

## 不同种群元宝枫种仁含油率及脂肪酸组成分析与评价

韩旻昊<sup>1,2</sup>, 燕丽萍<sup>1</sup>, 王因花<sup>1</sup>, 任飞<sup>1</sup>, 梁燕<sup>1</sup>, 仲伟国<sup>1</sup>, 孙超<sup>1</sup>, 吴德军<sup>1</sup>

(1. 山东省林业科学研究院/山东省林木遗传改良重点实验室, 济南 250014; 2. 山东农业大学林学院, 山东泰安 271000)

**摘要:**为探明不同种群元宝枫之间的变异程度, 筛选优良种质资源, 对山东、河北、陕西、江苏和安徽 5 个省份 12 个地区的元宝枫种群进行分析评价, 测定其种仁含油率及脂肪酸组成, 对其进行变异分析、相关性分析和聚类分析, 并通过主成分分析法和隶属函数法对其进行综合评价。结果表明: 12 个地区的元宝枫平均种仁含油率为 30.44%, 遗传变异程度较高; 元宝枫种仁油中主要脂肪酸平均含量排序为亚油酸(29.80%) > 油酸(25.06%) > 芥酸(18.76%) > 二十碳一烯酸(8.62%) > 神经酸(7.37%) > 棕榈酸(4.75%) > 硬脂酸(2.34%) >  $\alpha$ -亚麻酸(1.45%), 其中神经酸(8.38%)、硬脂酸(11.10%)和  $\alpha$ -亚麻酸(17.08%) 变异系数较高; 山东海阳(12.59%)、山东泰安(11.22%)和山东济南(10.36%)元宝枫种仁含油率及各主要脂肪酸的平均变异系数较大; 方差分析表明, 种仁含油率和各主要脂肪酸在种群间均有极显著差异; 种仁含油率与地理因子均无显著相关性, 主要脂肪酸与温度、降水以及无霜期相关性较高; 聚类分析将 12 个地区元宝枫分为 3 个类群; 综合评价认为华北地区的元宝枫更具有育种价值。综上, 各种群元宝枫种仁含油率和脂肪酸含量存在较高度度的变异, 可将其作为筛选元宝枫优良种质资源的物质基础。

**关键词:**元宝枫; 种仁含油率; 脂肪酸; 神经酸

中图分类号: TS222+.1; TS227 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2025)05-0085-08

## Analysis and evaluation of oil content in seed kernel and fatty acid composition of *Acer truncatum* from different populations

HAN Minhao<sup>1,2</sup>, YAN Liping<sup>1</sup>, WANG Yinhua<sup>1</sup>, REN Fei<sup>1</sup>, LIANG Yan<sup>1</sup>, ZHONG Weiguo<sup>1</sup>, SUN Chao<sup>1</sup>, WU Dejun<sup>1</sup>

(1. Shandong Academy of Forestry Sciences/ Shandong Provincial Key Laboratory of Forest Genetic Improvement, Jinan 250014, China; 2. College of Forestry, Shandong Agricultural University, Tai'an 271000, Shandong, China)

**Abstract:** In order to investigate the degree of variation among different populations of *Acer truncatum* and to screen for good germplasm resources, *A. truncatum* populations from 12 regions of Shandong, Hebei, Shaanxi, Jiangsu and Anhui were analyzed and evaluated. Firstly, the oil content in seed kernel and fatty acid composition were determined. Then variation analysis, correlation analysis, and cluster analysis were performed, and a comprehensive evaluation was conducted using principal component analysis and membership function values. The results showed that the average oil content in seed kernels of the 12 regions was 30.44%, with a high degree of genetic variation. The average contents of the major fatty acid components were as follows: linoleic acid (29.80%) > oleic acid (25.06%) > erucic acid (18.76%) > eicosaenoic acid (8.62%) > nervonic acid (7.37%) > palmitic acid (4.75%) >

stearic acid (2.34%) >  $\alpha$ -linolenic acid (1.45%), and the coefficients of variation of nervonic acid (8.38%), stearic acid (11.10%) and  $\alpha$ -linolenic acid (17.08%) were higher. The average coefficients of variation of oil content in seed kernel and various main fatty acid from Haiyang, Shandong (12.59%), Tai'an,

收稿日期: 2023-07-26; 修回日期: 2025-03-04

基金项目: 山东省“泰山学者”工程和山东省农业良种工程(2020LZGC00903)

