文冠果果实生长发育与内含物变化规律

李雨嫣[1],敖　妍[1*],赵磊磊[2],徐向银[2],陈育红[3],娜日苏[4]

(1.林木资源高效生产全国重点实验室,北京林业大学林学院,省部共建森林培育与保护教育部重点实验室,国家能源非粮生物质原料研发中心,北京　100083;2.内蒙古赤峰市翁牛特旗林业和草原局,内蒙古赤峰　024500;3.内蒙古赤峰市阿鲁科尔沁旗森林草原保护发展中心,内蒙古　赤峰　025550;4.内蒙古赤峰市阿鲁科尔沁旗巴日图机械防火站,内蒙古　赤峰　025550)

摘要:【目的】文冠果是中国特有木本油料树种,除种仁油之外,果皮皂苷在生产中也具有较高利用价值。本研究对文冠果优良无性系果实生长发育过程中果实形态指标、种仁油脂含量、果皮中皂苷、可溶性糖和淀粉含量的动态变化进行分析,为文冠果高效栽培管理和果实采收策略的制定提供科学依据。【方法】调查了文冠果果实生长发育过程及内含物含量动态变化,并建立相关生长模型。【结果】①文冠果果实横纵径生长发育曲线为单"S"形曲线,果实生长过程可划分为生长初期(花后 1~16 d)、速生期(花后 17~38 d)、生长后期(花后 39~45 d)、果实成熟期(花后 46~80 d)4 个阶段。②种子油脂及果皮皂苷积累关键时期分别为花后 45~80 d 和花后 55~65 d,种仁含油率和果皮皂苷质量分数最高值分别出现在花后 80 d(62.75%)和 65 d (1.599%)。可溶性糖与淀粉含量分别在花后 75 d 和花后 65 d 达到峰值。③果皮皂苷、可溶性糖、淀粉含量与果实横纵径、鲜质量呈极显著正相关。【结论】花后 75~80 d 为文冠果油用果实最佳采收期,此时果实横径 64.82~66.47 mm,纵径 67.26~69.97 mm;花后 60~65 d 为皂用果实最佳采收期,此时果实横径 62.64~63.63 mm,纵径 65.57~65.94 mm。

关键词:文冠果;果实发育;内含物;皂苷

中图分类号:S565.9　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1000-2006(2025)02-0031-07

Regularities of fruit growing and development and its inclusion of *Xanthoceras sorbifolium*

LI Yuyan[1], AO Yan[1*], ZHAO Leilei[2], XU Xiangyin[2], CHEN Yuhong[3], NA Risu[4]

(1. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, School of Forestry, Beijing Forestry University, National Energy R&D Center for Non-food Biomass, Beijing 100083, China; 2. Forestry and Grassland Bureau of Onniute Banner, Chifeng 024500, China; 3. Forest Grassland Protection and Development Center of Akeerqin Banner, Chifeng 025550, China; 4. Alukeerqin Banner, Ba Ri Tu Mechanical Fire Prevention Station, Chifeng 025550, China)

Abstract:【Objective】*Xanthoceras sorbifolium* is a unique woody oil-bearing tree species native to China. In addition to the value of its seed oil, the saponins in the fruit husk also have significant utilization values in production. This study aims to analyze the dynamic changes in fruit morphological traits, kernel oil content, saponin, soluble sugar, and starch content during the growth and development of fruits from superior clonal lines of *X. sorbifolium*, intending to provide a scientific basis for the efficient cultivation and fruit harvesting strategies.【Method】The study observed the dynamic changes in the growth and development of the fruits and their internal content and constructed a growth model accordingly.【Result】(1) The development processes of fruit transverse and longitudinal diameters followed sigmoid growth curves. Fruit development can be divided into four stages: the initial growth stage (1-16 days after flowering), the rapid growth stage (17-38 days after flowering), the late growth stage (39-45 days after flowering), and the fruit maturity stage (46-80 days after flowering). (2) The key periods for accumulating seed oil and fruit peel saponins were

收稿日期 Received:2024-01-30　　**修回日期** Accepted:2024-04-03

基金项目:国家重点研发计划(2022YFD2200402);国家自然科学基金项目(32071738)。

第一作者:李雨嫣(aliceliyuyan@gmail.com)。*通信作者:敖妍(aoyan316@163.com),教授。

引文格式:李雨嫣,敖妍,赵磊磊,等. 文冠果果实生长发育与内含物变化规律[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2025,49(2):31-37.LI Y Y, AO Y, ZHAO L L, et al. Regularities of fruit growing and development and its inclusion of *Xanthoceras sorbifolium* [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2025, 49(2): 31-37. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202401027.

