

网络出版时间:2022-04-20 11:43 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.10.006
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20220418.1008.007.html

油用型元宝枫果实发育过程中油脂积累动态研究

畅盼^{1,2}, 顾锡亭¹, 马建文¹, 樊金拴¹, 张博勇¹, 鲁仪增², 李伶俐¹

(1 西北农林科技大学 林学院, 国家林业和草原局元宝枫工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100;

2 山东省林草种质资源中心, 国家林业和草原局元宝枫工程技术研究中心, 暖温带林草种质资源保存与
利用国家林业和草原局重点实验室, 山东 济南 250102)

【摘要】【目的】研究油用型元宝枫果实形态特征及油脂积累的动态规律, 为元宝枫果实的适时采收及油用良种的选育提供科学依据。【方法】分别于 2019 和 2020 年 7—11 月, 以陕西杨凌地区优良元宝枫单株的翅果为试材, 通过物候期观测, 记录果实颜色和形态变化; 采用索氏提取法及 GC-MS 分析法分别进行油脂提取及种仁油脂脂肪酸组分与含量测定, 分析含油率及各脂肪酸含量的变化规律, 并对各成分进行相关性分析和主成分分析。【结果】元宝枫种子成熟期为开花后的 205~220 d, 此时种子形态肥厚而饱满, 呈亮黄色; 在此期间, 种仁含油率呈先增加后略微下降至稳定的变化趋势, 在花后 175 d 时含油率较高, 达 50% 以上。花后 145~160 d, 脂肪酸总量达到最大值; 神经酸相对含量表现为先增加后稳定不变的趋势, 在花后 190 d 神经酸相对含量可达最高值, 为 6.24%, 因此确定元宝枫果实高神经酸含量的适时采收期在花后 190~205 d。在元宝枫果实各脂肪酸的积累过程中, 彼此间表现出一定相关性, 其中神经酸含量与种仁含油率以及芥酸含量呈极显著正相关。【结论】元宝枫果实于花后 205 d 左右采收, 其含油率和神经酸含量均较高, 品质最优; 可通过选育高含油量的元宝枫种质来获取高神经酸含量的元宝枫油, 以提高元宝枫果实的利用价值。

【关键词】 元宝枫; 果实发育; 油脂积累; 脂肪酸; 神经酸

【中图分类号】 S792.35

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2022)10-0057-11

Dynamics of oil and fatty acid accumulation during fruit development of *Acer truncatum* Bunge used for oil

CHANG Pan^{1,2}, GU Xiting¹, MA Jianwen¹, FAN Jinshuan¹,
ZHANG Boyong¹, LU Yizeng², LI Lingli¹

(1 College of Forestry, Northwest A&F University, Shantung Maple Engineering and Technology Research Center of National Forestry and Grassland Administration, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Shandong Provincial Center of Forest and Grass Germplasm Resources, Shantung Maple Engineering and Technology Research Center of National Forestry and Grassland Administration, Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration Conservation and Utilization of Warm Temperate Zone Forest and Grass Germplasm Resources, Jinan, Shandong 250102, China)

Abstract:【Objective】To provide scientific basis for timely harvest of fruit and breeding improved varieties of *Acer truncatum*, the fruit morphological characteristics and accumulation of oil during fruit development were studied.【Method】From July to November in 2019 and 2020, the changes of color and morphology of fruits from individual *A. truncatum* in Yangling, Shaanxi were recorded by phenological observation.

【收稿日期】 2021-11-15

【基金项目】 陕西省技术创新引导专项(2020QFY10-01); 西北农林科技大学试验示范站(基地)科技创新与成果转化项目(TG-ZX2020-37); 山东省农业良种工程项目(2020LZGC00903); 中央财政林业改革发展资金项目(鲁[2020]TG01号); 科技创新合作项(2020KJCX01)

【作者简介】 畅盼(1995—), 女, 山西运城人, 硕士, 主要从事经济林资源利用研究。E-mail: changpanNWAFU@163.com

【通信作者】 李伶俐(1985—), 女, 山东聊城人, 讲师, 博士, 硕士生导师, 主要从事经济林果实发育与品质调控研究。
E-mail: lilingleiabc@163.com

The Soxhlet extraction method and GC-MS analysis were used to extract seed oil and analyze content and composition of fatty acids. Correlation and principal component analysis were also conducted for all components. 【Result】 The seeds matured during 205—220 days after flowering. At this time, *A. truncatum* seeds were thick with color of full bright yellow. The oil content of kernel increased firstly and then decreased slightly to a stable level. The highest oil content was more than 50% at 175 days after flowering. The total amount of fatty acids reached the maximum at 145—160 days after flowering. The relative content of nervonic acid increased firstly and then remained stable with the highest content was 6.24% at 190 days after flowering. The harvest time of *A. truncatum* with high content of nervonic acid was determined to be 190—205 days after flowering. During the accumulation of fatty acids in *A. truncatum* fruit showed certain correlation with each other. Among them, the relative content of nervonic acid was extremely positively correlated with the oil content of kernel and the relative content of evucic acid. 【Conclusion】 The best *A. truncatum* fruits with high oil and nervonic acid contents can be obtained about 205 days after flowering. The *A. truncatum* with high oil content can be selected to obtain high content of nervonic acid and improve utilization value of *A. truncatum* fruit.

Key words: *Acer truncatum*; fruit development; oil accumulation; fatty acid; nervonic acid

元宝枫 (*Acer truncatum* Bunge) 属无患子目 (Sapindales) 槭树科 (Aceraceae) 槭属 (*Acer* L.) 落叶乔木, 其翅果外形因与金元宝相似而得名^[1]。天然元宝枫广泛分布于我国黄河流域、东北地区及北京、江苏和安徽等地, 为中国特有的园林绿化和新型经济林树种^[2]。成年元宝枫树高可达 8~10 m, 树冠高大, 呈现阔圆形或卵形, 树皮褐色纵裂, 枝斜上伸展^[3]。叶掌状 5 裂而对生, 基部截形; 花 1 cm 大小, 黄绿, 于 3—5 月开放; 其翅果呈淡绿色, 成熟果实呈淡黄或淡褐色, 果实成熟期在 9—10 月^[4]。种仁富含油脂、蛋白质、维生素、单宁等多种营养成分^[5], 含油率高达 48%^[6]; 种仁油脂中含有特殊功能性脂肪酸, 即神经酸, 是大脑神经细胞的关键成分, 可以预防和治疗神经系统紊乱及神经退行性疾病, 其相对含量在 5% 以上^[7-9]。目前, 元宝枫油已成为神经酸的一种新资源食品^[10], 2011 年 3 月 22 日元宝枫籽油也获批为国家新资源食品^[11]。当前对元宝枫油的研究多集中在种仁油含量、脂肪酸组成^[12-13]及提取工艺^[14-16]等方面, 对翅果油脂及脂肪酸组分含量亦有研究^[17-18], 而对其花后不同果实发育时期元宝枫种仁出油率和神经酸含量的变化规律等研究还不够深入。

本研究针对先前筛选出的高含油率油用型元宝枫优株^[19], 通过对其进行为期 2 年的表型观测, 记录花后不同时期内的果实颜色及其形态变化, 分析探究种仁含油率、总脂肪酸和主要脂肪酸相对含量的变化规律, 并对各组分进行相关性分析及主成分分析, 旨在通过对元宝枫油用单株油脂水平的动态

观测, 确定果实最佳采收时期, 并为元宝枫高油产量、高神经酸品种选育及其生产实践提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