作者简介: 韩旻昊(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为林木遗传育种(E-mail) wel2080@163.com。

通信作者: 燕丽萍, 正高级工程师, 博士(E-mail) ylp\_982@163.com。

Shandong(11.22%) and Jinan, Shandong(10.36%) were higher. Analysis of variance showed that there were significant differences in the oil content in seed kernel and various main fatty acids among populations. There was no significant correlation between oil content in seed kernel and geographical factors, and the correlations between major fatty acid components and temperature, precipitation and frost-free period were high. Cluster analysis classified the *A. truncatum* from 12 regions into three clusters. The comprehensive evaluation concluded that *A. truncatum* in North China was more valuable for breeding. In summary, the oil content in seed kernel and fatty acid content of various populations of *A. truncatum* have a high degree of variability, which can be used as the material basis for screening the excellent germplasm resources.

**Key words:** *Acer truncatum*; oil content in seed kernel; fatty acid; nervonic acid

随着我国人口的不断增长和经济的迅速发展,食用植物油呈现供不应求的情况,因此,我国越来越重视木本油料的发展,如油茶、核桃、油用牡丹、文冠果和元宝枫等<sup>[1]</sup>。元宝枫(*Acer truncatum* Bunge),又名元宝槭,隶属槭树科(Aceraceae Juss.)槭属(*Acer*)<sup>[2]</sup>,是世界范围内普遍使用的观赏树种,其叶形秀丽、树姿优美,在北方被广泛作为行道树和园林树种<sup>[3-5]</sup>。元宝枫的种仁含油率在40%~50%,油中不饱和脂肪酸含量高达90%以上,其中神经酸的含量高达4%~9%<sup>[6-7]</sup>。神经酸,又名鲨鱼酸,是一种长链单不饱和脂肪酸,能够恢复脑细胞末梢活性、提高细胞活力,并对记忆力衰退、脑瘫等脑疾病具有一定疗效<sup>[8-10]</sup>。神经酸原本提取自深海鲨鱼等哺乳动物脑中,提取难度高、成本高昂且产量极低,因此难以满足人们的大量需求,而元宝枫为神经酸的可持续利用提供了一个重要的新来源。目前,元宝枫籽油已被开发为食用油、保健品等,元宝枫作为新兴木本油料树种的巨大价值和潜力正在逐步受到重视<sup>[11]</sup>。

王性炎等<sup>[12]</sup>报道元宝枫种仁油具有极高的价值。刘祥义等<sup>[13]</sup>从云南元宝枫籽油中检测到12种脂肪酸,其中不饱和脂肪酸含量达到92%以上。魏明等<sup>[14]</sup>研究表明,绵阳元宝枫干种仁含油率为44.3%,油中含有16种脂肪酸。乔谦等<sup>[15]</sup>对山东省泰安市5个自然群居的51株元宝枫种子进行检测,结果表明,种子平均含油率为32.32%,油中含有14种脂肪酸,且棕榈酸、油酸、亚油酸、花生一烯酸和神经酸含量在居群间差异极显著。吴隆坤等<sup>[16]</sup>对辽宁彰武地区元宝枫籽油进行提取和分析,结果表明,在最佳的实验条件下,种仁出油率为30.5%,油中含有12种脂肪酸。Zhang等<sup>[17]</sup>研

究发现,元宝枫籽油中含有18种脂肪酸,其中神经酸含量达8%。代彦满等<sup>[18]</sup>在元宝枫种子成熟过程中共检测到17种脂肪酸,并且发现10月末元宝枫种仁含油率最高。

虽然目前有不少关于元宝枫种仁油的报道,然而,鲜有关于元宝枫种仁含油率和脂肪酸的遗传变异分析、不同种群和个体间的差异分析以及对种质资源的评价筛选。由此,本研究从山东、河北、陕西、江苏和安徽5个省份的元宝枫种群取样,对所取样本的种仁含油率及脂肪酸组成进行研究分析,旨在为高油元宝枫优良种质资源的选育工作提供理论依据,为未来元宝枫油用产业的发展奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

