

刺梨果实膳食纤维积累动态及其对遮光的反应

张小英,孙雅蕾,鲁敏,安华明*

(贵州大学农学院,贵州省果树工程技术研究中心,贵阳 550025)

摘要:刺梨果实是优质膳食纤维的良好来源。该研究以‘贵农5号’刺梨果实为材料,测定了果实发育过程中膳食纤维的含量、组分变化及其对光照的响应特征。结果表明:(1)在刺梨果实的整个发育过程中,总膳食纤维和不溶性膳食纤维含量在花后40 d之前的幼果期更高,并随着果实的快速发育持续下降,至成熟时分别约占果实干重的24%和16%,而可溶性膳食纤维含量在果实发育过程中变化平稳,一直维持在干重的8%左右。(2)果胶在花后20 d之前有一快速积累过程,至果实成熟时纤维素和半纤维素为膳食纤维主要组分,约占总膳食纤维的60%;花后60 d之前是刺梨果实膳食纤维积累的主要时期。(3)刺梨果实总膳食纤维、不溶性膳食纤维中单糖组分主要以半乳糖、葡萄糖为主,而可溶性膳食纤维中单糖组分主要为甘露糖,两类膳食纤维间表现出较大差异。(4)果实套袋遮光不同程度促进了刺梨果实总膳食纤维、可溶性膳食纤维、总果胶、原果胶的积累,尤其是100%遮光的效应更明显,但对果实中不溶性膳食纤维、纤维素、木质素、可溶性果胶的积累影响并不显著。

关键词:刺梨果实;膳食纤维;组分;单糖;遮光处理

中图分类号:Q945.6⁺5; Q945.79 **文献标志码:**A

Accumulation Dynamics of Dietary Fiber in *Rosa roxburghii* Fruit and Its Response to Shading

ZHANG Xiaoying, SUN Yalei, LU Min, AN Huaming*

(Guizhou Engineering Research Center for Fruit Crops, Agricultural College, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: *Rosa roxburghii* fruit is a good source of high quality dietary fiber. This research was to determine the content and composition of dietary fiber during the development of ‘Guinong 5’ *R. roxburghii* fruit and its response to light. The results showed that: (1) during the whole development of the fruit, the percentage of total dietary fiber and insoluble dietary fiber increased in the young fruit stage 40 days after anthesis, and then decreased continuously with the rapid development of fruit, showing a consistent trend of change and accounting for 24% and 16% of the dry weight of fruit at the time of maturity, respectively. However, soluble dietary fiber changed steadily during the fruit development, and remained at about 8% of the dry weight. (2) Dietary fiber components such as cellulose, hemicellulose and lignin also showed a continuous downward trend during the whole development of the fruit, while pectin had a rapid accumulation process 20 days after flowering, and cellulose and hemicellulose were the main components of the fruit when maturing, accounting for about 60% of the total dietary fiber. From the changes of the total amount of dietary fiber and its main components in single fruit, the main period of dietary fiber accumulation in *R. roxburghii* fruit was 60 days after anthesis. (3) The analysis of monosaccharide components of

收稿日期:2020-02-18;修改稿收到日期:2020-04-11

基金项目:国家自然科学基金(31660549)

作者简介:张小英(1994—),女,在读硕士研究生,主要研究方向为果树生理与分子生物学。E-mail:1419914500@qq.com

*通信作者:安华明,教授,博士,研究方向为果树生理与分子生物学。E-mail:hman@gzu.edu.com

dietary fiber showed that galactose and glucose were the main total dietary fiber and insoluble dietary fiber, while mannose was the main soluble dietary fiber, showing great differences. Fruit bagging and shading promoted the accumulation of soluble dietary fiber and lignin in different degrees, but had no significant effect on total dietary fiber, insoluble dietary fiber, cellulose and hemicellulose in fruits. (4) The content of dietary fiber was higher in the young fruit stage, and then continued to decrease with the development of the fruit. Shading can promote the accumulation of lignin and soluble dietary fiber.

Key words: *Rosa roxburghii* fruit; dietary fiber; components; monosaccharides; shading treatment

膳食纤维(dietary fiber, DF)在早期的营养学中被认为是不具营养价值的粗纤维,且对食物中的营养素、微量元素的吸收存在一定的影响^[1]。但随着研究的不断深入,研究者发现膳食纤维对促进肠胃蠕动、降血压以及预防糖尿病、结肠癌、便秘等方面具有重要作用^[2-4];同时对于膳食纤维的内涵也有了一定的补充,主要包含碳水化合物及其类似物,包括纤维素、半纤维素、木质素、果胶等^[5],其组分的变化对膳食纤维有效成分的功能具有很大影响^[6,7]。按溶解性可将膳食纤维分为可溶性膳食纤维和不溶性膳食纤维两大类,其中可溶性膳食纤维主要包括可溶性果胶,不溶性膳食纤维则主要包括纤维素、木质素、半纤维素和原果胶等^[8]。