油用型元宝枫优良单株位于陕西省杨凌区西北农林科技大学校园内。该区地理位置为 108°05' E, 34°25' N; 海拔 520 m, 年均温 12.9 °C, 年降水量 649.5 mm, 无霜期 211 d, 年均日照时数 2 163.8 h。该元宝枫优良单株结实量大、种子油脂含量高, 树龄约 60 年, 树高约 10 m, 胸径约 25 cm, 长势优良 (图 1)。于 2019 和 2020 年 7—11 月, 采集花后不同时间的元宝枫翅果作为供试材料。采种后将元宝枫翅果密封包装于锡箔纸内, 带回实验室后洗净于阴凉通风处阴干待用。依据国家气象网, 得到观测年份各月气象数据如表 1 所示。

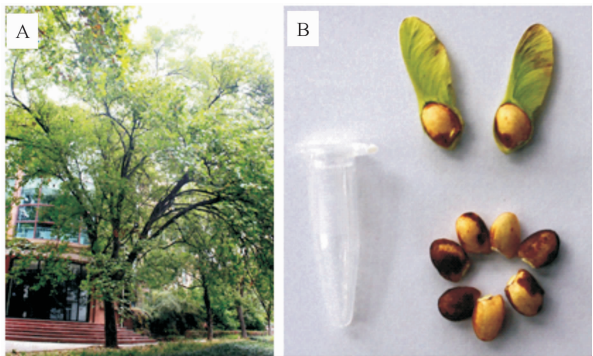


图 1 供试油用型元宝枫优株的树型(A)和种子(B)
Fig. 1 Phenotypes (A) and seeds (B) of excellent single plant of *A. truncatum*

表 1 2019 和 2020 年采样地各月份的气象概况

Table 1 Monthly meteorological profiles of collection sites in 2019 and 2020

月份 Month	年份 Year	气温/℃ Atmospheric temperature	辐射温度/℃ Radiation temperature	日照时数/h Sunshine hours	降水量/mm Precipitation	相对湿度/% Relative humidity	长波辐射净强度/ (W·m ⁻²) Net intensity of long wave radiation	短波辐射净强度/ (W·m ⁻²) Net intensity of short wave radiation
1	2019	2.68	1.18	88.19	8.09	55.62	−75.70	100.72
	2020	3.18	2.25	78.99	4.81	71.63	−64.32	91.02
2	2019	4.55	4.46	102.26	12.81	59.22	−73.90	130.15
	2020	7.91	7.34	112.84	7.76	58.48	−83.02	138.66
3	2019	12.33	11.85	141.50	11.83	45.35	−85.35	163.03
	2020	12.65	12.57	147.00	18.06	53.26	−85.11	169.38
4	2019	18.85	18.75	167.77	56.26	55.46	−84.19	198.24
	2020	16.67	15.85	172.04	18.20	43.94	−87.71	203.27
5	2019	20.79	21.05	183.75	53.94	53.49	−74.81	210.65
	2020	23.30	23.63	200.37	86.26	45.94	−88.80	229.70
6	2019	25.48	26.06	172.17	123.20	58.86	−65.29	203.52
	2020	25.58	6.11	178.55	115.77	60.12	−65.20	211.03
7	2019	27.70	28.55	207.06	79.69	56.85	−72.70	235.54
	2020	26.45	27.03	189.04	25.25	65.58	−61.27	215.06
8	2019	27.37	27.72	188.48	106.96	61.29	−63.95	215.02
	2020	26.63	26.13	173.26	204.70	72.96	−49.13	197.70
9	2019	21.67	21.80	137.20	103.22	71.25	−59.73	163.38
	2020	22.15	21.17	141.80	52.35	64.45	−61.46	168.73
10	2019	16.15	15.92	105.85	128.94	71.22	−57.40	123.77
	2020	14.66	15.12	110.00	65.13	70.77	−59.43	128.62
11	2019	10.67	10.28	93.25	22.82	68.88	−70.49	112.83
	2020	10.20	9.96	91.37	12.75	67.40	−68.16	110.56
12	2019	6.07	4.81	89.61	3.18	57.00	−82.67	103.80
	2020	2.32	1.41	75.95	13.03	63.42	−68.21	87.90

1.2 主要仪器与试剂

主要仪器有:电热恒温鼓风干燥箱(DHG-9023A),上海申贤恒温设备厂;电子天平(BSM-120.4),上海卓精电子科技有限公司;电热恒温水浴锅(HH-2A),北京科伟永兴仪器有限公司;索式提取器,苏州市天威仪器有限公司;旋转蒸发仪(R206),上海申生科技有限公司;气相色谱/质谱联用仪(TRACE 1310 & ISQLT),美国赛默飞世尔科技有限公司;移液枪(TERCH),北京拓川科研设备股份有限公司。

主要试剂有:石油醚(沸程 60~90 ℃,分析纯),正庚烷(色谱纯),氢氧化钾(色谱纯)和甲醇(色谱纯)。

1.3 试验样品的采集及预处理

物候期观察发现,2019 和 2020 年采样地元宝枫优株的开花时间为当年 3 月中旬,故 2019 年和 2020 年采样时间选择在 7—11 月,即元宝枫开花后的 115,130,145,160,175,190,205,220 和 235 d,每次从供试树的东、西、南、北 4 个方向的上、中、下不同位置,随机采集不同成熟期的元宝枫翅果,各时期样本重复 3 次,作为研究元宝枫优株花后不同时期种仁油成分变化的试验材料。

完成翅果材料的采集后,进行人工去翅和去种

皮处理,最后将得到的种仁研磨粉碎,过孔径 0.600 mm(30 目)筛后,于 60 ℃烘箱中烘至质量恒定备用。在种仁预处理前,挑选各时期具代表性的种仁,按花后不同采摘时间排列好,并记录种子颜色及形态变化,依据形态与颜色指标判定种子成熟度,并比较不同时期元宝枫种仁颜色及形态的差异。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 种仁油提取及含油率 本试验采用索氏提取法对元宝枫种仁油进行提取。首先,准确称取事先烘至恒质量的元宝枫种仁粉 5 g,记作 M_1 ;然后,将其加入提前编号的滤纸筒中,封口后准确称量种仁粉及滤纸筒总质量,记作 M_2 ;再将封口后的滤纸筒放入索氏提取筒内,并加入适量的石油醚进行抽提。在 80 ℃水浴中回流 6~8 h,待油脂完全浸出后,利用旋转蒸发仪将所得的混合液于 40 ℃下旋蒸约 30 min,回收石油醚;之后将剩余溶液置于 50 ℃烘箱内烘干,此时得到的黄色油状产物即为元宝枫种仁油。

将所得油脂置通风处约 15 min 后,再将其转入离心管中,并于 4 ℃冰箱内避光保存。最后,准确称量抽提后的滤纸筒及残渣粉总质量,记作 M_3 。元宝枫种仁含油率的计算公式为:

含油率(x)= $(M_2 - M_3) / M_1 \times 100\%$ 。(1)

1.4.2 脂肪酸组分及相对含量 将上述所得油脂先进行甲酯化处理,然后利用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)对油脂进行脂肪酸成分及相对含量的测定。具体操作如下:

(1)甲酯化处理。取 1 mL 元宝枫种仁油置于 10 mL 离心管中,加入 2 mL 正庚烷,混匀;再加入 2 mL 质量分数 0.5% 的 KOH-CH₃OH 溶液,加塞振荡;然后于 40 ℃ 水浴 10 min,静置,待出现分层现象后,用注射器吸取其上清液;将上清液稀释 50 倍后(具体稀释倍数根据仪器所测定的质量浓度要求确定),经 0.22 μm 微孔有机滤膜过滤至进样瓶,然后进行 GC-MS 分析。