在山东、河北、陕西、江苏和安徽5个省份共12个地区,选取114株元宝枫母系单株作为样本,于2023年10月元宝枫果实变为成熟的黄褐色时采集,采后待果实自然阴干3~5d,去杂后手工剥去种皮获得纯净种仁<sup>[19]</sup>。采集时记录各个采样地点的经纬度及海拔,其余气象因子则从当地气象部门查阅,同时将收集的样本进行编号,详细信息见表1。

元宝枫籽油,山东枫之神生物科技有限公司;37种脂肪酸甲酯标准品,山东华博基因工程有限公司。

SPEC-PMR 脉冲式核磁共振含油含水量分析仪,北京斯派克科技发展有限公司;Agilent 7890A 气相色谱仪;800Y 高速粉碎机;XT220A 电子天平;HH-1 恒温水浴锅;RE-2000B 旋转蒸发仪;DA-2560 毛细管色谱柱。

表1 12个元宝枫种实采集地的地理位置与气候条件

Table 1 Geographical location and climatic conditions of 12 collection sites of *Acer truncatum*

种源地	编号	海拔/m	经度	纬度	年均温/℃	1月均温/℃	7月均温/℃	年降水量/mm	无霜期/d	样本数
山东海阳	HY	140	121°13'12	36°51'36	12.0	-0.6	23.5	696	207	10
山东济南	JN	43	116°46'12	36°40'48	13.6	-3.2	27.2	614	235	12
山东青岛	QD	22	120°4'12	36°16'12	12.7	-0.5	25.3	670	252	11
山东泰安	TA	219	117°9'0	36°7'12	12.9	-2.6	26.4	697	195	9
山东沂源	YY	400	117°55'12	35°53'24	13.6	-0.5	26.5	730	198	7
山东枣庄	ZZ	184	116°58'48	34°43'48	13.5	-0.2	26.7	875	196	10
河北保定	BD	196	115°16'48	38°31'48	13.4	-4.3	26.4	498	213	12
陕西西安	XA	425	108°27'0	33°56'24	13.4	-0.6	26.5	621	226	6
江苏南京	NJ	16	118°28'48	31°15'36	15.4	4.5	29.1	1 107	265	13
江苏泰州	TZ	5	120°1'12	32°16'48	15.2	3.6	28.5	1 037	253	8
江苏徐州	XZ	28.8	117°18'36	34°0'36	14.0	2.8	28.2	865	210	7
安徽芜湖	WH	10	118°15'0	30°50'24	15.5	3.0	28.9	1 200	230	9

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 种仁含油率测定

每个单株各取 10 g 左右的种仁,取 10 g 元宝枫籽油作为标定样品,采用核磁共振含油含水量分析仪测定样本含油率,每个样品重复测定 3 次。

### 1.2.2 脂肪酸组成测定

采用索氏提取法得到元宝枫种仁油,依据 GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》对其进行甲酯化,采用气相色谱法测定脂肪酸组成。

气相色谱条件:DA-2560 毛细管色谱柱(100 m × 0.25 mm × 0.2 μm);载气为高纯氮气;进样器温度 270 ℃,检测器温度 280 ℃;柱升温程序为初始温度 100 ℃,持续 13 min,以 10 ℃/min 的速率升至 180 ℃,持续 6 min,以 1 ℃/min 的速率升至 200 ℃,持续 20 min,以 4 ℃/min 的速率升至 230 ℃,持续 10.5 min。

根据脂肪酸甲酯标准品保留时间定性,采用峰面积归一化法定量。

### 1.2.3 数据统计与分析

利用 SPSS 23.0 软件对数据进行巢式方差分析、主成分分析等;用 Origin 2023b 软件进行相关性分析、聚类分析及作图;采用隶属函数法和主成分分析法对含油率和脂肪酸组分进行综合评价。

隶属函数法:针对每个指标,对不同地区的各样本进行隶属函数值计算,并计算平均值,以各指标隶属函数值的平均值作为评价标准,平均值越大,说明元宝枫种仁油的综合品质越好<sup>[20]</sup>。隶属函数值( $R$ )按式(1)进行计算。

$$R = \frac{X_j - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

式中: $X_j$  为测定值; $X_{\min}$ 、 $X_{\max}$  分别为所有测定值中的最小值和最大值。

## 2 结果与分析

### 2.1 变异分析

种仁含油率是筛选高油元宝枫种质的重要参考指标之一。12 个地区的元宝枫种仁含油率及主要脂肪酸组成如表 2 所示。

由表 2 可知,不同种群元宝枫的种仁含油率在 24.50% ~ 38.41%,平均含油率为 30.44%,含油率大于平均值的种群有 5 个,其中含油率最高的地区为 WH(38.41%),其次为 BD(36.63%),最低的为 JN(24.50%),种仁含油率变异系数为 15.05%,表明元宝枫种仁含油率具有丰富的变异程度。