迄今的研究表明,膳食纤维在不同果实中的组分及其积累机制存在较大差异,如在柑橘类果实以可溶性果胶为主^[9-11],而在大多数果实中却以不溶性膳食纤维为主要组成成分^[12-14];对多种果实膳食纤维的积累动态分析也发现它们具有不同的积累规律及关键时期。例如,Huang 等^[15]研究表明随着枇杷果实的成熟软化,其中纤维素、半纤维素等细胞壁组分发生降解;杨国慧等^[16]研究发现在树莓果生长发育过程中纤维素含量表现出下降趋势;谢娟^[17]研究结果显示花后红树莓纤维素含量很高,但随着果实的生长发育,纤维素含量开始降低,并一直呈现出下降的趋势等。

刺梨(*Rosa roxburghii* Tratt.)为蔷薇科蔷薇属果树,主要分布在中国云、贵、川等地。因其含有较高的抗坏血酸、超氧化物歧化酶(SOD)、黄酮类等物质而具有较高的营养、保健和医药价值。许多研究表明膳食纤维与果实的成熟软化及其口感具有密切关系。本课题组前期对采后刺梨果实膳食纤维的组成及其各组分含量分析表明,刺梨果实是优质膳食纤维的丰富来源^[18],但迄今对于刺梨果实中膳食纤维的积累动态了解很少。因此,本研究以‘贵农 5 号’刺梨品种为材料,较为系统地测定了刺梨果生长发育过程中膳食纤维及其组分含量的变化,揭示该珍稀果实中膳食纤维的积累规律,对于深入了解

果实品质形成机制以及优质膳食纤维的开发利用具有重要的理论和实践意义。

1 材料和方法

1.1 样品采集

试验材料取自贵州大学刺梨资源圃中‘贵农 5 号’刺梨(*Rosa roxburghii* Tratt. cv. Guinong 5)。在刺梨花后 10~110 d,期间每隔 10 d 采果 1 次,采果时间为上午 10:00,共 11 个时期;每棵树在树冠外围不同方位,随机采取大小基本一致、无病虫害的果实 8 个,共采 20 棵树作为不同发育时期果实。另外,在刺梨花后 10 d,用白色果袋(经照度计检测透光率为 50%)和双层不透光果袋(经照度计检测透光率为 0)分别对刺梨果实进行 50% 遮光和 100% 遮光处理,各处理果实 100 个,在成熟时期即花后 110 d 采果,以自然光照果实作为对照。每次采完果之后将果实充分混匀后分为 3 组,作为 3 个平行样本对各指标进行分析测定。

1.2 指标测定

采集刺梨果实后,除去花萼和种子,取鲜样进行果胶含量的测定。剩余样品在 105 °C 杀青后 50 °C 烘至恒重,磨碎,分别过 40 目筛(用于膳食纤维含量测定)和 18 目筛(用于膳食纤维组分分析),密封后于 4 °C 保存。

1.2.1 膳食纤维含量测定

刺梨果实总膳食纤维、不溶性膳食纤维和可溶性膳食纤维含量采用膳食纤维酶-重量测定法(GB/T 5009.88-2008)^[19]。

(1) 总膳食纤维含量:首先称取双份 1.00 g 左右的样品(M_1 、 M_2)进行酶解,然后在每份样品中先加入 60 °C 95% 的乙醇 225 mL,沉淀 1 h(室温),用 15 mL 78% 乙醇将硅藻土湿润平铺于坩埚,用 78% 乙醇将所有内容物微粒转至坩埚中,抽真空,依次用 15 mL 78% 乙醇、95% 乙醇、丙酮冲洗残渣各 2 次,吸干水分,105 °C 过夜后将坩埚置于干燥器中冷却至室温后称重,减去坩埚和硅藻土的干重,计算残渣重。平行样品中的一份用 GB-960.52 方法测蛋白质量;另一份在 525 °C 灼烧 5 h 后,干燥器中冷

却,减去坩埚、硅藻土的重量,即为灰分重量。

(2)不溶性膳食纤维含量:样品酶解方法同上。过滤之前用5 mL水湿润硅藻土并平铺于坩埚中,将样品过滤并冲洗烧杯,用10 mL 70 °C水洗残渣2次,然后再过滤并用水冲洗,滤液保存于烧杯中用于测定可溶性膳食纤维含量,然后使用抽滤装置,按上述方法测定蛋白质和灰分质量。

(3)可溶性膳食纤维含量:根据不溶性膳食纤维过滤后的容积,加约4倍量已预热至60 °C 95%的乙醇320 mL,室温下沉淀1 h,按总膳食纤维的方法抽滤及称重。

刺梨果实总膳食纤维、不溶性膳食纤维、可溶性膳食纤维含量均使用同一公式计算:

$$\text{膳食纤维含量}(\text{g}/100 \text{ g}) = \{[(R_1 + R_2)/2] - P - A\} / [(M_1 + M_2)/2] \times 100$$