45-80 days and 55-65 days after flowering, respectively. The peak values appeared at 80 days (62.75%) and 65 days (1.599%). Peak values for soluble sugars and starch occurred at 75 and 65 days after flowering. (3) The contents of saponin, soluble sugar, and starch in the fruit showed a highly significant positive correlation with the transverse and longitudinal diameters and the fruit's fresh weight. 【Conclusion】 The optimal harvesting period for *X. sorbifolium* fruits for oil usage is 75-80 days after flowering, during which the transverse diameter of the fruit ranges from 64.82 to 66.47 mm, and the longitudinal diameter from 67.26 to 69.97 mm. For saponin usage, 60-65 days after flowering is suitable for fruit harvest, at which time the transverse diameter of fruits is 62.64 to 63.63 mm, and the longitudinal diameter is 65.57 to 65.94 mm.

Keywords: *Xanthoceras sorbifolium*; fruit development; nutshell inclusion; saponin

文冠果(*Xanthoceras sorbifolium*)属无患子科(Sapindaceae)文冠果属(*Xanthoceras*)落叶灌木或乔木,主要分布在中国北方地区[1]。文冠果耐寒、耐旱、耐瘠薄,具有保持水土、涵养水源的作用[2],并在化工、医学、食品等领域均有极大的开发利用价值[3]。作为木本油料树种,其种仁含油率高[4],油的碳链长度为 C_{16}—C_{18},不饱和脂肪酸含量高[5],可作为生产高级食用油或生物柴油的原料。文冠果果皮中的皂苷质量分数可达 0.24 mg/g[6],所含皂苷种类多,可用于生产肥皂等日化用品[7]。在医学领域也有较高的利用价值,具有抗癌、抗氧化、抗炎、治疗阿尔茨海默症等作用[3, 8-11]。文冠果果皮中仍有新的三萜皂苷不断被发现[12],综合利用前景广阔。

皂苷是由三萜苷元与糖通过糖苷键连接的配糖体,作为低聚糖苷类化合物,其形成需各类糖基。果皮皂苷含量与淀粉、可溶性糖等糖类含量的转化关系密切[13]。文冠果果实生长包括发育初期、快速生长期、成熟期 3 个阶段[2]。马利苹等[14]对乌丹地区文冠果果实生长进程与有效积温的关系进行了研究,并观测落花落果现象,但未涉及果皮内含物含量变化规律。目前,关于文冠果果皮皂苷的研究主要集中在其种类、性质、开发利用前景[3],以及不同产地果实皂苷含量变异[15]等,但果皮中皂苷含量在生长发育过程中的变化规律尚不清楚。文冠果果实较大,果皮皂苷含量高,因此,果皮具有较高的利用价值。但在生产中更多关注的是文冠果种子油脂利用,果皮多数在采收后弃置或用作绿肥,果皮皂苷仍未得到合理高效的利用[16]。如何充分实现文冠果果实的综合利用,在种子含油率达到最高的同时,果皮皂苷含量是否达到最高,或者基于油用和皂用两种不同利用目的的文冠果果实最佳采收时间的确定,已成为文冠果果实高效利用过程中亟待解决的问题。

为此,本研究对文冠果优良无性系果实生长发育过程中果实形态指标、种仁油脂含量、果皮中皂苷、可溶性糖和淀粉含量的动态变化进行测定,揭示文冠果果实生长发育规律及内含物变化特征,为从形态特征角度便捷、准确确定基于不同利用目的的果实最佳采收时期,提高文冠果种子油脂以及皂苷利用率提供理论依据。同时,本研究结果可为利用机器视觉确定果实采收期,实现自动化采收[17]提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于辽宁省朝阳市大平房镇(120°16′E,41°25′N),属于北温带大陆性季风气候区。日照充分且温差较大,干燥少雨,年均降水量 438.8 mm,年均气温 9.7 ℃,日照时数 2 861.7 h,无霜期 158 d,土壤类型为褐土,土层厚度约 100 cm[18]。

1.2 试验材料

试验林分为 2016 年建立的文冠果种质资源圃,株行距 1.5 m×1.5 m。于 2020 年选择优良无性系辽冠 15 号中生长结实良好、无病虫害的 45 株进行调查取样。自花后 10 d(5 月 14 日)至花后 80 d(7 月 23 日),每隔 5 d 采样 1 次,共采样 15 次。每次从树冠东、西、南、北方向各采 3 个果实混合为 1 份样品,共采果 12 个,将每棵树上采摘的果实混合作为 1 个生物学重复,每个时期每棵树进行 3 个采样重复。

1.3 指标测定

采用游标卡尺测定果实横纵径,对果实称鲜质量(W_s)之后,将种子和果皮分离,均置于 65 ℃烘箱烘干至质量恒定,冷却后再次对果实称干质量(W_g)。计算果实含水率(ρ)公式如下:

