5. 支撑立壁 6. 立壁固定杆 7. 跨度调节旋钮 8. 平台固定旋钮 9. 平台底座

图2 三点弯曲法装置示意图

Figure 2 Schematic diagram of three-point bending method

度,纤维层的横切面也具有一定的弧度。在测量弹性模量和抗弯刚度时,质构仪传感器探头位于两支架跨度中点上方的垂直位置,测量位置为样品纵径的中点,样品的外表层朝下,内表层朝上。

由三点弯曲原理^[17]可知,槟榔干果纤维层的弹性模量E可由式(1)计算:

$$E = \frac{F_b \times L^3}{4 \times \delta \times b \times h^3}, \quad (1)$$

式中:

F_b ——质构仪在样品弹性阶段内的跨中位置测得的载荷,N;

L ——下方2个支撑点之间的距离,mm;

δ ——样品中点的弯曲挠度,即在样品中点在弹性阶段内的位移,mm;

b ——试样宽度,mm;

h ——试样厚度,mm。

样品经过复水预处理后,使用美工刀和数显游标卡尺修整出不同宽度的待测样品。其中,TMS-PRO型质构仪的测定参数为:起始力1 N,跨度20 mm,测前和测后速度30 mm/min,测定速度60 mm/min,下压和回程距离4 mm。

1.3.3 样品宽度与弹性模量试验 由于市售食用槟榔的含水量为20%左右,为方便在后期直接研究成品槟榔弯曲特性与感官评价的关联性,因此除了研究含水量对槟榔柔软度的影响之外,其他处理均采取煮沸复水法将样品的含水量恢复到20%。选择样品宽度分别为5,6,7,8,9,10,11 mm,且样品厚度为(2.90±0.45) mm。质构测定条件参见1.3.2部分,每种样品重复3次。

1.3.4 不同含水量与样品弹性模量试验 样品经过不同时间的煮沸复水处理得到含水量分别为15%,20%,25%,30%,35%的样品,在进行三点弯曲测定时,所有样品的宽度固定在9 mm,厚度为(2.90±0.45) mm。测定条件参见1.3.2部分,每种样品重复3次。

1.3.5 测试速度与弹性模量试验 起始力为质构仪由测前速度转换为测试速度的阈值,由于槟榔干果纤维层较硬,因此将其起始力选为1 N。前期的大量试验确定了跨度为20 mm时较为适宜,由于测前和测后速度不会影响结果,考虑到测前和测后速度与测试速度的转换衔接,将二者定为

30 mm/min。此外,由于研究的弹性模量要求样品弯曲处于弹性阶段,结合前期试验和考虑到测试速度与实用性,当下压距离为 4 mm 时即可满足上述要求。本试验只研究测试速度对弹性模量的影响,试验设定待测样品的含水量为 20%,样品宽度为 9 mm,测试速度分别选为 30,60,90,120,150 mm/min。其他测试条件与 1.3.2 部分相同,每种样品重复 3 次。

1.3.6 感官评价与三点弯曲法测定效果比较 三点弯曲法测定槟榔柔软度与感官评价对比。试验设计了感官评价表,并对每项指标设定评分标准及权重,感官评价由 20 位年龄在 25~35 岁的评价员分别对 5 组不同柔软度槟榔干果进行感官评价;同时运用三点弯曲法分别对 5 组槟榔干果进行纤维柔软度测定,计算其弹性模量。

感官评价指标评分标准:

(1) 扎口:8~10 为不扎口;5~8 为一般扎口;少于 5 为很扎口。

(2) 咀嚼性:8~10 为入口即散,耐咀嚼;5~8 为一般耐咀嚼;少于 5 为不耐咀嚼。

(3) 残渣:满口残渣,无法咀嚼为 0;残渣较多,尚可咀嚼为 1~2;残渣可接受为 3~4;残渣可接受,咀嚼有韧性为 5~8;残渣少,咀嚼有韧性为 8~10。

1.3.7 感官评价指标权重系数 根据各评价指标的重要性,采用强制确定法,请 15 名槟榔行业资深从业人员对样品的扎口、咀嚼性和残渣进行权重确定,求出其权重系数,结果见表 1。

表 1 评价指标权重系数

Table 1 Evaluation index weight coefficient

| 评价指标 | 得分 | 权重系数 |
|------|----|------|
| 扎口 | 26 | 0.29 |
| 咀嚼性 | 40 | 0.44 |
| 残渣 | 24 | 0.27 |
| 合计 | 90 | |