式中, R_1 、 R_2 为双份样品残留物重量(mg), P 和 A 分别为蛋白质和灰分质量(mg), M_1 和 M_2 为样品质量(mg)。

1.2.2 膳食纤维组分含量及其单糖含量 木质素、纤维素和半纤维素含量使用FOSS公司的Fibertec 2010&M6纤维分析仪测定^[20]。可溶性果胶和原果胶含量采用咔唑比色法^[21]测定,略做修改。称取2

g鲜样,于研钵中磨碎,用50 mL 95%乙醇洗入三角瓶中,用95%的乙醇在70 °C提取3次,每次30 min,过滤,弃滤液,并用95%的乙醇洗残渣至滤液中无可溶性糖;用40 mL蒸馏水将残渣洗入原三角瓶;50 °C水浴保温1 h,过滤,用少量蒸馏水洗涤残渣和滤纸,滤液一并转入50 mL容量瓶中,定容后用于测定可溶性果胶;残渣用80 mL 0.5 mol/L H₂SO₄洗入原三角瓶,沸水浴加热1 h,冷却后过滤,定容用于测定原果胶。粗纤维的测定采用酸碱洗涤法^[22];采用高效液相色谱法^[23]对刺梨成熟果实膳食纤维的单糖组分进行测定。

1.3 数据统计分析

采用Excel和SPSS18.0数理统计分析软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 刺梨果实发育过程中膳食纤维及其组分的积累动态

图1显示,刺梨果实发育过程中膳食纤维及其组分含量测定结果表明,果实总膳食纤维和不溶性膳食纤维含量于幼果期(花后40 d之前)维持在较高水平,之后随着果实的快速发育而下降,表现出一

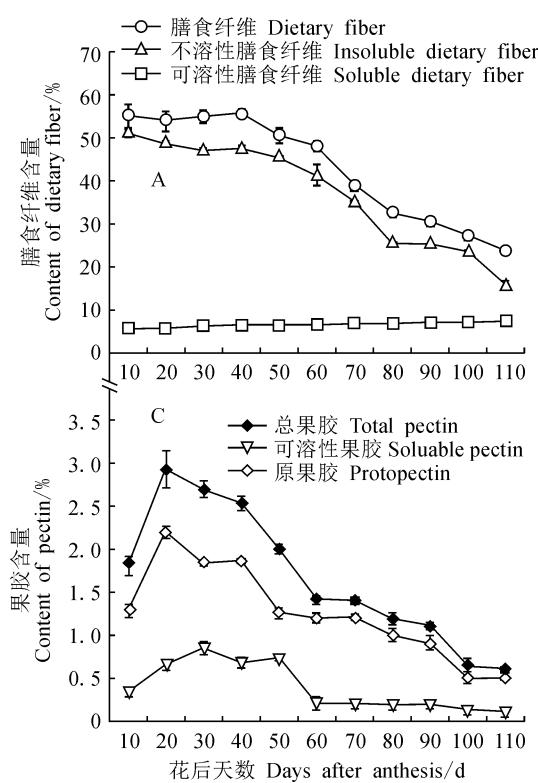


图1 刺梨果实发育过程中膳食纤维及其组分含量变化

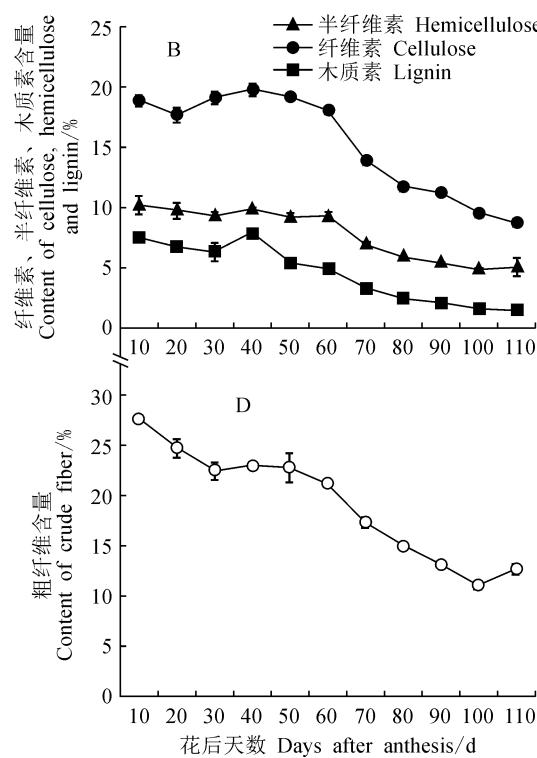


Fig. 1 Changes of dietary fiber and its component contents during fruit development of *Rosa roxburghii*

致的变化趋势,至成熟时分别约占果实干重的24%和16%;而可溶性膳食纤维含量在果实发育过程中变化较平稳,一直维持在干重的8%左右;果实不溶性膳食纤维含量始终明显高于可溶性膳食纤维含量,且在发育过程中的变化幅度也明显大于可溶性膳食纤维(图1,A)。膳食纤维组分纤维素、半纤维素、木质素等含量在刺梨果实的整个发育过程中也呈现持续下降的趋势,并始终表现为纤维素>半纤维素>木质素,而纤维素为膳食纤维的主要组分,至成熟时占果实干重的8.74%;在果实成熟时,纤维素和半纤维素为总膳食纤维的主要组分,占总膳食纤维比例高达60%(图1,B)。同时,膳食纤维组分总果胶、原果胶含量则在刺梨花后20 d之前有一快速积累过程,并于花后20 d时达到峰值,此时它们含量分别为果实干重的2.9%、2.2%;组分可溶性果胶含量在果实发育前期(花后50 d之前)出现不同程度的增加,之后随着果实的生长而迅速下降,至果实发育后期(花后80 d之后)趋于稳定,果实成熟时约占干重的0.11%;在果实发育的整个过程中,原果胶含量始终占了总果胶的绝大部分,明显高于同期可溶性果胶含量(图1,C)。另外,粗纤维含量在果实发育的整个过程中呈现快速下降趋势,果实成熟时约占干重的0.46%(图1,D)。可见,在花后40 d之前的幼果期总膳食纤维和不溶性膳食纤维含量更高,并随着果实的快速发育持续下降;果胶则在花后20 d之前有一快速积累过程,至果实成熟时纤维素和半纤维素为膳食纤维主要组分。