$\rho=(W_s-W_g)/W_s\times100\%$。

之后将果皮研磨成粉,用于后续测定皂苷和非结构碳水化合物含量。利用香草醛-高氯酸比色法测定果皮中的皂苷含量[19],利用高氯酸水解法水解果皮中的淀粉,利用蒽酮比色法[20]测定果皮中

的可溶性糖及淀粉含量,用索氏提取法[21]测定种仁含油率。

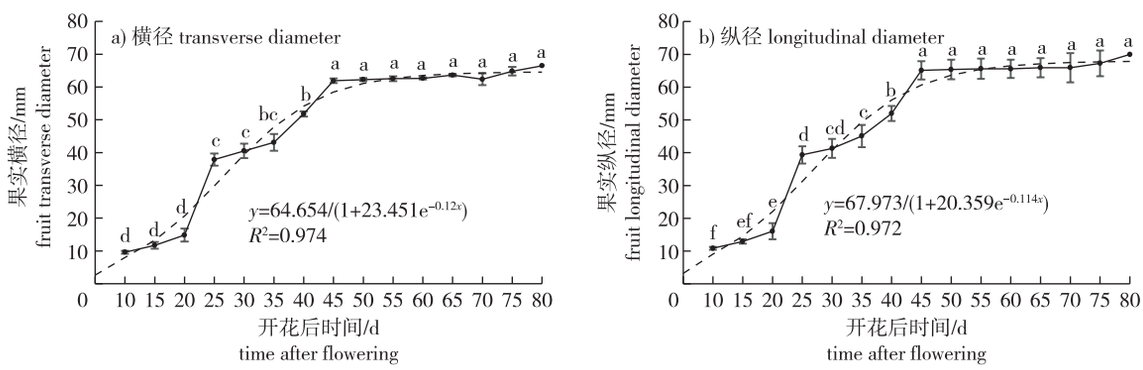
1.4　数据处理

采用 SPSS 26 软件进行数据处理,并采用 Logistic方程模型对文冠果果实生长发育直径与质量指标进行曲线拟合,分析各项指标的关键拐点 t_1(始盛期)、t_2(高峰期)、t_3(盛末期),确定各指标生长发育变化时期。t_1之前为生长初期,t_1—t_3为速生期(t_1—t_2为速生期前期,t_2—t_3为速生期后期),t_3之后为生长后期[22-23]。

2　结果与分析

2.1　文冠果果实发育过程中的表型变化

果实发育初期(花后 10~20 d),文冠果果实体积较小,为深绿色。花后 25~65 d,果实逐渐长大,横纵径均逐渐增长,果皮颜色由深绿色转变为青绿色。花后 65~75 d 果皮明显开裂,果皮逐渐转为黄绿色。文冠果果实生长发育期约为 3 个月(5 月中旬—7 月末),其间果实横纵径变化趋势均呈现“慢—快—慢”的单“S”形曲线。果实发育初期,即花后 10~20 d(5 月 14 日—5 月 24 日),果实横纵径增长速度较缓(图 1)。横径平均增长量占果实横径的 9.20%,纵径平均增长量占果实纵径的 8.80%。花后 20~45 d(5 月 24 日—6 月 18 日)果实快速生长,横径均值从 14.83 mm 增长到 61.92 mm,平均增长量占果实横径的 92.00%;纵径均值从 16.05 mm 增长到 65.11 mm,平均增长量占果实纵径的 91.77%。花后 45 d(6 月 18 日)直至花后 80 d(7 月 23 日),果实横纵径增长不明显,均仅增长 7%。果实发育过程中,纵径始终大于横径。



不同字母表示在 0.05 水平上差异显著($P<0.05$) different letters indicate significant differences between treatments at the 0.05 level;┄拟合曲线fitting curve。下同 the same below。

图 1　文冠果果实发育过程中横、纵径变化动态及拟合曲线

Fig. 1　Dynamic changes and fitting curve of transverse and longitudinal diameter during fruit development of *Xanthoceras sorbifolium*

文冠果果实鲜质量呈现先上升后下降的趋势(图 2)。果实鲜质量在花后 10~45 d 显著上升,从 1.14 g 增加至 124.51 g。花后 45~65 d(6 月 18 日—7 月 8 日),果实鲜质量小幅下降至 120.80 g,再上升至最高值 128.86 g,在开花 70 d 后出现明显下降。在果实成熟(花后 80 d)时鲜质量下降至 79.52 g。

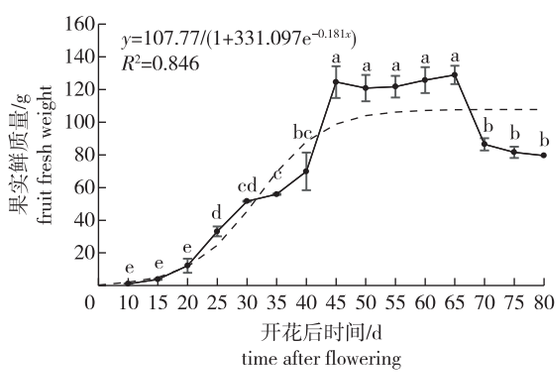


图 2　文冠果果实发育过程中鲜质量变化动态

Fig. 2　Dynamic changes of fruit fresh weight during fruit development of *X. sorbifolium*