根据槟榔行业资深从业人员确定扎口、咀嚼性和残渣的权重,感官评分计算公式为:

$$S=0.29 \times A+0.44 \times B+0.27 \times C, \quad (2)$$

式中:

S——感官评分;

A——扎口;

B——咀嚼性;

C——残渣。

规定感官评分在 8~10 为柔软,5~8 为一般柔软,少于 5 为粗硬。

1.4 辐照样品设置与处理

试验设置对照:0 kGy;处理 1:3 kGy;处理 2:6 kGy;处理 3:9 kGy,每个处理 1.5 kg 真空包装,辐照结束后测试样品纤维结构、柔软度和感官评价,试验设置 2 次重复。

1.5 扫描电子显微镜样品检测方法

从对照及 3 个不同辐照处理的槟榔干果中随机采集 2

个样品,用专用刀具先把槟榔干果一分为二,再切成 2 mm×2 mm 大小,每个处理做横切和纵切样品,横切和纵切样品来自同一果片,固定在观察台上,利用高压涂膜装置喷金处理,然后在扫描电镜下观察槟榔干果纤维结构特征,图片放大倍数 500 倍。

1.6 数据处理

采用 Origin 8.6 进行数据分析并作图,计算标准误差。利用 SPSS 19.0 软件进行显著性差异分析。 $P < 0.01$ 表示差异极显著; $P < 0.05$ 表示差异显著; $P > 0.05$ 表示差异不显著。

2 结果与分析

2.1 样品宽度对弹性模量的影响

由式(1)可知,弹性模量是纤维层在单位截面积上的一种性能指标,理论上与样品的宽度和厚度无关。经过 Spss 软件分析不同样品宽度的弹性模量后,发现不同宽度样品的弹性模量之间未出现显著差异($P < 0.01$),符合弹性模量的理论定义。但是,由图 3 中可知,不同宽度样品弹性模量的相对标准差中却存在很大的不同。相对标准差值在样品宽度为 5~7 mm 时上升,在 7~9 mm 时下降,随后又上升。其中样品宽度为 9 mm 时的相对偏差值最小,为 3.65%。在操作误差和系统误差一致的前提下,当样品宽度较小时,测量值与真实值的相对偏差较大,进而使得最终结果的相对偏差较大。而在 7 mm 处出现的相对误差值高峰可能与操作误差有关。由于整个槟榔果实纤维层的横向截面为圆环形。宽度越大,样品的截面越加偏离矩形,从而降低了式(1)的适用性,由此认为样品 9 mm 为较适宜宽度。

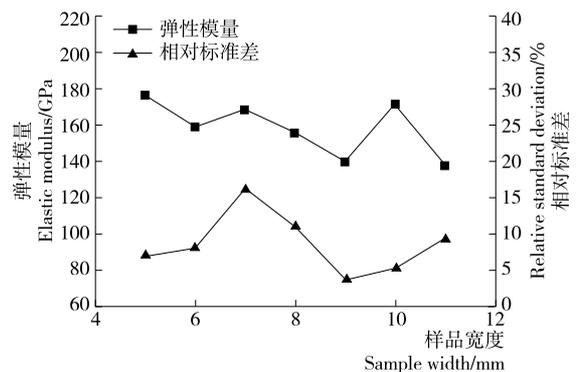


图 3 样品宽度对弹性模量和相对标准差的影响分析曲线图

Figure 3 Effect of sample width on the determination of elastic modulus (MOE) and relative standard error (RSD)

2.2 样品纤维层含水量对弹性模量的影响

经过 Spss 软件分析可知不同样品纤维层含水量与弹性模量之间存在显著差异($P < 0.05$),并且二者还存在负相关性关系。如图 4 所示,样品纤维层含水量与弹性模量之间的关系式为 $Y = -5.092X + 239.133, R^2 = 0.98941$ 。作为一种植物纤维层,槟榔干果纤维层的主要成分包括半纤维素、纤维素、木质素和果胶等物质,纤维细胞在木质化后变得坚

硬牢固,电镜观察发现槟榔干果纤维层中的纤维束在纵向方向上表现出一致的走向,以及各纤维束之间出现了相互缠绕、叠压等现象,纤维束本身以及之间的相互作用影响纤维层弹性模量。纤维层的含水量增加后,其中的果胶、纤维素、木质素等物质组织细胞在与水结合后会出现膨胀,纤维束之间的作用力减弱,体积增大,当样品的尺寸相同时,含水量越大样品体积愈大,因此确定样品的含水量对测定样品弹性模量意义重大。