2.2 刺梨果实膳食纤维及其组分在单果发育过程中的积累动态

刺梨单果膳食纤维及其组分的积累量是果实重量与其膳食纤维及其组分含量的乘积,它随着果实的发育膨大均呈现上升的趋势(图2)。其中,单果总膳食纤维、不溶性膳食纤维的积累量在果实发育前期(花后60 d之前)随着果实的迅速增大而呈现上升趋势,之后基本趋于稳定,但明显高于同期可溶性膳食纤维的积累量;而单果可溶性膳食纤维的积累量在整个果实发育期都呈现逐渐上升趋势,至果实成熟时积累量(24.18%)约为总膳食纤维积累量的三分之一(图2,A)。刺梨单果膳食纤维组分纤维素、半纤维素、木质素的积累量也在果实发育前期(花后60 d之前)随着果实的膨大而迅速增加;在果实发育后期,单果纤维素、半纤维素积累量基本趋于稳定,而单果木质素的积累量逐渐下降;至果实成熟时,单果纤维素、半纤维素、木质素的积累量分别为

总膳食纤维积累量的34.97%、17.77%和5.86%(图2,B)。另外,单果总果胶与原果胶积累量的变化趋势相似,两者均在花后90 d之前呈现不同程度的积累,于花后90 d达到最大值(分别为0.22 g、0.18 g),于转色期(花后90~100 d)迅速下降,在果实成熟后期又有所回升;而单果可溶性果胶积累量随着果实发育呈现先升高后降低的变化趋势,在花后50 d时达到最大值(图2,C)。

2.3 刺梨果实中膳食纤维的单糖组成

刺梨成熟果实膳食纤维的单糖组分测定结果(表1)显示,成熟果实膳食纤维中主要有甘露糖、鼠李糖、葡萄糖、木糖、半乳糖、阿拉伯糖、岩藻糖7种单糖组分。其中,刺梨果实总膳食纤维中半乳糖、葡

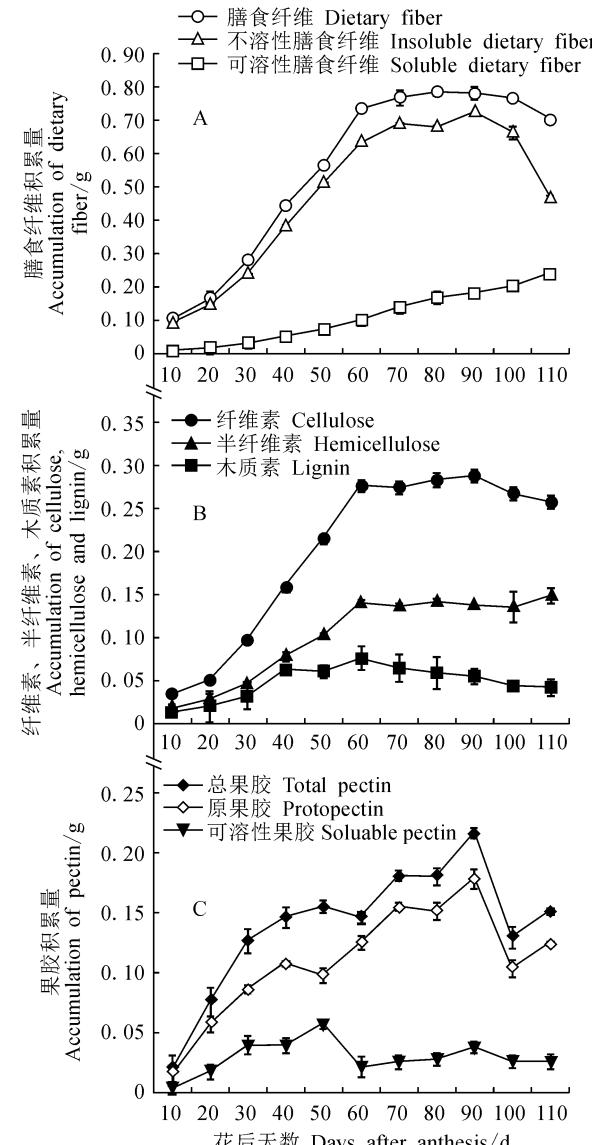


图2 刺梨单果中膳食纤维积累量随生育期的变化

Fig. 2 Accumulation changes of dietary fibre and its components in single fruit of *R. roxburghii*