采用 Logistic 方程对文冠果果实横径、纵径、鲜质量的生长模型进行曲线拟合结果见表 1。R 为 0.920~0.987,达到显著或极显著水平。比较方程拟合结果并分析出现始盛期、高峰期、盛末期的关键拐点(t_1、t_2、t_3)可知,果实横径与纵径达到始盛期时间相近(分别为花后 16 d 及花后 15 d),且达到生长高峰期时间(花后 26 d)及盛末期时间(花后 38 d)相同。果实鲜质量各生长阶段的起始时间及持续时间与果实横纵径存在差异,且进入始盛期及高峰期时间均较果实横纵径更晚,分别为花后 24 和 32 d,进入盛末期时间基本一致(花后 38 d 左右)。综上,果实生长可划分为生长初期(花后 1~16 d)、速生期(花后 17~38 d)、生长后期(花后

39~45 d)、果实成熟期(花后 46~80 d)。

表 1 文冠果果实生长指标的 Logistic 模型

Table 1 Logistic models of fruit growth indexes of *Xanthoceras sorbifolium*

指标 index	方程 equation	*F*	*R*	生长时间/d growth time		
				t_1	t_2	t_3
横径 transverse diameter	$y=64.654/(1+23.451e^{-0.12x})$	155.248	0.987	16	26	38
纵径 longitudinal diameter	$y=67.973/(1+20.359e^{-0.114x})$	39.261	0.986	15	26	38
果实鲜质量 fruit fresh weight	$y=107.77/(1+331.097e^{-0.181x})$	43.797	0.920	24	32	39

注:*F* 为 *F* 检验的统计量值;*R* 为拟合优度;t_1、t_2、t_3 为 Logistics 曲线的 3 个关键拐点,分别代表始盛期、高峰期和盛末期出现的天数。*F* is the statistical value of the *F* test; *R* is the goodness-of-fit index; t_1, t_2 and t_3 are the three key inflection points of the Logistic curves, representing the days of the initial peak period, peak period, and end of peak period, respectively.

2.2 文冠果果实生长过程中内含物动态变化

2.2.1 果实含水率动态变化

文冠果果实含水率呈现先上升后下降的趋势(图 3)。在生长发育前期(花后 10~40 d)果实含水率逐渐上升,并在花后 40 d(6 月 13 日)达到最大值(74.91%)。果实含水率在花后 40~65 d 逐渐下降至 59.48%,并在花后 65~75 d 大幅下降,从 59.48%下降至 11.30%。表明文冠果果实失水主要发生在 7 月初,这与果皮出现开裂、果实横纵径下降的时间基本一致。

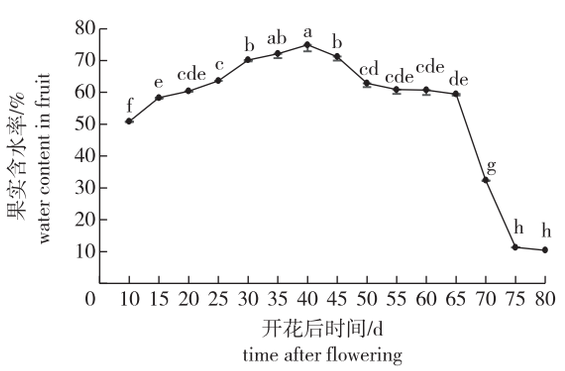


图 3 文冠果果实发育过程中含水率动态变化

Fig. 3 Dynamic changes of fruit water content during fruit development of *X. sorbifolium*

2.2.2 种仁含油率动态变化

种仁含油率在开花 40 d 后呈上升趋势(图 4)。在开花后 45~55 d 期间含油率出现跃迁,含油率从 9.745%上升至 45.709%。此后种仁含油率仍持续上升,在花后 80 d 时达到最高值 62.75%,表明文冠果种仁油脂在此时完成积累,即种仁油脂积累的关键时期为花后 45~80 d。故文冠果在花后 75~80 d 采收能获得较高的种仁含油率,此时横径为 64.82~66.47 mm,纵径为 67.26~69.97 mm,果实鲜质量为 79.52~81.55 g。