2.3 测试速度对弹性模量的影响

在质构仪检测探头接触样品前,探头以测前速度向下运动。当探头接触样品后,所受力大于设定的起始力后,探头

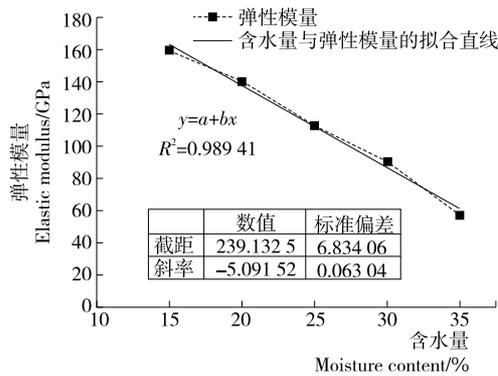


图4 样品含水量对弹性模量的影响分析曲线图

Figure 4 Effect of samples' water content on their elastic modulus (MOE)

的速度由测前速度变化为测试速度,直至达到设定的下压距离。随后探头以测后速度上升至初始位置,完成整个测试过程。由于检测探头在测前与测后阶段同样品不接触,因此二者不会影响测试结果。考虑仪器特性和实际操作,将二者均设为 30 mm/min。由图 5 可知,不同测试速度的弹性模量测量结果之间不存在显著差异。即测试速度不影响最终的测试结果。在考虑了测试时间和测前、测后与测试速度的转换衔接等综合因素后,确定 60 mm/min 做为槟榔干果样品弹性模量测试参数。

2.4 感官评判与三点弯曲法测定效果比较分析

感官评判与三点弯曲法测定效果比较结果见表 2。

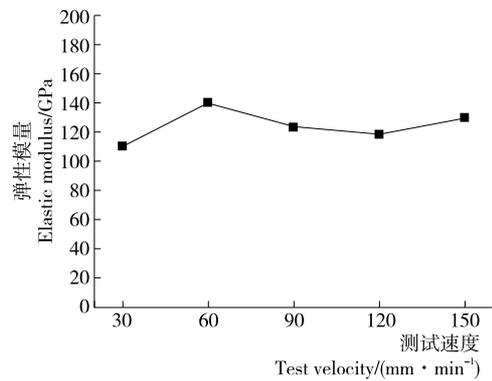


图5 测试速度对弹性模量的影响分析曲线图

Figure 5 Effect of test speeds on their elastic modulus (MOE)

表 2 感官评分与弹性模量比较结果表[†]

Table 2 Comparison of the body sense scores and elastic modulus

| 组别 | 扎口 | 咀嚼性 | 残渣 | 感官评分 | 弹性模量/GPa |
|----|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|--------------------------|
| 1 | 4.1±0.2 ^a | 4.6±0.2 ^a | 3.8±0.2 ^a | 4.24±0.21 ^a | 179.83±9.14 ^a |
| 2 | 6.3±0.4 ^b | 7.5±0.5 ^b | 6.7±0.4 ^b | 6.94±0.42 ^b | 148.67±7.42 ^b |
| 3 | 7.8±0.3 ^c | 7.1±0.3 ^b | 6.3±0.3 ^b | 7.09±0.28 ^b | 139.78±7.11 ^c |
| 4 | 8.2±0.4 ^c | 7.8±0.4 ^b | 8.0±0.4 ^c | 7.97±0.40 ^c | 121.71±6.09 ^c |
| 5 | 9.4±0.6 ^d | 9.0±0.5 ^c | 9.5±0.5 ^d | 9.25±0.55 ^d | 83.75±4.19 ^d |

[†] 同列不同肩标小写字母表示差异显著(P<0.05)。

表 2 结果表明,弹性模量越小,咀嚼性越好,无扎口感,槟榔干果的柔软度就好,当弹性模量在 100 GPa 左右时,槟榔干果的柔软度基本可以满足嚼食要求,对口腔组织产生的损害较小。因此,本研究提出的三点弯曲法测定槟榔柔软度的方法以量化指标反映出槟榔纤维的柔软程度,为槟榔干果和食用槟榔柔软度评价提供了一个客观和科学测定方法。