(2)GC-MS 分析。色谱柱选用 TG-WAXMS (30 m×0.25 mm×0.25 μm)毛细管柱。高纯氦气(99.999%)作载气,炉内温度为 50~350 ℃。柱温箱升温过程:开始温度 80 ℃,持续 1 min;第一阶段 50 ℃/min,升温达到 175 ℃后,持续 1 min;第二阶段 5 ℃/min,升温至 200 ℃后,持续 1 min;第三阶段 2 ℃/min,升温达到 210 ℃后,持续 1 min;第四阶段 5 ℃/min 升温至 240 ℃后,持续 5 min。控制

柱流量为 1 mL/min,进样量为 1 μL,分流进样方式选择 20:1;进样口温度及 GC/MS 接口温度均保持在 250 ℃。质谱条件:传输线温度 250 ℃,离子源温度设置为 280 ℃,离子源为 EI,电离电压 70 eV,扫描范围控制为 40~460 aum。使用 Xcalibur 系统进行数据处理,之后根据 Test Report 采用峰面积归一化法分析种仁脂肪酸成分及其相对含量。

1.5 数据处理

采用 Excel 2016 和 SAS 8.0 软件对数据进行整理及统计分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验各时期元宝枫种仁含油率及脂肪酸相对含量间的差异显著性,显著性水平 α=0.05。

2 结果与分析

2.1 元宝枫果实发育动态观测

在开花后 100 d 左右(7 月份),元宝枫翅果大小已基本定形,果皮外部形态也已完成生长。花后 115~235 d 种皮、种仁颜色及形态的变化如图 2 所示。



A. 元宝枫干燥种子;B1、B2. 2019 和 2020 年元宝枫干燥种仁。右下角线段为 1 cm 比例尺
A. *A. truncatum* dry seeds;B1,B2. Dry kernels of *A. truncatum* in 2019 and 2020. The line at lower right corner is 1 cm scale
图 2 2019 和 2020 年花后 115~235 d 元宝枫种子的生长动态

Fig. 2 Seed growth of *A. truncatum* 115–235 d after flowering in 2019 and 2020

由图 2 可见,花后 115~130 d(7 月),干燥状态下的元宝枫种子整体瘪平而薄小,种皮呈黑褐色,种仁呈黄绿色,种皮及种仁表面均有明显的纵向皱缩。花后 145~160 d(8 月),种子逐渐生长膨大,种皮逐渐褪去深色而呈褐色,种仁黄绿色变浅,且两者表面均渐显平整光滑。花后 175~190 d(9 月),种子肥厚且饱满,种皮表面光滑无皱缩,外形扁平呈淡褐色,种仁逐渐褪绿转黄。花后 205~220 d(10 月),种仁变为亮黄色,直至完全变为黄色,达到生理成熟

状态后其颜色和外部形态再无明显变化;种皮褐色渐暗,之后整体外形轮廓因营养物质的消耗而略微变小。花后 235 d(11 月上旬),种皮颜色变为暗褐色,可能因种子成熟后受外界环境刺激发生了氧化变色,而种仁始终保持为亮黄色。在整个翅果的成熟过程中,其外形经历了明显的膨大增厚过程,表明其内含物逐渐增多;种皮、种仁外部颜色也相应地发生了显著性变化,且种子成熟时种皮完全变为褐色,种仁表现为亮黄色,可作为元宝枫种子生理成熟的

显著颜色形态标志。观察图 2 种仁的变化并进行对比后可以发现,2019 与 2020 年花后 115~145 d,干燥种仁的外部形态及显色方面存在一定差异,而在后期生长发育过程中种仁颜色及形态变化又趋于一致,这种差异可能是由于这 2 年 7—8 月上旬不同的气候环境(如气温、降水量、日照时数^[20]、短波辐射强度^[21]等)所致。

2.2 元宝枫果实发育过程中种仁含油率的变化

2019 和 2020 年元宝枫优树果实成熟过程中种仁含油率的变化如图 3 所示。由图 3 可知,2 年内元宝枫种仁含油率的变化趋势整体较为一致。花后 115 d 时,2 年的含油率均为最低,但 2019 年为 26.79%,明显高于 2020 年的 18.10%。花后 115~175 d,2 年的种仁含油率整体均持续增加;在此期间,随着花期的延续,约在开花 125 d 之后,2020 年

含油率便高于 2019 年同时期的含油率,2019 年含油率在花后 130~145 d 无明显变化;直到花后 175 d 时,2 年的含油率均增至最大值 50% 以上。此后,2 年的种仁含油率均略微下降,至花后 205 d 为 48% 左右,此后含油率基本保持稳定。

整体来看,2 年间种仁含油率均先快速积累后略微下降至最后保持稳定,其最大值均出现在花后的 175 d(9 月初)。因此,就杨凌产地元宝枫优株而言,种仁含油率较高的时期出现在开花后的 175~235 d,即每年的 9 月初至 11 月初。同时结合前面种仁颜色形态变化的观测结果,种仁含油率高峰值在花后 175 d,此时种仁尚未完全成熟;而在开花 205 d 后的成熟期内,种仁含油率反而有所下降。这表明在元宝枫种子的发育过程中,部分油脂会转化为其他营养物质来供果实生长成熟。

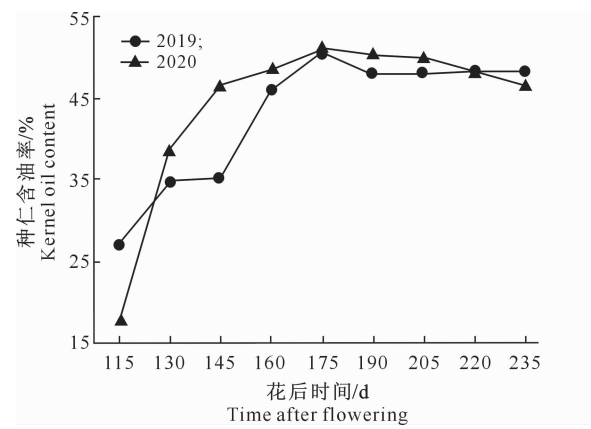


图 3 2019 和 2020 年元宝枫果实发育过程中种仁含油率的变化

Fig. 3 Changes of kernel oil content during fruit development of *A. truncatum* in 2019 and 2020

2.3 元宝枫果实发育过程中种仁油总脂肪酸相对含量的变化

元宝枫翅果成熟过程中种仁油中总脂肪酸相对含量的变化趋势如图 4 所示。花后 115 d 时因所提取的种仁油脂含量未达到脂肪酸测定要求的最少提取量,所以对此时期种仁油的脂肪酸成分未进行测定。由图 4 可知,在 2019 和 2020 年花后 130~235 d,元宝枫种仁油中的总脂肪酸相对含量整体呈先增加后减少的变化趋势。

比较 2019 和 2020 年元宝枫种仁油总脂肪酸相对含量的变化趋势可知,2019 年整体变化较为平稳,在花后 130 d 后,总脂肪酸相对含量增长迅速,于花后 145 d 左右达到峰值 96.86%,之后整体呈下降趋势,至花后 235 d 降至最低值 94.68%。2020 年整体变化趋势较大,花后 130~160 d 为快速增长

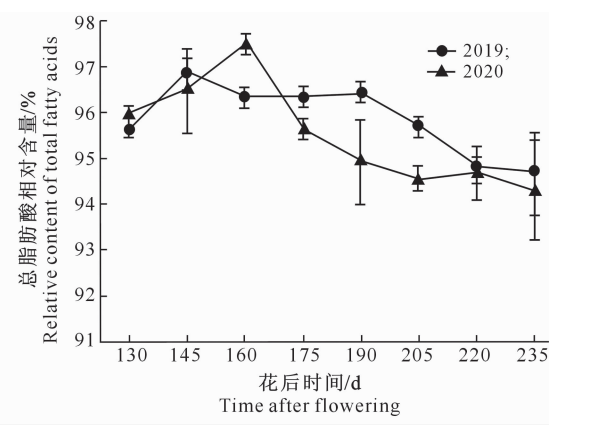


图 4 2019 和 2020 年元宝枫果实发育过程中种仁油总脂肪酸相对含量的变化

Fig. 4 Changes of relative content of total fatty acids during fruit development of *A. truncatum* in 2019 and 2020