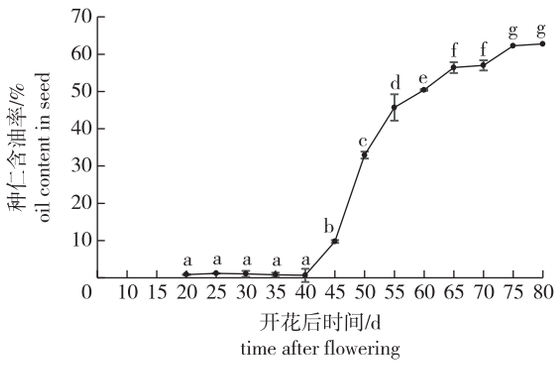


图 4 文冠果果实发育过程中种仁含油率动态变化

Fig. 4 Dynamic changes of total oil content in seed kernel during fruit development of *X. sorbifolium*

2.2.3 果皮皂苷含量动态变化

果皮皂苷含量呈现先升后降的趋势,花后 10~55 d(5 月 14 日—6 月 28 日),果皮皂苷质量分数逐渐上升至 0.778%(图 5)。花后 55 d 起,皂苷含量快速积累。花后 65 d 时果皮皂苷质量分数达到最大值(1.599%),显著高于其他时期。此时果实横径达 63.63 mm,纵径 65.94 mm,果实鲜质量 128.86 g,说明文冠果皂苷积累关键时期为 55~65 d。花后 65~75 d,果皮皂苷质量分数大幅下降至 1.024%。花后 80 d 时果皮皂苷略有上升(1.057%),但仍显著低于 65 d。说明果皮皂苷含量在果皮开裂(花后 65 d)前较高,在花后 60~65 d 采收能获得较高果皮皂苷含量,且花后 65 d 时含量最高。皂用果实最佳采收期间果实横径为 62.64~63.63 mm,纵径为 65.57~65.94 mm,果实鲜质量为 125.69~128.86 g。

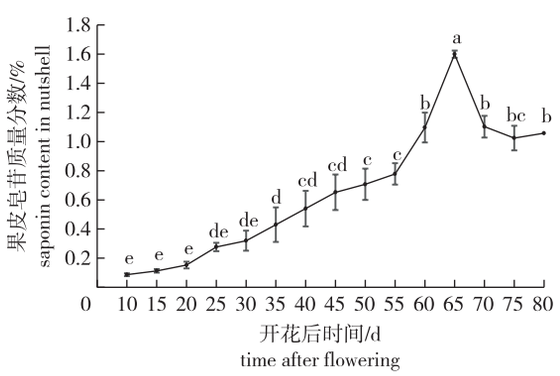


图 5 文冠果果实发育过程中果皮皂苷含量动态变化

Fig. 5 Dynamic changes of total saponin content in nutshell during fruit development of *X. sorbifolium*

2.2.4　果皮可溶性糖及淀粉含量动态变化

文冠果果实发育过程中果皮可溶性糖与淀粉含量变化动态见图 6。由图 6 可知,文冠果果实发育期间,果皮的可溶性糖含量整体呈上升趋势(图 6)。花后 35 d(6 月 8 日)达到 19.2%。花后 35~40 d,含糖量略有下降,在此之后随着果实生长发育,果皮可溶性糖质量分数持续上升,于花后 75 d(7 月 18 日)达到最大值,为 23.9%。

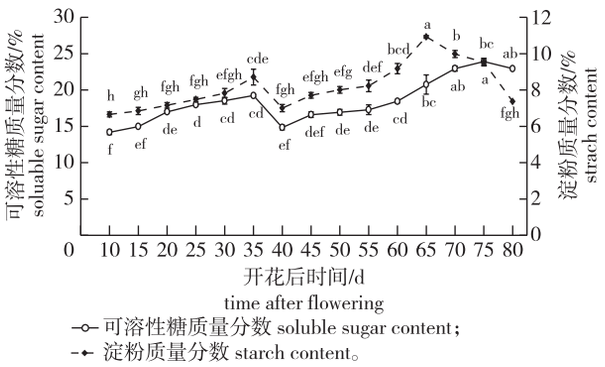


图 6　文冠果果实发育过程中果皮可溶性糖与淀粉含量动态变化

Fig. 6　Dynamic changes of soluble sugar and starch content in the nutshell during fruit development of *X. sorbifolium*

淀粉含量变化规律与可溶性糖相似。花后 35 d淀粉质量分数上升至 8.7%,花后 35~40 d 淀粉含量下降,之后持续上升,在花后 65 d 达到峰值(10.9%),早于可溶性糖峰值,与皂苷峰值出现时间相同。

2.3　果实表型变化与果实内含物含量的关系

对文冠果果皮中可溶性糖、淀粉和皂苷含量与果实形态指标横纵径、鲜质量、含水率之间相关性进行分析(表 2)。结果表明,果皮内皂苷、可溶性糖、淀粉含量与果实横纵径、果实鲜质量都呈极显著正相关关系。此外,皂苷及可溶性糖含量与含水率显著负相关。由于果实横纵径及鲜质量的测量较为简便,生产中可根据果实横纵径或鲜质量初步判断果实内含物积累情况。