表1 刺梨成熟果实膳食纤维组分的单糖含量

Table 1 The content of monosaccharides composition of dietary fiber from *R. roxburghii* mature fruit

单糖 Monosaccharide/%	总膳食纤维 Total dietary fiber	不溶性膳食纤维 Insoluble dietary fiber	可溶性膳食纤维 Soluble dietary fiber
甘露糖 Mannose	4.48±0.28	4.77±0.19	3.60±0.26
鼠李糖 Rhamnose	1.53±0.12	2.23±0.13	0.70±0.13
葡萄糖 Glucose	5.16±0.23	7.06±0.21	0.99±0.10
木糖 Xylose	1.73±0.07	2.53±0.18	0.39±0.07
半乳糖 Galactose	5.67±0.14	7.10±0.57	1.25±0.09
阿拉伯糖 Arabinose	1.55±0.10	1.73±0.14	1.20±0.03
岩藻糖 Fucose	0.61±0.11	0.36±0.08	0.81±0.02

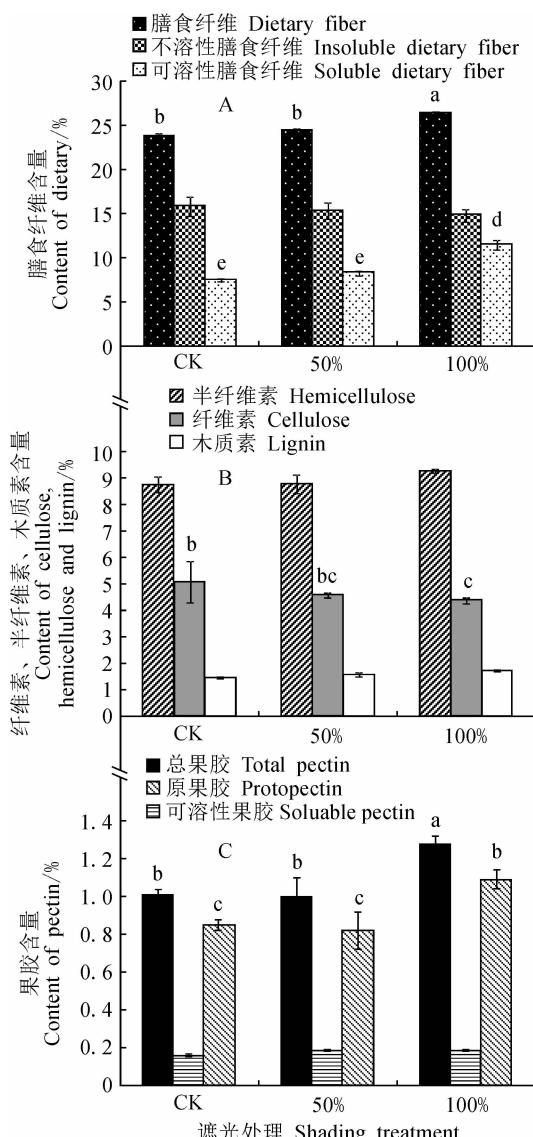


图3 遮光条件下刺梨果实膳食纤维及其组分含量的变化

Fig. 3 The dietary fiber and its components content in fruit of *R. roxburghii* under different shading treatments

葡萄糖为其主要成分,占总膳食纤维比例分别高达5.67%、5.16%,而岩藻糖含量甚微(0.61%);不溶

性膳食纤维中的单糖组分亦是如此,半乳糖、葡萄糖占比分别高达7.10%和7.06%;而在可溶性膳食纤维单糖组分中,主要以甘露糖(3.60%)的含量居多,木糖(0.39%)含量较少。可见,刺梨成熟果实中膳食纤维单糖组分主要以半乳糖、葡萄糖、甘露糖为主,而不溶性膳食纤维单糖组分半乳糖、葡萄糖含量占优,可溶性膳食纤维单糖组分甘露糖含量占优。

2.4 光照强度对刺梨果实膳食纤维积累的调控效应

套袋遮光(遮光50%、遮光100%)对刺梨果实膳食纤维及其组分积累的影响不同。各遮光处理均不同程度促进了刺梨果实总膳食纤维、可溶性膳食纤维的积累,而降低了半纤维素积累,但对果实中总膳食纤维、不溶性膳食纤维、纤维素、木质素的积累影响并不显著(图3)。其中,与自然光照(遮光0%)相比,果实总膳食纤维含量和可溶性膳食纤维含量在100%遮光条件下分别显著增加10.63%和53.13%,而在50%遮光条件下增加不显著(图3,A);果实半纤维素含量随着遮光强度增强而降低,在100%遮光条件下比自然光照显著降低13.66%,而在50%遮光条件下降低不显著(图3,B)。

同时,果实原果胶、总果胶含量在100%遮光条件下分别比自然光照处理显著升高28.24%和28.00%,而在50%遮光条件下均无显著变化;果实可溶性果胶含量在各遮光处理下均无显著变化(图3,C)。由此可知,100%套袋遮光处理显著促进了刺梨果实中总膳食纤维、可溶性膳食纤维、原果胶和总果胶含量的积累,却显著抑制了果实半纤维素积累;50%套袋遮光处理对刺梨果实中各膳食纤维及其组分积累均无显著影响。