期,开始时总脂肪酸相对含量在 95.80% 以上,花后 160 d 左右达最大,为 97.52%。160 d 之后又开始快速下降,至花后 205 d 后稳定在 94.50% 左右。可见,元宝枫翅果发育过程中脂肪酸总量的最大值出现在花后 145~160 d,且在开花 220 d 之后,总脂肪酸相对含量均稳定在 95.00% 左右,说明供试元宝枫种仁油脂脂肪酸含量在成熟后期较未成熟时低,极有可能是因在成熟后期的 10 月下旬至 11 月,元宝枫叶片开始变色致使其光合作用减弱,而植物成熟时蛋白质等贮藏物的合成需要消耗部分脂肪酸所致。

2.4 元宝枫果实发育过程中种仁油主要脂肪酸含量的变化

GC-MS 分析表明,在优株元宝枫种仁油中共检测出 14 种脂肪酸,分别为棕榈酸(C16:0)、十六碳

烯酸(C16：1)、十七酸(C17：0)、硬脂酸(C18：0)、油酸(C18：1)、亚油酸(C18：2)、亚麻酸(C18：3)、花生酸(C20：0)、顺式-11-二十碳烯酸(C20：1)、顺式-11,14-二十碳二烯酸(C20：2)、山嵛酸(C22：0)、芥酸(C22：1)、木蜡酸(C24：0)、神经酸(C24：1)。分析其中相对含量高于 1.00% 的 8 种主要脂

肪酸(棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸、顺式-11-二十碳烯酸、芥酸、神经酸)在 2019 和 2020 年花后 130~235 d 的变化,结果如表 2 所示。由表 2 可见,元宝枫果实发育过程中种仁油主要脂肪酸相对含量的变化规律不尽相同。

表 2 2019 和 2020 年元宝枫果实发育过程中种仁油 8 种主要脂肪酸相对含量的变化

Table 2 Changes of relative contents of 8 main fatty acids in kernel oil during fruit development of <i>A. truncatum</i> in 2019 and 2020									%
花后时间/d Day after flowering	油酸 Oleic acid		亚油酸 Linoleic acid		棕榈酸 Palmitic acid		顺式-11-二十碳烯酸 <i>Cis</i> -11-eicosenoic acid		
	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	
130	24.42±0.63 c	24.39±0.06 b	29.85±0.72 a	30.33±0.58 a	7.16±0.01 a	5.29±0.12 a	9.36±0.21 d	8.97±0.01 a	
145	27.37±0.28 a	26.09±0.24 a	27.36±0.10 c	28.71±1.26 a	6.21±0.01 b	4.89±0.09 b	10.33±0.11 a	9.22±0.87 a	
160	25.59±0.03 b	24.69±0.12 b	26.19±0.13 d	27.71±0.31 a	5.29±0.03 c	4.49±0.04 cd	10.45±0.03 a	9.68±0.02 a	
175	23.10±0.18 d	23.32±0.04 c	27.11±0.33 c	28.06±0.19 a	4.92±0.04 d	4.31±0.04 de	10.06±0.02 b	9.59±0.00 a	
190	21.70±0.10 e	22.22±0.49 d	27.47±0.28 c	27.34±1.28 a	4.86±0.01 d	4.34±0.02 de	9.67±0.05 c	9.12±0.21 a	
205	20.91±0.01 fg	21.87±0.08 d	28.71±0.04 b	28.43±0.01 a	4.65±0.01 ef	4.27±0.03 e	9.13±0.07 de	9.11±0.12 a	
220	20.57±0.08 g	22.18±0.11 d	28.49±0.19 b	27.82±0.54 a	4.52±0.03 f	4.59±0.20 c	9.11±0.01 e	9.22±0.04 a	
235	21.32±0.21 ef	22.91±1.56 c	28.66±0.08 b	27.88±1.76 a	4.75±0.23 de	4.66±0.32 c	8.96±0.16 e	8.58±0.51 a	

花后时间/d Day after flowering	硬脂酸 Stearic acid		亚麻酸 Linolenic acid		神经酸 Nervonic acid		芥酸 Erucic acid		
	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	
130	2.25±0.01 e	2.45±0.10 a	1.84±0.09 d	1.65±0.01 c	4.57±0.23 d	4.74±0.04 b	14.94±0.49 e	15.92±0.22 a	
145	2.32±0.02 e	2.63±0.09 a	1.52±0.00 e	1.55±0.06 d	4.61±0.12 d	4.63±0.95 b	15.96±0.51 d	15.53±2.04 a	
160	2.50±0.02 d	2.53±0.03 a	1.57±0.01 e	1.69±0.00 c	5.06±0.01 c	5.91±0.26 a	17.86±0.04 c	18.38±0.32 a	
175	2.63±0.04 cd	2.54±0.06 a	1.91±0.00 d	1.66±0.01 c	5.72±0.15 b	6.04±0.00 a	18.82±0.03 ab	17.95±0.06 a	
190	2.81±0.04 b	2.69±0.03 a	2.21±0.04 c	1.86±0.06 b	6.24±0.08 a	5.86±0.01 a	19.37±0.04 a	17.43±0.28 a	
205	3.02±0.04 a	2.69±0.06 a	2.35±0.02 b	2.03±0.02 a	6.08±0.02 a	6.11±0.06 a	18.76±0.01 b	17.72±0.04 a	
220	2.83±0.02 b	2.71±0.22 a	2.45±0.01 a	2.07±0.06 a	6.04±0.04 a	6.03±0.21 a	18.79±0.05 ab	17.63±0.41 a	
235	2.69±0.16 bc	2.57±0.35 a	2.44±0.06 ab	2.02±0.04 a	5.76±0.07 b	5.85±0.13 a	18.45±0.08 b	17.41±0.77 a	

注:同列数据后标不同小写字母表示差异显著($P\leq 0.05$),下同。
Note:Different lowerese letters after the datas in the same column indicated significant difference($P\leq 0.05$). The same below.

表 2 显示,在 2019 和 2020 年花后 130~235 d,元宝枫种仁油中亚油酸的相对含量始终高于油酸,油酸呈现先上升后下降最后趋于稳定的变化趋势,其相对含量为 20.57%~27.37%;亚油酸相对含量的变化趋势与油酸相反,属于先下降后上升最后趋于不变,2 年间相对含量为 26.19%~30.33%。另外还发现,2 年之中元宝枫果实发育同时期油酸和亚油酸相对含量的总和均接近 51.00%,这证实油酸和亚油酸之间存在着相互转化过程。棕榈酸相对含量在花后 130~175 d 一直呈下降趋势,之后趋于稳定后又呈现略微上升,花后 205 d 左右达最低值 4.27%。顺式-11-二十碳烯酸的相对含量在整个花后不同时期均处于 8.58%~10.45%,表现比较稳定。

由表 2 还可知,硬脂酸相对含量在果实发育过

程中有所升高,但总体表现较为稳定。亚麻酸相对含量在 2019 和 2020 年的整个发育时期均表现为先下降后缓慢上升最后趋于稳定的趋势。种仁油中神经酸相对含量的变化趋势在 2 年间基本同步,均表现为先持续增加后逐渐稳定的趋势,在 2019 和 2020 年花后 130 d 时分别仅为 4.57%和 4.74%,2019 年的最大值出现在花后 190 d,为 6.24%;而 2020 年的最大值出现在花后 205 d,为 6.11%。在花后 190 d 至果实自然脱落,神经酸相对含量始终保持在较高水平并维持稳定,说明在这 2 年内供试元宝枫果实种仁神经酸的合成几乎未受到外部环境变化的影响。元宝枫果实种仁油中芥酸的相对含量在 2 年内的变化规律与神经酸类似,2 年变化趋势也基本同步。在整个种仁成熟期芥酸的动态变化过程中,前期处于最低值 15%左右,伴随种子的生长