表 2　文冠果果实形态与内含物的相关性

Table 2　Correlations between the inclusions in the nutshell and fruit morphology of *X. sorbifolium*

指标 index	横径 transverse diameter	纵径 longitudinal diameter	果实鲜质量 fruit fresh weight	含水率 water content	皂苷含量 saponin content	可溶性糖含量 soluble sugar content
纵径 longitudinal diameter	0.987**					
果实鲜质量 fruit fresh weight	0.880**	0.860**				
含水率 water content	−0.276	−0.280	0.040			
皂苷含量 saponin content	0.813**	0.826**	0.717**	−0.377*		
可溶性糖含量 soluble sugar content	0.589**	0.597**	0.306**	−0.698**	0.670**	
淀粉含量 starch content	0.584**	0.554**	0.570**	−0.223	0.728**	0.635**

注:**. $P<0.01$;*. $P<0.05$。

3　讨　论

3.1　文冠果采果期的确定

文冠果果皮中皂苷是可利用的有效活性成分,作为皂苷的合成物质,可溶性糖含量是影响皂苷含量的关键因素[24]。本研究发现,文冠果果皮皂苷含量与可溶性糖含量呈显著正相关关系,说明可溶性糖能够促进皂苷的生物合成,这与人参皂苷合成类似。在一定范围内,随着三七(*Panax notoginseng*)体内的淀粉蔗糖代谢强度增强,人参皂苷合成强度也显著增强[25]。本研究中文冠果果皮中皂苷与淀粉含量开始下降的转折点(花后 65 d)相同,且两者呈显著正相关关系,可以推测在果皮皂苷合成过程中,淀粉能够通过分解为蔗糖进而分解为葡萄糖影响皂苷前体物质的积累,间接影响皂苷含量[26]。有关罗汉果的研究也表明,皂苷的生物合成包含在母核环上连续增加葡萄糖基的过程,与本研究推测结果一致[27]。开花 65 d 之后,果皮中皂苷含量明显降低,因此,以皂苷为利用目的的适宜采摘时期应为花后 60~65 d,此时果实横径 62.64~63.63 mm,纵径 65.57~65.94 mm,果实鲜质量 125.69~128.86 g。文冠果种仁含油率在花后 80 d 达到最高值,且花后 75 d 含油率仅略低于最高值。因此,以种子油脂为利用目的的果实最佳采收期在花后 75~80 d,此时果实横径 64.82~66.47 mm,纵径 67.26~69.97 mm,果实鲜质量 79.52~81.55 g。

3.2　文冠果果实生长过程及其主要内含物变化

文冠果果实横纵径生长变化趋势相对一致,符合单“S”形曲线。根据 Logistic 模型可将果实生长

过程划分为生长初期(花后 1~16 d)、速生期(花后 17~38 d)、生长后期(花后 39~45 d)、果实成熟期(花后 46~80 d)。花后 1~16 d 果实生长发育缓慢的原因可能是新梢生长和幼叶萌发成熟是生长中心,相较于幼果生长的库强更强,导致分配给果实的营养较少,进而导致生长缓慢。当叶片发育成熟转换为源,能够为树体提供营养物质时[28],果实生长发育进入速生期(花后 17~38 d)。

在果实成熟过程中,花后 45~65 d,果皮皂苷、可溶性糖、淀粉含量增长较高。文冠果在此时已完成果实形态生长,开始养分的积累和转化[14, 29]。花后 65~80 d,除果实鲜质量和含水率明显下降,果皮皂苷和淀粉含量也显著下降,该时期果实成熟起主导作用,推测果皮内含物含量降低使果实成熟之前的养分回流以补充树体损失的养分,与生殖生长期养分再吸收的理论一致[30]。同时,果皮可溶性糖出现由逐渐积累到显著下降的转折点,种仁可溶性糖及淀粉含量也呈下降趋势,而种仁含油率小幅上升,说明此阶段果皮与种子间物质转化与运输强度较大[31]。文冠果果实成熟过程中内含物在果皮与种子之间以及内部的运输和转化机制尚需深入研究。

参考文献(reference):

[1] 中国科学院《中国植物志》编辑委员会.中国植物志 第九卷第二分册[M].北京:科学出版社,2002.

[2] 张毅,敖妍,刘觉非,等.文冠果物候期对环境因子的响应[J].南京林业大学学报(自然科学版),2019,43(5):30-36. ZHANG Y,AO Y,LIU J F,et al.Response of phenophase of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge to environmental factors[J].J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed),2019,43(5):30-36.DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.201809024.

[3] 杨帆,韩沙沙,南易,等.文冠果研究开发进展[J].中国中药杂志,2021,46(17):4334-4343.YANG F,HAN S S,NAN Y,et al. Progress in research and development of *Xanthoceras sorbifolia* [J].China J Chin Mater Med,2021,46(17):4334-4343.DOI: 10.19540/j.cnki.cjcmm.20210524.603.