2.5 辐射剂量对槟榔干果纤维素结构 SEM 和质构的影响

有研究^[11-12]认为:纤维素经辐照后,木材的机械性能下降,吸湿性增加。为了验证三点弯曲法测定槟榔纤维层柔软度的客观性和精确性,用不同剂量⁶⁰Co-γ 射线对槟榔纤维层进行辐照处理,通过电镜扫描图(SEM)分析纤维层结构与弹性模量变化的对应关系。试验发现一定强度辐照对槟榔纤维层结构有明显的影 响,详见图 6、7。槟榔纵切 500 倍观察发现,对照组槟榔纤维内部结构之间均匀衔接紧密,密度相对较大;3 kGy 处理后槟榔出现条状衔接,密度相对变

小,出现条状空隙;6 kGy 处理后槟榔纤维内部条状结构有被打断迹象,间隙变大,密度变小;9 kGy 处理槟榔纤维内部条状结构消失,出现均匀间隙,密度相对均匀变小。

槟榔横切面 500 倍(图 7)观察显示,对照组横切面条理清晰明确,纤维与纤维之间分隔明显,间隙不大,单根纤维内部紧实均匀;3 kGy 处理后槟榔横切面也可以明显观察到单根纤维,纤维与纤维之间缝隙变大,并且单根纤维内部出现缝隙;6 kGy 处理后纤维与纤维之间边界模糊,单根纤维内部也存在相比对照较大间隙;9 kGy 处理后纤维边界完全无法分辨,间隙均匀变大。从图 6、7 可以看出,辐照对槟榔纤维层结构有明显影响,在一定范围内引起了纤维层结构趋于松散。说明辐照引起了槟榔纤维层机械性能下降。试验对应测定了对照与各样品的弹性模量,见图 8。从图 8 中可以看出,随着辐照强度增加,样品弹性模量下降。因此分析认为,辐射打断了纤维束和纤维分子之间的氢键,使槟榔纤维

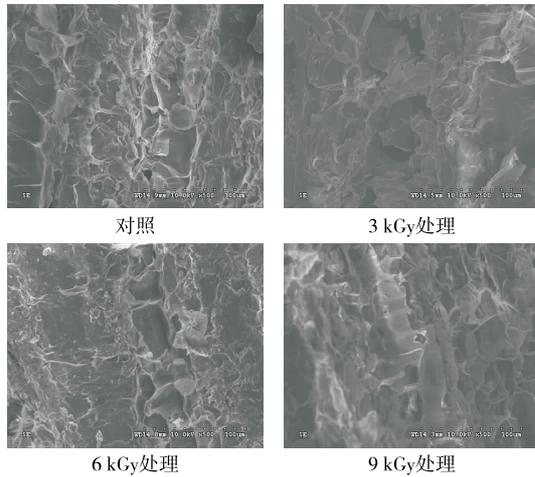


图 6 槟榔干果纵切 500 倍纤维结构扫描电子显微镜照片
Figure 6 The SEM of dried betelnut 500× fiber structure for slitting line

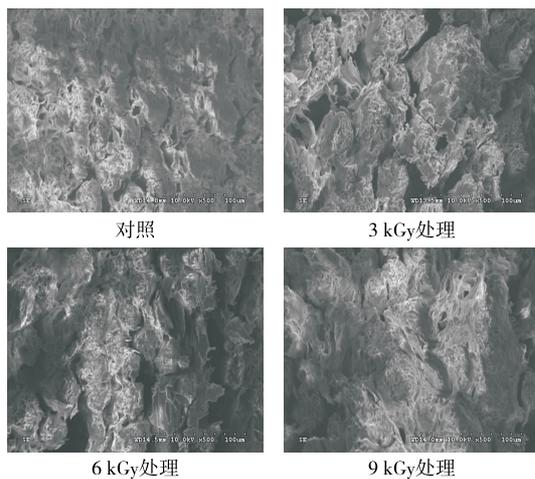


图 7 槟榔干果横切 500 倍纤维结构扫描电子显微镜照片
Figure 7 The SEM of dried betelnut 500× fiber structure for crosscut

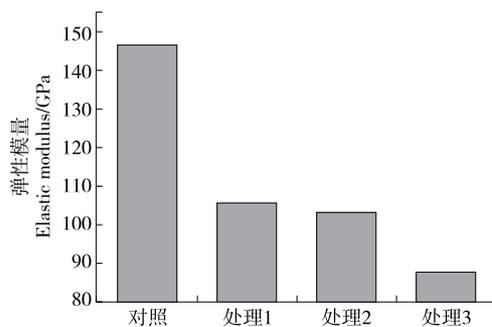


图 8 不同辐照试验处理与弹性模量的关系图
Figure 8 The relationship between the different irradiation experimental treatment and elastic modulus