3 讨论

前人研究表明,膳食纤维含量在不同种类的果

实中变化趋势差异较大^[24]。在脐橙果实发育过程中,膳食纤维及其组分含量呈直线下降趋势^[25],而在本试验中,刺梨果实发育初期(花后 40 d 之前)膳食纤维、纤维素、半纤维素、木质素、果胶的含量略有上升的趋势,表明纤维素、半纤维素、木质素、果胶为果实生长、发育提供了物质基础;刺梨果实膳食纤维含量在果实膨大中后期及其成熟期表现出下降趋势,这一方面可能与果胶酶和纤维素酶在成熟过程中对细胞壁物质的降解有关,另一方面可能与糖分快速增加有关系。该结果与枇杷^[26]、树梅^[27]的研究结果相似。另外,刺梨果实可溶性膳食纤维的含量在整个发育期都呈现上升趋势,至成熟后期可溶性膳食纤维的含量占到总膳食纤维的三分之一,显著高于谷物^[28],说明刺梨果实中含有丰富的可溶性膳食纤维,可作为膳食纤维的良好来源。

果胶是构成高等植物初生壁和中胶层的主要成分,参与了细胞之间的粘连。随着果实的成熟,胞间层和细胞壁中的果胶出现解聚或增溶^[29-30]。在刺梨果实发育过程中,总果胶、原果胶含量的变化趋势为先升高后降低,在花后 20 d 时达到峰值,分别占到果实干重的 2.9% 和 2.2%;可溶性果胶含量则在果实发育前期(花后 50 d 之前)增加,之后迅速下降,至后期(花后 80 d 之后)趋于稳定,果实成熟时约占果实干重的 0.1%。这与柑橘^[15]、玉露香梨^[31]果实发育过程中的变化趋势不同,可能的原因是在刺梨果实发育过程中,可溶性果胶不是可溶性膳食纤维的主要组成成分,还有其他可溶性膳食纤维也呈现增加趋势。膳食纤维中单糖组分含量测定结果显示,半乳糖、葡萄糖是总膳食纤维和不溶性膳食纤维中的主要单糖,而岩藻糖的含量极少;而甘露糖是可溶性膳食纤维中主要单糖组分,木糖含量最少。其中,葡萄糖是纤维素合成的底物,其含量较高可能是因为纤维素含量在果实膨大中后期及成熟期下降,并转化为葡萄糖。而乳糖参与了半纤维素和果胶合成,其含量的升高说明在刺梨果实发育中后期半纤维素和果胶被分解为乳糖类物质,或者在发育后期半纤维素和果胶的合成受阻所致。此外,高含

量的半乳糖也有助于膳食纤维单糖体外抗氧化活性的提高^[32-33],这为刺梨果实膳食纤维单糖的开发研究提供了依据。

光照作为主要的环境因子之一,能够显著影响植物的光合作用,从而对植物膳食纤维各组分的积累产生影响。本研究发现,100% 遮光处理对刺梨果实可溶性膳食纤维、总膳食纤维的积累具有显著促进作用,这一变化趋势与脐橙^[25]的相关研究结果基本一致,但与骏枣果实^[34]相关研究结果之间存在差异。与自然光照相比,不同遮光程度对刺梨果实中半纤维素的积累均具有一定抑制作用,且 100% 遮光处理的抑制达到显著水平,这与位杰等^[34]对新疆盐碱地枣的研究结果存在差异。同时,本研究中 100% 的遮光处理还显著促进了刺梨果实中原果胶、总果胶的积累,这与位杰等^[34]对新疆盐碱地枣的研究结果一致。另外,与自然光照相比,本研究中两种遮光处理对刺梨果实中不溶性膳食纤维、纤维素、木质素、可溶性果胶的积累影响并不显著,江琴等^[35]实验也表明遮光对成熟的柑橘果实纤维素含量不会造成太大影响,造成这一结果可能的原因是只对果实进行遮光,而树体其他部分处于自然光照条件下,能进行正常的光合作用,合成的物质仍正常转移到果实中,致使果实中上述膳食纤维及其组分积累没有受到影。

综上所述,在刺梨果实的整个发育过程中,总膳食纤维和不溶性膳食纤维百分比含量在幼果期较高,之后随着果实的快速发育持续下降;而可溶性膳食纤维含量在果实发育过程中变化平稳;果实果胶则在花后 20 d 之前有一快速积累过程,至果实成熟时膳食纤维的主要组分为纤维素和半纤维素;花后 60 d 之前是刺梨果实膳食纤维积累的主要时期。半乳糖、葡萄糖是总膳食纤维、不溶性膳食纤维中主要单糖组分,而可溶性膳食纤维中单糖组分主要为甘露糖。不同程度的果实套袋遮光促进了刺梨果实总膳食纤维、可溶性膳食纤维、总果胶、原果胶的积累,但对果实中不溶性膳食纤维、纤维素、木质素、可溶性果胶的积累影响并不显著。

参考文献:

- [1] 易甜,崔文文,王明锐,等.锦橙皮渣膳食纤维微粉化及其功能特性分析[J].食品科学,2019,40(10):8-14.
YI T, CUI W W, WANG M R, et al. Functional and struc-

tural properties of micronized dietary fiber powder extracted from peel and pomace of Jincheng sweet oranges [Citrus sinensis (L.) Osbeck cv. Jincheng] [J]. Food Science, 2019, 40 (10): 8-14.