不断积累,后期稳定在 18% 上下。约在花后 165 d, 2019 年元宝枫种仁油中芥酸的相对含量一直较 2020 年相同时期高。

总体来看,上述各主要脂肪酸的相对含量在 2 年内的变化均较为平稳,且 2 年之间同一脂肪酸成分的变化基本趋于同步。说明在元宝枫种仁发育过程中,各脂肪酸年内动态变化差异不大,并均处于持续积累中。

2.5 元宝枫果实发育过程中种仁油及主要脂肪酸的相关性及主成分分析

对元宝枫优株果实发育过程中种仁含油率和各脂肪酸组分进行相关性分析,以深入了解种仁中各脂肪酸组分的变化规律,结果见表 3。由表 3 可知,种仁含油率与大多数脂肪酸间相关性密切。其中与棕榈酸相对含量呈极显著负相关,相关系数为-0.902,与油酸呈显著负相关,相关系数为-0.587;与硬脂酸、芥酸、神经酸呈极显著正相关,相关系数分别为 0.701,0.755 和 0.810。由此可见,对元宝枫树种来说,在种仁含油率较高的时期,

其神经酸、芥酸、硬脂酸相对含量也相应较高,而棕榈酸和油酸转化为其他脂肪酸的比例也较高。棕榈酸与硬脂酸、芥酸、神经酸呈极显著负相关,相关系数分别为-0.709,-0.670 和-0.782;与油酸呈显著正相关,相关系数为 0.556。硬脂酸与油酸呈极显著负相关,相关性系数为-0.782;与亚麻酸、芥酸、神经酸呈极显著正相关,相关性系数分别为 0.732,0.727 和 0.739。油酸与亚油酸呈不显著负相关,与亚麻酸、芥酸及神经酸呈极显著负相关,相关系数分别为-0.906,-0.678 和-0.816;与二十碳烯酸呈显著正相关,相关性系数为 0.558。亚油酸、亚麻酸与二十碳烯酸均呈显著负相关,相关性系数分别为-0.622 和-0.498。亚麻酸与芥酸呈显著正相关,与神经酸呈极显著正相关,相关性系数分别为 0.615 和 0.654。芥酸与神经酸呈极显著正相关,相关系数为 0.865,这一结果解释了前述芥酸与神经酸相对含量变化趋势高度一致的现象,在神经酸生物合成途径以及文冠果油的脂肪酸组成分析中也有一致的结果^[22-23]。

表 3 元宝枫果实发育过程中种仁含油率和各脂肪酸的相关性
Table 3 Correlation between oil content and fatty acids during fruit development of *A. truncatum*

指标 Index	含油率 Oil content	棕榈酸 Palmitic acid	硬脂酸 Stearic acid	油酸 Oleic acid	亚油酸 Linoleic acid	亚麻酸 Linolenic acid	二十碳烯酸 Eicosenoic acid	芥酸 Erucic acid	神经酸 Nervonic acid
含油率 Oil content	1								
棕榈酸 Palmitic acid	-0.902 **	1							
硬脂酸 Stearic acid	0.701 **	-0.709 **	1						
油酸 Oleic acid	-0.587 *	0.556 *	-0.782 **	1					
亚油酸 Linoleic acid	-0.432	0.277	-0.115	-0.116	1				
亚麻酸 Linolenic acid	0.368	-0.335	0.732 **	-0.906 **	0.144	1			
二十碳烯酸 Eicosenoic acid	-0.166	0.334	-0.346	0.558 *	-0.622 *	-0.498 *	1		
芥酸 Erucic acid	0.755 **	-0.670 **	0.727 **	-0.678 **	-0.481	0.615 *	0.064	1	
神经酸 Nervonic acid	0.810 **	-0.782 **	0.739 **	-0.816 **	-0.299	0.654 **	-0.272	0.865 **	1

注: * 表示 $P<0.05$ 水平相关性显著; ** 表示在 $P<0.01$ 水平相关性显著。
Note: * indicates significant correlation at the level of $P<0.05$; ** indicates significant correlation at the level of $P<0.01$.

为更好地了解脂肪酸各组分间的关系,在相关性分析的基础上进行了主成分分析。以 2 年间 7—11 月元宝枫花后 130~235 d 8 个采样期的油脂含量为指标进行分析,结果如表 4 所示。表 4 结果表明,根据第 1 主成分,各成分含量可分为 3 大类,第 1 类为第 1 主成分中的正向决定因素,包括棕榈酸、硬脂酸、亚麻酸、顺式-11-二十碳烯酸、神经酸;第 2

类为油酸、亚油酸、芥酸;第 3 类只包括含油率。根据第 2 主成分,将 9 个指标分为 3 大类:第 1 类为油酸、亚油酸;第 2 类包括棕榈酸、硬脂酸、亚麻酸、顺式-11-二十碳烯酸、神经酸、芥酸;第 3 类是含油率。主成分 1 的贡献率为 98.710%,主成分 2 的贡献率为 1.099%,二者的累积贡献率为 99.809%。图 5 更加直观地表现了脂肪酸各组分间的分组情况,其中

第 1 主成分是最主要的,并且主成分 1 和 2 区分开了各脂肪酸组分的不同,由于油酸与亚油酸被归在一

起,证明了两种脂肪酸相对含量之间高度相关。

表 4 元宝枫果实发育过程中种仁含油率和各脂肪酸的主成分分析

指标 Index	主成分 Principal component		指标 Index	主成分 Principal component	
	1	2		1	2
含油率 Oil content	−8.179	0.628	顺式-11-二十碳烯酸 Cis-11-eicosenoic acid	1.633	−0.040
棕榈酸 Palmitic acid	2.821	−0.098	芥酸 Erucic acid	−0.539	0.128
硬脂酸 Stearic acid	3.464	0.198	神经酸 Nervonic acid	2.674	0.244
油酸 Oleic acid	−2.116	−0.734	贡献率/% Contribution rate	98.710	1.099
亚油酸 Linoleic acid	−3.406	−0.546	累积贡献率/% Cumulative contribution rate	98.710	99.809
亚麻酸 Linolenic acid	3.648	0.219			

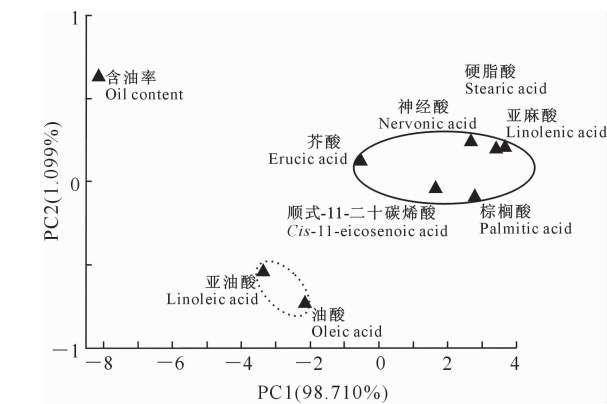


图 5 前两主成分组成的二维空间中含油率和各脂肪酸的分布情况

Fig. 5 Distribution of oil content and fatty acids in two-dimensional space composed of the first two principal components