元宝枫种仁油中共检出 18 种脂肪酸,其中山萘酸、二十四碳酸、 $\gamma$ -亚麻酸、二十碳二烯酸、花生酸、棕榈油酸、肉豆蔻酸、十七碳酸、二十三碳酸和二十二碳二烯酸这 10 种脂肪酸含量低于 1%,可以忽略,因此在后续分析中不作评价。由表 2 可知,元宝枫种仁油中各主要脂肪酸平均含量由高到低依次为亚油酸(29.80%) > 油酸(25.06%) > 芥酸(18.76%) > 二十碳一烯酸(8.62%) > 神经酸(7.37%) > 棕榈酸(4.75%) > 硬脂酸(2.34%) >  $\alpha$ -亚麻酸(1.45%)。8 种主要脂肪酸的变异系数范围在 3.60% ~ 17.08% 之间,其中  $\alpha$ -亚麻酸(17.08%)、硬脂酸(11.10%) 和神经酸(8.38%) 的变异系数较高。元宝枫种仁油中的不饱和脂肪酸和饱和脂肪酸平均含量分别为 91.05% 和 7.08%,变异系数分别为 0.56% 和 5.08%,这表明元宝枫种仁

油中的不饱和脂肪酸含量很高,并且变异程度较小,遗传更为稳定,在未来优树选育中不必担心不饱和脂肪酸含量会发生极端变化。此外,神经酸含量在各种种群之间的变化范围为 5.44% ~ 8.64%,含量最高的种群为 TA(8.64%),其次为 JN(8.41%),平均含量为 7.37%,高于吴红等<sup>[21]</sup>测得江苏泰州地区

元宝枫籽油神经酸含量(6.23%)和王因花等<sup>[22]</sup>测得山东济南市内元宝枫种仁油神经酸含量(6.78%)。本研究中神经酸含量最高的两个种群均在山东省境内,并且神经酸含量较高的地区大多在北方地区,初步说明元宝枫在我国北方地区具有更高的选育价值。

表 2 各种群元宝枫种仁含油率与主要脂肪酸组成

Table 2 Oil content in seed kernel and main fatty acid composition in each population of *Acer truncatum* %