[4] 敖妍.不同地区文冠果群体种子含油率·产量变异规律[J].安徽农业科学,2009,37(25):11967-11969.AO Y.Variation law of seed oil content and yield of *Xanthoceras sorbifolia* populations in different areas[J].J Anhui Agric Sci,2009,37(25):11967-11969.DOI: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2009.25.091.

[5] 丁明秀,敖妍.文冠果开花座果研究进展[J].中国农学通报,2008,24(10):381-384.DING M X,AO Y.Research progress on the flowering and fruit set of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge[J]. Chin Agric Sci Bull,2008,24(10):381-384.

[6] 李光勋,王力华,陈玮.分光光度法测定文冠果壳总皂苷含量研究[J].安徽农业科学,2008,36(8):3071-3072.LI G X, WANG L H,CHEN W.Determination on content of total saponins in the husks of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge based on spectrophotometry[J].J Anhui Agric Sci,2008,36(8):3071-3072.DOI: 10.3969/j.issn.0517-6611.2008.08.012.

[7] 李占林. 文冠果果壳化学成分及其生物活性研究[D]. 沈阳:沈阳药科大学, 2006.

[8] RAFALSKI A.Applications of single nucleotide polymorphisms in crop genetics[J].Curr Opin Plant Biol,2002,5(2):94-100. DOI: 10.1016/s1369-5266(02)00240-6.

[9] CHEN G,XIE Y M,ZHOU D,et al.*In vivo* evaluation and atom-based 3D-QSAR studies on saponins from shells of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge as anti-AD agents[J].Bioorg Chem,2020,94: 103412.DOI: 10.1016/j.bioorg.2019.103412.

[10] ZHANG H M,ZHOU Q C.Tyrosinase inhibitory effects and antioxidative activities of saponins from *Xanthoceras sorbifolia* nutshell [J].PLoS One,2013,8(8):e70090. DOI: 10.1371/journal.pone.0070090.

[11] KOUSAR F,NOOMRIO M H,TALPUR M M,et al.Two new lignan glycosides from *Trachelospermum lucidum* (D.Don) Schum [J].J Asian Nat Prod Res,2008,10(3/4):317-322.DOI: 10.1080/10286020701782692.

[12] DING K W,GUO S R,RONG W W,et al.A new oleanane type pentacyclic triterpenoid saponin from the husks of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge and its neuroprotection on PC12 cells injury induced by $A\beta_{25-35}$[J].Nat Prod Res,2020,34(22):3212-3218. DOI: 10.1080/14786419.2018.1557172.

[13] 周宸, 巩婷, 陈晶晶, 等.三萜皂苷生物合成相关糖基转移酶研究进展[J]. 生物工程学报, 2022, 38(3): 1004-1024. ZHOU C, GONG T, CHEN J J, et al. The glycosyltransferases involved in triterpenoid saponin biosynthesis: a review[J]. Chin J Biotech, 2022, 38(3): 1004-1024.

[14] 马利苹,王力华,阴黎明,等.乌丹地区文冠果生物学特性及物候观测[J].应用生态学报,2008,19(12):2583-2587.MA L P,WANG L H,YIN L M,et al.Biology and phenology of *Xanthoceras sorbifolia* in Wudan area[J].Chin J Appl Ecol,2008,19(12):2583-2587.

[15] 郭影,王世成,窦德强.不同产地文冠果果壳中总皂苷含量测定[J].辽宁中医药大学学报,2009,11(5):165-166.GUO Y, WANG S C,DOU D Q.Determination of the content of total saponins in the husks of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge[J].J Liaoning Univ Tradit Chin Med,2009,11(5):165-166.DOI: 10.13194/j.jlunivtcm.2009.05.167.guoy.108.

[16] 吴伟杰,李博生.泡沫分离法提取文冠果果皮皂苷的工艺条件[J].浙江农业科学,2010,51(4):816-820.WU W J,LI B S. Technological conditions of extracting saponins from *Xanthoceras sorbifolia* peel by foam separation[J].J Zhejiang Agric Sci,2010,51(4):816-820.DOI: 10.3969/j.issn.0528-9017.2010.04.043.

[17] 李兴旭,陈雯柏,王一群,等.基于级联视觉检测的樱桃番茄自动采收系统设计与试验[J].农业工程学报,2023,39(1):136-145.LI X X,CHEN W B,WANG Y Q,et al.Design and experiment of an automatic cherry tomato harvesting system based on cascade vision detection[J].Trans Chin Soc Agric Eng,2023,39(1):136-145.DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.202210099.

[18] 王藝锦. 辽宁省朝阳市日光温室种植结构与效益分析[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2019.