层聚合度减小,机械强度下降。从纤维层电镜扫描图可知纤维层机械性能下降与弹性模量趋于一致,因此认为用三点弯曲法测定槟榔干果纤维柔软度是客观和科学的方法。

3 结论

试验对影响测试弹性模量的样品宽度、含水量和试测速

度研究结果认为:槟榔干果纤维层的弹性模量与待测样品的宽度无关,测试速度不会明显影响样品弹性模量,样品的含水量显著影响样品的弹性模量,且二者之间存在负相关的线性关系。这说明测试样品的含水量保持一致性很重要,尽管样品宽度对弹性模量结果影响不显著,但并不表明样品宽度限定不重要,样品测定时也要保持一致性。难点是槟榔纤维层由于成熟度、品种等因素导致纤维层厚度会有一定差异,也会影响数据的精准性,因此在研究时尽量使用相同成熟度和品种一致的果实。作为一种简单有效的测量手段,该方法可直接量化槟榔干果和食用槟榔纤维的柔软度。

参考文献

- [1] 张容鸽, 高元能, 冯建成, 等. 热泵干燥槟榔中试工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2016(9): 241-247.
- [2] 袁列江, 李忠海, 郑锦星. 槟榔提取物对小白鼠胃肠功能的影响研究[J]. 中国食品学报, 2009(4): 38-44.
- [3] 贾哲, 韩婷, 刘欢, 等. 基于多元统计分析的食用槟榔及药用槟榔主要化学成分的含量对比研究[J]. 中华中医药杂志, 2017(11): 5 158-5 161.
- [4] 吕俊辰, 弓宝, 孙佩文. 槟榔药用和食用安全性研究概况[J]. 中草药, 2017(2): 384-390.
- [5] 刘书伟, 王燕, 胡劲召. 槟榔不同部位水提液对小鼠生理指标的影响[J]. 中国畜牧兽医, 2016(10): 2 648-2 654.
- [6] 王丹, 庞玉新, 胡璇, 等. 海南省槟榔种植业发展现状及其动力分析[J]. 广东农业科学, 2013(15): 207-209.
- [7] 吴硕, 李宗军, 谭雅, 等. 槟榔干果的杀青软化及辐照保藏研究[J]. 核农学报, 2017(4): 711-718.
- [8] 吴硕, 李宗军, 谭雅, 等. 食用槟榔干燥和烟熏特性研究[J]. 食品工业科技, 2016(4): 288-293.
- [9] PAULINO Y C, ETTIENNE R, NOVOTNY R, et al. Areca (betel) nut chewing practices of adults and health behaviors of their children in the Freely Associated States, Micronesia: Findings from the Children's Healthy Living (CHL) Program[J]. Cancer Epidemiol, 2017, 50(Pt B): 234-240.
- [10] LIU Shyun-yu, FENG I-jung, WU Yu-wei, et al. Implication for second primary cancer from visible oral and oropharyngeal premalignant lesions in betel-nut chewing related oral cancer[J]. Head Neck, 2017, 39(7): 1 428-1 435.
- [11] 赵志友, 巢雨舟, 袁思颂, 等. 软化方法对食用槟榔品质的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(7): 189-193.
- [12] 巢雨舟, 夏延斌, 赵志友, 等. 食用槟榔超声酶解软化工艺优化[J]. 农产品加工, 2016(21): 14-17.
- [13] 李梁, 吉建邦, 康效宁, 等. 含水量对槟榔干质地的影响研究[J]. 食品工业科技, 2014(19): 111-113.
- [14] 李小城, 牛智有, 刘梅英, 等. 小麦茎秆弯曲性能的测试[J]. 华中农业大学学报, 2013(1): 120-124.
- [15] 姜松, 贾丹凤, 伍娟. 小麦粉溶剂保持力特性与挂面力学性质的关系[J]. 食品科学, 2016(19): 112-116.
- [16] 姜松, 黄广凤, 刘瑞霞, 等. 压杆后屈曲法测定直条米线弹性模量[J]. 农业工程学报, 2011(1): 360-364.
- [17] 周显青, 孙晶, 张玉荣, 等. 稻米三点弯曲力学特性与蒸煮食用品质的关联性探讨[J]. 现代食品科技, 2016(6): 35-41.