3 讨论

3.1 元宝枫优株果实发育过程中种仁颜色和形态的变化

果实发育过程中伴随着种子形态和颜色的变化,因此可通过观察种子颜色和形态来初步判断种子的成熟阶段^[24]。本研究对元宝枫果实发育过程中干燥状态下种子发育动态的观测表明,种子生长过程中种皮及种仁的颜色形态可以作为种子成熟状况的判断标准,这与王瑶^[25]的研究结果一致,且花后不同时间种皮、种仁的外部形态变化状态与刘晓玲等^[26-27]的研究结果也基本相符,均是在花后205~220 d(即 10 月份)种子成长臻于成熟。因年份间气候、环境等的不同,导致年际间种仁发育前期的颜色可能存在差异,同时也表明,不同年份之间元宝枫果实发育过程中种子形态变化基本一致,且皆在 10 月份进入成熟期。因此,元宝枫开花后 205 d(10 月份)可作为成熟果实的最佳采收时间。

3.2 元宝枫果实发育过程中种仁含油率的差异

在元宝枫果实发育过程中,种仁出油率的变化趋势与先前杨凌地区元宝枫油脂含量的测定结果^[17,25]有所不同,即翅果成熟过程中种仁最大相对含油率均出现在 10 月底,11 月时略微下降,与本研究的杨凌地区元宝枫种仁含油率峰值在花后 175 d(9 月初)的时间相比推迟了近 40 d,分析其原因可能是因为供试材料品系的不同以及不同采集年份实时气候条件的差异,如气温、降水量、日照时数^[20]、短波辐射强度^[21]等不同所致。相同的是种仁出油率均于 10 月底基本稳定在最高值附近,在后期的 11 月略有下降,该结果也被代彦满等^[18]的研究结果所证实。据刘晓玲^[27]报道,产于北京的元宝枫果实发育过程中种仁含油率的最大值出现在花后 192 d(按当地开花时间换算日期后为 10 月 10 日左右),本研究与其相比提前了 17 d。而呼晓姝^[28]的研究表明,北京顺义地区元宝枫种仁含油率的高峰值出现在 10 月底。这些结果也说明,元宝枫因产地、品系、遗传背景以及地理位置的不同,果实发育过程中种仁出油率变化规律也不尽相同,表明若依据最高出油率来确定不同地区元宝枫单株翅果的最佳采收时间,则需要按地区并依据立地条件及品质株系的不同进行特定研究,从而得出针对性的采收规律以指导当地元宝枫产业的发展。

3.3 元宝枫果实发育过程中种仁油总脂肪酸含量的差异

前人对元宝枫种仁油中饱和脂肪酸、不饱和脂肪酸变化的研究较多^[29-32],而对总脂肪酸变化趋势的分析较少。在本研究中,随着元宝枫果实的生长发育,其种仁总脂肪酸的相对含量整体呈先增加后减少的趋势,与代彦满等^[18]的研究结果相似,所不同的是本研究中的总脂肪酸相对含量无 S 型模式的第一阶段,即缓慢增长期。这可能是因为本研究的

元宝枫开花较早^[33],使得营养物质转化为脂肪酸的过程加快且缩短,直接表现为快速增长期;之后又遇上秋天叶片颜色变化,导致植物光合作用制造的有机物减少,加之植物自身蛋白质等物质的合成也会使脂肪酸有所消耗。

3.4 元宝枫果实发育过程中油脂脂肪酸组分及含量变化的差异

本研究从优株元宝枫种仁油中共检测出 14 种脂肪酸,这与程敏^[14]的报道相一致,所不同的是其未检测出二十碳二烯酸而检测出了二十二碳二烯酸。王性炎^[34]对元宝枫种仁油脂脂肪酸组分的检测分析发现,元宝枫油中含有 12 种脂肪酸。吴隆坤等^[35]的测定表明,辽宁彰武沙漠地区元宝枫籽油中含有 12 种脂肪酸。刘祥义等^[36]在云南晋宁地区元宝枫油脂中也检测出 12 种脂肪酸。与本研究相比,二者均未检测出十七碳酸和二十碳二烯酸。魏明等^[37]在绵阳元宝枫油中检测出 16 种脂肪酸,较本研究增加了十七碳烯酸(C17:1)和二十二碳二烯酸(C22:2)。有研究表明,文冠果种仁油中包含有 13 种脂肪酸^[38],牡丹籽油中含有 17 种脂肪酸^[39]。因此,脂肪酸组分的不同除与地区及物种差异有关外,还可能与提取方法^[40]和提取条件^[41]有一定的关系。

元宝枫果实发育过程中,各脂肪酸组分及含量的变化规律与相关性分析结果整体相一致。油酸和亚油酸作为元宝枫油脂含量最高的 2 种脂肪酸,二者含量的高低对油品质评价及油用资源选育具有重要作用^[42]。本研究中,油酸和亚油酸含量值在 2 年的不同发育时期均呈相反的变化趋势,并依据其负相关性系数可知,在脂肪酸合成中,油酸存在向亚油酸的转化,这一结果与先前学者对元宝枫籽油的研究结果^[18,25-27]相一致。不同之处在于,前人的研究结果中油酸与亚油酸均呈极显著负相关,且在花生油^[43]、甘蓝型油菜籽油^[44]、文冠果籽油^[45]等研究中均有一致的结果。同时本研究还发现,神经酸与芥酸含量之间具有显著的正相关关系,两者的相关性系数为 0.865,由此推测神经酸与芥酸含量间的转化具有特定比值。因此,对于元宝枫油神经酸的底物特性也同样需要进行更多基因功能的研究来证实。

由各主要脂肪酸的相关性分析结果可知,神经酸的合成受到油酸延伸路径的影响,即油酸在碳链依次延长生成二十碳烯酸、芥酸及神经酸时,也会同时转变为亚油酸及亚麻酸。这一观点在邬贤梦等^[46]对油菜脂肪酸品质改良的相关研究中已得到

验证。目前对元宝枫神经酸合成关键基因的研究已取得了初步的成果^[19,47-48],而对油脂合成关键基因的分子调控机理尚需要更深入的探究,以实现神经酸等有效资源的富集利用。

4 结 论

对供试元宝枫优株翅果发育过程中种仁颜色和形态变化的观察发现,元宝枫果实自开花至自然落果(3月中旬~11月初)共历时 8 个月,共计 235 d;种仁于花后约 100 d(7月初)开始形成,之后不断生长发育至花后 220 d(10月下旬),颜色由绿色变为亮黄色后便达到成熟状态,开花后 205~220 d 为元宝枫翅果的最佳采收时间。

研究表明,在元宝枫果实发育过程中,种仁出油率、油脂各脂肪酸含量持续积累,其中种仁出油率、种仁油总脂肪酸的相对含量均呈先增加后略微下降并保持稳定的趋势。在花后 145~160 d,总脂肪酸相对含量达到最大值 96.80%;在花后 175 d 时(9月初),种仁含油率均达最高值 50%以上;神经酸相对含量在花后 190 d 时达到最大值 6.24%,之后略微下降且稳定在较高水平;芥酸相对含量的变化趋势与神经酸类似。

对元宝枫种仁油各组分的相关性分析表明,神经酸相对含量与种仁含油率及芥酸、硬脂酸、亚麻酸的相对含量均呈极显著正相关关系。依据陕西杨凌地区元宝枫花期果实油脂累积及神经酸的变化规律,可为当地元宝枫翅果的适时采收及果实产量与品质育种提供一定的科学依据。

[参考文献]

- [1] 王性炎,谢胜菊,王高红. 中国富含神经酸的元宝枫籽油应用研究现状及前景 [J]. 中国油脂,2018,43(12):93-95,104.
Wang X Y, Xie S J, Wang G H. Application research status and prospects of *Acer truncatum* Bunge seed oil rich in nervonic acid in China [J]. China Oils and Fats, 2018, 43(12): 93-95, 104.
- [2] 王性炎,王姝清,李艳菊,等. 中国元宝枫生物学特性与栽培技术 [M]. 北京:中国林业出版社,2019:22-25.
Wang X Y, Wang S Q, Li Y J, et al. Biological characteristics and cultivation techniques of *Acer truncatum* in China [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2019: 22-25.
- [3] 李 浩. 影响元宝枫种子萌发及幼苗生理特性的因素研究 [D]. 沈阳:沈阳农业大学,2020.
Li H. Factors affecting seed germination and seedling physiological characteristics of *Acer truncatum* [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020.
- [4] 刘 培. 陕西元宝枫性状变异研究 [D]. 陕西杨凌:西北农林科

技大学,2016.