[19] SUN C W,WANG J W,DUAN J,et al.Association of fruit and seed traits of *Sapindus mukorossi* germplasm with environmental factors in Southern China[J].Forests,2017,8(12):491.DOI: 10.3390/f8120491.

[20] 王旭.文冠果性别分化关键期 microRNA 及矿质营养研究[D].北京:北京林业大学,2020.WANG X.MicroRNA and

mineral nutrition in the critical period of sex differentiation of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020. DOI: 10.26949/d.cnki.gblyu.2020.000855.

[21] 郑玉琳,刘济铭,史双龙,等.无患子果实成熟过程及其油脂、皂苷动态变化[J].南京林业大学学报(自然科学版),2021,45(4):76-82. ZHENG Y L, LIU J M, SHI S L, et al. Maturation processes and the dynamics of oil and saponin in *Sapindus mukorossi*[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2021, 45(4): 76-82. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202103047.

[22] 崔党群.Logistic 曲线方程的解析与拟合优度测验[J].数理统计与管理,2005,24(1):112-115. CUI D Q. Analysis and making good fitting degree test for Logistic curve regression equation[J]. Appl Stat Manag, 2005, 24(1): 112-115. DOI: 10.13860/j.cnki.sltj.2005.01.020.

[23] 徐圆圆,贾黎明,赵国春,等.无患子果实生长发育及其内含物的变化特征[J].西北植物学报,2022,42(12):2061-2072. XU Y Y, JIA L M, ZHAO G C, et al. Regularities of fruit growing and development and its inclusion of *Sapindus mukorossi*[J]. Acta Bot Boreali Occidentalia Sin, 2022, 42(12): 2061-2072. DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.2022.12.2061.

[24] KOCHAN E, SZYMANSKA G, SZYMCZYK P. Effect of sugar concentration on ginsenoside biosynthesis in hairy root cultures of *Panax quinquefolium* cultivated in shake flasks and nutrient sprinkle bioreactor[J]. Acta Physiol Plant, 2014, 36(3): 613-619. DOI: 10.1007/s11738-013-1439-y.

[25] LIU H J, GU H R, YE C, et al. Planting density affects *Panax notoginseng* growth and ginsenoside accumulation by balancing primary and secondary metabolism[J]. Front Plant Sci, 2021, 12: 628294. DOI: 10.3389/fpls.2021.628294.

[26] 徐圆圆,陈仲,贾黎明,等.植物三萜皂苷生物合成途径及调控机制研究进展[J].中国科学:生命科学,2021,51(5):525-555. XU Y Y, CHEN Z, JIA L M, et al. Advances in understanding of the biosynthetic pathway and regulatory mechanism of triterpenoid saponins in plants[J]. Sci Sin (Vitae), 2021, 51(5): 525-555. DOI: 10.1360/SSV-2020-0230.

[27] 熊绵靖,唐其,马小军.罗汉果三萜皂苷生物合成规律研究探讨[J].广东药学院学报,2011,27(5):543-548. XIONG M J, TANG Q, MA X J. Biosynthesis of triterpene glycoside in Lo Han Kuo[J]. J Guangdong Pharm Univ, 2011, 27(5): 543-548. DOI: 10.3969/j.issn.1006-8783.2011.05.027.

[28] EL ZEIN R, BRÉDA N, GÉRANT D, et al. Nitrogen sources for current-year shoot growth in 50-year-old sessile oak trees: an *in situ* (15)N labeling approach[J]. Tree Physiol, 2011, 31(12): 1390-1400. DOI: 10.1093/treephys/tpr118.

[29] 柴春山,芦娟,蔡国军,等.文冠果人工种群的果实发育与落花落果特性研究[J].植物研究,2012,32(1):110-114. CHAI C S, LU J, CAI G J, et al. Characteristics of fruit development and flower and fruit drops of artificial population of *Xanthoceras sorbifolia*[J]. Bull Bot Res, 2012, 32(1): 110-114.

[30] 刘波,王力华,阴黎明,等.两种林龄文冠果叶 N、P、K 的季节变化及再吸收特征[J].生态学杂志,2010,29(7):1270-1276. LIU B, WANG L H, YIN L M, et al. Seasonal variation and resorption characteristics of leaf N, P, and K in two aged *Xanthoceras sorbifolia* plantations[J]. Chin J Ecol, 2010, 29(7): 1270-1276. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2010.0217.

[31] 赵娜,张媛,王静,等.文冠果种子发育及油脂累积与糖类、蛋白质累积之间的关系研究[J].植物研究,2015,35(1):133-140,145. ZHAO N, ZHANG Y, WANG J, et al. Seed development, lipid accumulation and its relationship with carbohydrates and protein in *Xanthoceras sorbifolia* Bunge[J]. Bull Bot Res, 2015, 35(1): 133-140, 145. DOI: 10.7525/j.issn.1673-5102.2015.01.020.

(责任编辑　李燕文)