- [2] SCHWEINGRUBER F H. Wood Structure and Environment [M]. Berlin: Springer, 2007: 181.
- [3] 张孟凡, 岳 丽, 敬思群, 等. 超声辅助-酶解协同作用提取红枣膳食纤维及其促消化作用[J]. 食品工业科技, 2019, **40**(7): 205-212.
- ZHANG M F, YUE L, JING S Q, et al. Extraction of dietary fiber from red jujube residue by ultrasonic-enzymatic hydrolysis synergistic action and its promoting digestion function[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, **40**(7): 205-212.
- [4] 张 瑞, 吕梅霞, 吾布力卡司木·艾克拜尔, 等. 鹰嘴豆膳食纤维对高脂血症大鼠脂代谢的改善作用[J]. 现代食品科技, 2018, **34**(10): 15-21.
- ZHANG R, LÜ M X, WUBULIKASIMU · AIKEBAIER, et al. Improvement effect of dietary fiber from chickpea on lipid metabolism in hyperlipidemic rats[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2018, **34**(10): 15-21.
- [5] ELLEUCH M, BEDIGIAN D, ROISEUX O, et al. Dietary fibre and fibre-rich by-products of food processing: Characterisation, technological functionality and commercial applications: a review[J]. *Food Chemistry*, 2011, **124**(2): 411-421.
- [6] YAN X G, YE R, CHEN Y. Blasting extrusion processing: The increase of soluble dietary fiber content and extraction of soluble-fiber polysaccharides from wheat bran [J]. *Food Chemistry*, 2015, **180**: 106-115.
- [7] TOSH S M, YADA S. Dietary fibres in pulse seeds and fractions: Characterization, functional attributes, and applications [J]. *Food Research International*, 2010, **43**(2): 450-460.
- [8] YU C, ZENG L Z, SHENG K, et al. Γ -aminobutyric acid induces resistance against *Penicillium expansum* by priming of defence responses in pear fruit[J]. *Food Chemistry*, 2014, **159**: 29-37.
- [9] 祝 珊. 柑橘果实膳食纤维的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [10] 董文成. 柑橘果实膳食纤维物化特性及其性能表征研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [11] DONG T, XIA R X, XIAO Z Y, et al. Effect of pre-harvest application of calcium and boron on dietary fibre, hydrolases and ultrastructure in 'Cara Cara' navel orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck) fruit[J]. *Scientia Horticulturae*, 2009, **121**(3): 272-277.
- [12] BORCHANI C, FONTEYN F, JAMIN G, et al. Physical, functional and structural characterization of the cell wall fractions from baker's yeast *Saccharomyces cerevisiae*[J]. *Food Chemistry*, 2016, **194**: 1 149-1 155.
- [13] 史俊燕, 张秀梅, 孙光明. 菠萝果实膳食纤维的研究[J]. 广东农业科学, 2010, **37**(11): 110-111, 120.
- SHI J Y, ZHANG X M, SUN G M. Study on the dietary fiber of pineapple [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2010, **37**(11): 110-111, 120.
- [14] 李元会. 不同方式贮藏对拉萨刺梨品质的影响[J]. 食品科学, 2018, **39**(9): 239-243.
- LI Y H. Effects of different storage methods on quality of *Rosa roxburghii* fruits from Lhasa[J]. *Food Science*, 2018, **39**(9): 239-243.
- [15] HUANG W N, ZHU N, ZHU C Q, et al. Morphology and cell wall composition changes in lignified cells from loquat fruit during postharvest storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, **157**: 110-975.
- [16] 杨国慧, 吕冰玉, 韩德果, 等. 树莓果实发育过程中细胞壁成分及相关酶活性变化[J]. 北方园艺, 2016, (11): 27-30.
- YANG G H, LYU B Y, HAN D G, et al. Change of cell wall components and related enzyme activities during the development process of raspberry fruit[J]. *Northern Horticulture*, 2016, (11): 27-30.
- [17] 谢 娟. 红树莓果实生长发育规律及显微结构研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2011.
- [18] 刘玉倩, 孙雅蕾, 鲁 敏, 等. 刺梨果实中膳食纤维的组分与含量[J]. 营养学报, 2015, **37**(3): 303-305.
- LIU Y Q, SUN Y L, LU M, et al. Components and contents of dietary fiber in *Rosa roxburghii* fruits[J]. *Acta Nutrimenta Sinica*, 2015, **37**(3): 303-305.
- [19] 杨晓莉, 杨月欣, 周瑞华, 等. 食品中总的、不溶性及可溶性膳食纤维的酶-重量测定法[J]. 卫生研究, 2001, **30**(6): 377-378, 390.
- YANG X L, YANG Y X, ZHOU R H, et al. Determination of total, soluble and insoluble dietary fiber in foods by enzymatic-gravimetric method[J]. *Journal of Hygiene Research*, 2001, **30**(6): 377-378, 390.
- [20] 刘文静, 潘 蔚, 任丽花. FIBERTEC 2010 半自动纤维分析仪测定饲料中纤维素、半纤维素、木质素的方法研究[J]. 福建农业学报, 2013, **28**(7): 722-726.
- LIU W J, PAN W, REN L H. Study on the determination of cellulose, hemicellulose and lignin in feed by Fibertec 2010 semi-automatic fiber analyzer[J]. *Journal of Fujian Agriculture*, 2013, **28**(7): 722-726.
- [21] 杨继涛, 杨 敏. 响应面法优化籽瓜皮中高纯度果胶的提取工艺[J]. 中国酿造, 2015, **34**(5): 110-114.
- YANG J T, YANG M. Optimization of extraction technology of high purity pectin from seed melon peel using response surface methodology[J]. *China Brewing*, 2015, **34**(5): 110-114.
- [22] 周勇辉. 6种常见的蔬菜中粗纤维含量的测定[J]. 现代园艺, 2019, (1): 13-14.