Liu P. Study of *Acer truncatum* characters of Shaanxi Province [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2016.

[5] 魏晶晶,赵善廷. 元宝枫有效成分及其应用研究进展 [J]. 动物医学进展, 2021, 42(1): 100-105.

Wei J J, Zhao S T. Progress on active ingredients and application of *Acer truncatum* Bunge [J]. Progress in Veterinary Medicine, 2021, 42(1): 100-105.

[6] 张若晨. 彩叶植物元宝枫在园林绿化中的应用 [J]. 现代园艺, 2020, 43(19): 114-115.

Zhang R C. Application of colorful leaf plant *Acer truncatum* in landscaping [J]. Modern Horticulture, 2020, 43(19): 114-115.

[7] Li Q, Chen J, Yu X Z, et al. A mini review of nervonic acid: source, production, and biological functions [J/OL]. Food Chemistry, 2019, 301: 125286. (2019-12-15). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125286>.

[8] 刘速速,周庆礼,孙 华,等. 神经酸的功能及提纯工艺研究进展 [J]. 中国油脂, 2019, 44(10): 142-146.

Liu S S, Zhou Q L, Sun H, et al. Advance in function and purification technology of nervonic acid [J]. China Oils and Fats, 2019, 44(10): 142-146.

[9] Yang R N, Zhang L X, Li P W, et al. A review of chemical composition and nutritional properties of minor vegetable oils in China [J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 74: 26-32.

[10] 王性炎,王姝清. 神经酸新资源: 元宝枫油 [J]. 中国油脂, 2005, 30(9): 60-62.

Wang X Y, Wang S Q. A new resource of nervonic acid: *Acer truncatum* Bunge oil [J]. China Oils and Fats, 2005, 30(9): 60-62.

[11] 中华人民共和国卫生部. 卫生部关于批准元宝枫籽油和牡丹籽油作为新资源食品的公告(2011 年第 9 号) [J]. 中国食品添加剂, 2011(2): 264.

The Ministry of Health of the People's Republic of China. Announcement of the ministry of health on approving *Acer truncatum* seed oil and peony seed oil as new resource foods (No. 9, 2011) [J]. China Food Additives, 2011(2): 264.

[12] 魏伊楚,樊金拴,李娟娟,等. 不同产地元宝枫种仁油脂含量及脂肪酸成分研究 [J]. 中国粮油学报, 2018, 33(12): 69-73.

Wei Y C, Fan J S, Li J J, et al. Studies on oil content and fatty acid composition of *Acer truncatum* seed kernels from different locations [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2018, 33(12): 69-73.

[13] 乔 谦,司芬芬,叶美静,等. 元宝枫种子含油率与脂肪酸组分多样性分析 [J]. 中国粮油学报, 2018, 33(4): 56-63.

Qiao Q, Si F F, Ye M J, et al. Diversity analysis on seed oil content and fatty acid composition of *Acer truncatum* [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2018, 33(4): 56-63.

[14] 程 敏. 精炼工艺对元宝枫籽油品质的影响 [J]. 中国油脂, 2021, 46(8): 16-19.

Cheng M. Effects of refining process on the quality of *Acer truncatum* seed oil [J]. China Oils and Fats, 2021, 46(8): 16-19.

[15] 李 静,李冬兵. 响应面法优化超临界 CO₂ 萃取元宝枫油的工艺研究 [J]. 西北林学院学报, 2020, 35(4): 173-178.

Li J, Li D B. Optimization of supercritical carbon dioxide extraction of *Acer truncatum* seed oil by response surface methodology [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(4): 173-178.

[16] 魏伊楚,樊金拴,徐 丹. 元宝枫油成分、加工工艺及功能性研究进展 [J]. 中国油脂, 2018, 43(1): 34-38.

Wei Y C, Fan J S, Xu D. Advance in component, processing and functionality of *Acer truncatum* Bunge seed oil [J]. China Oils and Fats, 2018, 43(1): 34-38.

[17] 李艳菊,王婧清,贾彩霞. 元宝枫翅果油脂含量及累积规律研究 [J]. 西北林学院学报, 1997, 12(1): 48-52.

Li Y J, Wang S Q, Jia C X. Study on the lipid content and accumulation of *Acer truncatum* samara [J]. Journal of Northwest Forestry University, 1997, 12(1): 48-52.

[18] 代彦满,王 瑶,牛立新. 元宝枫果实成熟过程中出油率及脂肪酸成分变化 [J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(7): 2893-2897.

Dai Y M, Wang Y, Niu L X. Changes of oil yield and fatty acid composition of *Acer truncatum* Bunge fruit during ripening [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(7): 2893-2897.

[19] Wang R K, Liu P, Fan J S, et al. Comparative transcriptome analysis two genotypes of *Acer truncatum* Bunge seeds reveals candidate genes that influences seed VLCFAs accumulation [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 15504-15512.

[20] 鲍小娟. 陕西省气候变化对经济作物物候的影响: 以苹果、梨、棉花为例 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2012.

Bao X J. Effects of climate change on phenology of cash crops in Shaanxi Province: a case study of apple, pear and cotton [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2012.

[21] 贾立平. 太阳辐射与植物生长发育的关系 [J]. 新农业, 2021(19): 36.

Jia L P. Relationship between solar radiation and plant growth and development [J]. New Agriculture, 2021(19): 36.

[22] 夏俊杰. 高产神经酸工程菌的构建及发酵条件的优化 [D]. 北京: 北京化工大学, 2020.

Xia J J. Construction and optimization of fermentation conditions for high-yielding engineered nervonic acid bacteria [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020.

[23] 唐东慧,阮成江,孟 婷,等. 不同种质文冠果含油量及油中脂肪酸组成分析 [J]. 中国油脂, 2017, 42(3): 77-81.

Tang D H, Ruan C J, Meng T, et al. Oil contents and fatty acid composition in different germplasm of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge [J]. China Oils and Fats, 2017, 42(3): 77-81.

[24] 常馨月,万路生,赵垦田. 巨柏种子成熟时间的确定 [J]. 高原农业, 2021, 5(2): 115-119.

Chang X Y, Wang L S, Zhao K T. Determination of seed ripening time of *Cupressus gigantea* [J]. Journal of Plateau Agri-

culture,2021,5(2):115-119.

[25] 王 瑶.元宝枫果实成熟过程中主要成分测定及抗氧化能力研究 [D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.

Wang Y. The main components and antioxidant capacity of samara during *Acer truncatum* Bunge fruit maturation [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2019.

[26] 刘晓玲,李 超,冯 毅,等.元宝枫果实发育动态及品质形成规律 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2020,48(5):69-80.

Liu X L, Li C, Feng Y, et al. Development and quality formation of *Acer truncatum* Bunge fruit [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2020, 48(5): 69-80.

[27] 刘晓玲.蔗糖和赤霉素对元宝枫果实发育的调控 [D]. 北京:北京林业大学,2020.

Li X L. The regulation of sucrose and gibberellin on the fruit development of *Acer truncatum* Bunge [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

[28] 呼晓姝.元宝枫种仁油的提取及其神经酸分离纯化的研究 [D]. 北京:北京林业大学,2010.

Hu X S. Extraction of seed oil of *Acer truncatum* Bunge and separation and purification of nervonic acid [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.

[29] 胡 鹏.元宝枫油的提取及其功能特性研究 [D]. 上海:上海交通大学,2017.

Hu P. Research on *Acer truncatum* oil extraction and its functional characteristics [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2017.

[30] 王 宁.野生元宝枫资源调查及种子脂肪酸评价研究 [D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.

Wang N. Studies on germplasm resources and seed oil fatty acids in wild populations of *Acer truncatum* [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2019.

[31] 成冉冉.水酶法提取元宝枫油的工艺研究 [D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2018.

Cheng R R. Study on aqueous enzymatic extraction of oil from *Acer truncatum* Bunge [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2018.

[32] 乔 谦.元宝枫天然种群种实形态与籽油变异研究 [D]. 山东泰安:山东农业大学,2018.

Qiao Q. Study on seed phenotypic traits and seed oil traits in natural populations of *Acer truncatum* [D]. Tai'an, Shandong: Shandong Agricultural University, 2018.

[33] 李 超,刘晓玲,叶红莲,等.元宝枫花芽分化及花开放过程研究 [J]. 西北植物学报,2021,41(10):1662-1672.

Li C, Liu X L, Ye H L, et al. Flower bud differentiation and flowering process *Acer truncatum* [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2021, 41(10): 1662-1672.

[34] 王性炎.中国元宝枫 [M]. 陕西杨凌:西北农林科技大学出版社,2013.

Wang X Y. *Acer truncatum* Bunge in China [M]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University Press, 2013.

[35] 吴隆坤,张雪萍,贾有青,等.高含油元宝枫籽油的提取及理化性质研究 [J]. 中国粮油学报,2020,35(4):66-70.

Wu L K, Zhang X P, Jia Y Q, et al. Oil extraction and physico-chemical properties of *Acer truncatum* Bunge seed with high oil content [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(4): 66-70.

[36] 刘祥义,付 惠,张加研.云南元宝枫种子含油量及其脂肪酸成分分析 [J]. 天然产物研究与开发,2003,15(1):38-39.

Liu X Y, Fu H, Zhang J Y. Components analysis of unsaturated fatty acid of pure oil from *Acer truncatum* Bunge in Yun-nan [J]. Natural Product Research and Development, 2003, 15(1): 38-39.

[37] 魏 明,廖成华.绵阳元宝枫种仁油脂成分分析研究 [J]. 食品工业科技,2011,32(2):127-128.

Wei M, Liao C H. Component analysis of oil in *Acer truncatum* Bunge kernel in Mianyang [J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(2): 127-128.

[38] 陆 昕,李显玉,杨素芝,等.文冠果种仁营养物质和脂肪酸组成与氨基酸的评价 [J]. 中国粮油学报,2021,36(6):74-80.

Lu X, Li X Y, Yang S Z, et al. Composition of nutrient substances and fatty acids and evaluation of amino acids in the seed kernel of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(6): 74-80.

[39] 王伟伟.牡丹籽油中脂肪酸的构成及生理功能 [J]. 中国卫生产业,2011,8(36):8-9.

Wang W W. Composition and physiological function of fatty acids in *Paeonia suffruticosa* seed oil [J]. China Health Industry, 2011, 8(36): 8-9.

[40] 周 婷,蒲 彪,姜欢笑,等.不同方法提取的藤椒油脂脂肪酸组成成分分析 [J]. 核农学报,2015,29(7):1323-1328.

Zhou T, Pu B, Jiang H X, et al. Analysis of fatty acid compositions in *Zanthoxylum armatum* DC. oil with different extraction methods [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(7): 1323-1328.

[41] 黄兵兵,王晓琴,梁杏秋.茶树品种及提取工艺对茶叶籽油脂肪酸组成的影响 [J]. 中国粮油学报,2015,30(1):65-70,75.

Huang B B, Wang X Q, Liang X Q. Effect of tea cultivars and oil extraction process on fatty acid component in tea seed [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(1): 65-70, 75.

[42] 金诚诚,杨振中,曹 莹,等.气相色谱归一化法测定高油酸花生中油酸、亚油酸含量 [J]. 农业科技与装备,2021(1):52-55.

Jin C C, Yang Z Z, Cao Y, et al. Determination of oleic acid and linoleic acid content of high oleic acid peanut by GC and normalization method [J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2021(1): 52-55.

2017(3):80-85.

[34] 韩风林,布仁仓,常禹,等. 大兴安岭白桦-兴安落叶松林火烧迹地林下植被群落恢复过程的动态分析 [J]. 生态学杂志, 2015,34(2):312-318.
Han F L, Bu R C, Chang Y, et al. Dynamics of recovery process of understory vegetation of *Betula platyphylla-Larix gmelinii* forest in Daxing'an Mountains after fire disturbance [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015,34(2):312-318.

[35] Roberts M. Response of the herbaceous layer to natural disturbance in North American forests [J]. Canadian Journal of Botany, 2004,82(9):1273-1283.

[36] 刘广菊,胡海清,张海林,等. 火频度和火强度对植物群落结构稳定性的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2008,36(7):32-33.
Liu G J, Hu H Q, Zhang H L, et al. Impact of fire frequency and fire intensity on stability of community structure [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2008,36(7):32-33.

[37] 褚燕琴,牛树奎,陈锋,等. 火干扰及环境因子对油松林林下植被的影响 [J]. 浙江农林大学学报, 2017,34(1):96-103.
Chu Y Q, Niu S Q, Chen F, et al. Fire disturbance and environmental factors for the undergrowth in a *Pinus tabulaeformis* forest [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2017,34(1):96-103.

(上接第 67 页)

[43] 郭敏杰,邓丽,苗建利,等. 基于主成分分析的高油酸花生品种品质评价 [J/OL]. 分子植物育种, 2021:1-19. [2022-01-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail46.1068.S.2021089.1345.007.html>
Guo M J, Deng L, Miao J L, et al. Quality evaluation of peanut varieties with high-oleic acid based on principal component analysis [J/OL]. Molecular Plant Breeding, 2021:1-19. [2022-01-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail46.1068.S.2021089.1345.007.html>

[44] 姚琳,孙璇,咸拴狮,等. 甘蓝型油菜籽粒油酸、亚油酸、亚麻酸和蛋白质含量变异及相关性分析 [J]. 中国粮油学报, 2021,36(5):82-87.
Yao L, Sun X, Xian S S, et al. Variation and correlation analysis of oleic acid, linoleic acid, linolenic acid and protein content in *Brassica napus* seeds [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021,36(5):82-87.

[45] 柴春山,戚建莉,蔡国军,等. 文冠果籽油含量及其脂肪酸组分的变异分析 [J]. 经济林研究, 2013,31(2):100-103,117.
Chai C S, Qi J L, Cai G J, et al. Variation analysis on kernel oil content and its fatty acid composition in *Xanthoceras sorbifolia* [J]. Non-wood Forest Research, 2013,31(2):100-103,117.

[46] 邬贤梦,官春云,李桐. 油菜脂肪酸品质改良的研究进展 [J]. 作物研究, 2003,17(3):152-158.
Wu X M, Guan C Y, Li X. Research progress on fatty acid quality improvement of rape *Brassica napus* L. [J]. Crop Research, 2003,17(3):152-158.

[47] Wang R K, Fan J S, Chang P, et al. Genome survey sequencing of *Acer truncatum* Bunge to identify genomic information, simple sequence repeat (SSR) markers and complete chloroplast genome [J]. Forests, 2019,10(2):1-9.

[48] Ma Q Y, Sun T L, Li S S, et al. The *Acer truncatum* genome provides insights into the nervonic acid biosynthesis [J]. The Plant Journal, 2020,104(3):662-678.