- ZHOU Y H. Determination of crude fiber content in six common vegetables [J]. *Xiandai Horticulture*, 2019, (1): 13-14.
- [23] 周彦强, 吴光斌, 陈发河. PMP 柱前衍生化 HPLC 法测定黄秋葵多糖的单糖组成[J]. 食品科学, 2019, **40**(4): 266-271.
- ZHOU Y Q, WU G B, CHEN F H. Analysis of monosaccharide composition of polysaccharides from okra by pre-column derivatization high performance liquid chromatography [J]. *Food Science*, 2019, **40**(4): 266-271.
- [24] RAMULU P, UDAYASEKHARA RAO P. Total, insoluble and soluble dietary fiber contents of Indian fruits[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2003, **16**(6): 677-685.
- [25] 曾秀丽, 张光伦, 李春燕, 等. 脐橙果实膳食纤维的动态变化研究[J]. 四川农业大学学报, 2006, **24**(1): 69-72.
- ZENG X L, ZHANG G L, LI C Y, et al. The studying on the dietary fiber of navel orange [Citrus sinesis (L.) Osb.] fruit [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2006, **24**(1): 69-72.
- [26] 黄志明, 林素英, 傅明连, 等. 枇杷果实发育过程中果肉质地与胞壁酶活性的变化[J]. 热带作物学报, 2012, **33**(1): 24-29.
- HUANG Z M, LIN S Y, FU M L, et al. The change of cell wall enzymes and fruit texture during the development and maturation of *Eriobotrya japonica* [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2012, **33**(1): 24-29.
- [27] 杨国慧, 张伟, 韩德果, 等. 不同类型树莓果实发育期间主要成分的变化[J]. 东北农业大学学报, 2012, **43**(10): 61-65.
- YANG G H, ZHANG W, HAN D G, et al. Change of main components in different types of raspberry during fruit development [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2012, **43**(10): 61-65.
- [28] TUNGLAND B C, MEYER D. Nondigestible oligo-and polysaccharides (dietary fiber): their physiology and role in human health and food [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2002, **1**(3): 90-109.
- [29] BRUMMELL D A. Cell wall disassembly in ripening fruit [J]. *Functional Plant Biology*, 2006, **33**(2): 103-119.
- [30] 阎香言, 张熠可, 李福瑞, 等. 不同质地桃果实软化过程中细胞壁组分变化的差异[J]. 北方园艺, 2017, (20): 60-66.
- YAN X Y, ZHANG Y K, LI F R, et al. Differences in cell wall composition during softening of peach fruit with different flesh texture [J]. *Northern Horticulture*, 2017, (20): 60-66.
- [31] 杨盛, 白牡丹, 郝国伟, 等. ‘玉露香梨’果实发育中细胞壁组分和水解酶活性的变化[J]. 中国南方果树, 2019, **48**(2): 110-111, 115.
- YANG S, BAI M D, et al. Changes on cell wall components and hydrolase activity of ‘Yulu Xiangli’ pear during fruit developing [J]. *South China Fruits*, 2019, **48**(2): 110-111, 115.
- [32] CHAOUCH M A, HAFSA J, et al. Effect of extraction conditions on the antioxidant and antiglycation capacity of carbohydrates from *Opuntia robusta cladodes* [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2016, **51**(4): 929-937.
- [33] 商飞飞, 祝儒刚, 张鑫雨, 等. 山楂多糖的分离纯化及抗氧化和抗糖化活性研究[J]. 现代食品科技, 2019, **35**(9): 96-101, 303.
- SHANG F F, ZHU R G, ZHANG X Y, et al. Extraction, isolation and purification of haw polysaccharide and its antioxidant and antiglycation activities *in vitro* [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2019, **35**(9): 96-101, 303.
- [34] 位杰. 新疆盐碱地枣园光照对枣糖分积累与转化的影响研究[D]. 新疆阿拉尔:塔里木大学, 2015.
- [35] 江琴. 武汉地区设施栽培柑橘果实发育及其品质变化研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2009.

(编辑:裴阿卫)