种群	含油率	脂肪酸组成									
		亚油酸	油酸	芥酸	二十碳一烯酸	神经酸	棕榈酸	硬脂酸	$\alpha$ -亚麻酸	不饱和脂肪酸	饱和脂肪酸
HY	27.04 ± 4.23 <sup>bc</sup>	29.46 ± 2.05 <sup>cde</sup>	25.11 ± 1.34 <sup>de</sup>	18.56 ± 1.19 <sup>cde</sup>	8.83 ± 0.47 <sup>bc</sup>	7.56 ± 0.77 <sup>c</sup>	4.38 ± 1.05 <sup>de</sup>	2.54 ± 0.83 <sup>ab</sup>	1.65 ± 0.41 <sup>abc</sup>	91.18 ± 0.49 <sup>cde</sup>	6.93 ± 0.47 <sup>bcd</sup>
	24.50 ± 5.78 <sup>c</sup>	28.74 ± 2.36 <sup>de</sup>	22.99 ± 2.07 <sup>fg</sup>	20.25 ± 1.18 <sup>a</sup>	8.82 ± 0.46 <sup>bc</sup>	8.41 ± 0.87 <sup>ab</sup>	5.11 ± 0.41 <sup>ab</sup>	2.31 ± 0.41 <sup>bcd</sup>	1.56 ± 0.32 <sup>abcd</sup>	90.78 ± 0.47 <sup>def</sup>	7.41 ± 0.38 <sup>ab</sup>
JN	29.60 ± 3.47 <sup>b</sup>	30.86 ± 1.41 <sup>bc</sup>	25.48 ± 1.34 <sup>cd</sup>	17.93 ± 0.47 <sup>efg</sup>	8.49 ± 0.24 <sup>cd</sup>	7.56 ± 0.52 <sup>c</sup>	4.19 ± 0.25 <sup>e</sup>	2.59 ± 0.28 <sup>ab</sup>	1.09 ± 0.15 <sup>e</sup>	91.41 ± 0.45 <sup>abc</sup>	6.78 ± 0.4 <sup>cde</sup>
	31.80 ± 9.17 <sup>b</sup>	29.03 ± 1.33 <sup>cde</sup>	22.62 ± 1.12 <sup>gh</sup>	20.06 ± 0.83 <sup>ab</sup>	8.67 ± 0.40 <sup>bc</sup>	8.64 ± 0.76 <sup>a</sup>	5.28 ± 0.88 <sup>a</sup>	2.37 ± 0.35 <sup>bcd</sup>	1.54 ± 0.31 <sup>bcd</sup>	90.56 ± 1.44 <sup>ef</sup>	7.64 ± 1.11 <sup>a</sup>
TA	31.30 ± 2.00 <sup>b</sup>	32.54 ± 1.95 <sup>ab</sup>	20.52 ± 2.37 <sup>i</sup>	19.32 ± 1.29 <sup>abcd</sup>	8.84 ± 0.51 <sup>bc</sup>	7.30 ± 0.97 <sup>c</sup>	4.96 ± 0.30 <sup>abc</sup>	2.66 ± 0.23 <sup>ab</sup>	1.83 ± 0.45 <sup>a</sup>	90.35 ± 0.61 <sup>f</sup>	7.62 ± 0.43 <sup>a</sup>
	31.88 ± 4.56 <sup>b</sup>	30.52 ± 0.64 <sup>cd</sup>	23.61 ± 0.84 <sup>efg</sup>	19.37 ± 0.39 <sup>abcd</sup>	8.12 ± 0.10 <sup>d</sup>	7.95 ± 0.22 <sup>bc</sup>	5.13 ± 0.08 <sup>a</sup>	2.17 ± 0.11 <sup>cde</sup>	1.49 ± 0.16 <sup>cd</sup>	91.05 ± 0.45 <sup>cde</sup>	7.30 ± 0.09 <sup>ab</sup>
ZZ	36.63 ± 7.08 <sup>a</sup>	32.86 ± 1.24 <sup>a</sup>	21.47 ± 1.34 <sup>hi</sup>	19.15 ± 1.29 <sup>abcd</sup>	8.13 ± 0.32 <sup>d</sup>	7.55 ± 0.95 <sup>c</sup>	5.03 ± 0.36 <sup>ab</sup>	2.47 ± 0.31 <sup>abc</sup>	1.45 ± 0.25 <sup>cd</sup>	90.60 ± 0.63 <sup>ef</sup>	7.50 ± 0.42 <sup>a</sup>
	29.97 ± 4.79 <sup>b</sup>	26.67 ± 0.79 <sup>f</sup>	31.50 ± 0.24 <sup>a</sup>	17.09 ± 0.66 <sup>g</sup>	9.49 ± 0.07 <sup>a</sup>	5.44 ± 0.31 <sup>e</sup>	4.46 ± 0.15 <sup>cde</sup>	2.05 ± 0.11 <sup>de</sup>	1.08 ± 0.13 <sup>e</sup>	91.28 ± 0.13 <sup>bcd</sup>	6.51 ± 0.16 <sup>de</sup>
XA	28.80 ± 3.51 <sup>bc</sup>	29.41 ± 1.54 <sup>cde</sup>	26.85 ± 2.21 <sup>bc</sup>	17.82 ± 0.66 <sup>efg</sup>	9.02 ± 0.37 <sup>b</sup>	6.47 ± 0.68 <sup>d</sup>	4.89 ± 0.38 <sup>abcd</sup>	2.33 ± 0.24 <sup>bcd</sup>	1.34 ± 0.18 <sup>de</sup>	90.90 ± 0.51 <sup>def</sup>	7.21 ± 0.46 <sup>abc</sup>
	28.52 ± 3.28 <sup>bc</sup>	26.82 ± 2.88 <sup>f</sup>	27.9 ± 2.15 <sup>b</sup>	19.46 ± 1.25 <sup>abc</sup>	8.49 ± 0.45 <sup>cd</sup>	8.00 ± 1.01 <sup>abc</sup>	4.46 ± 0.37 <sup>cde</sup>	1.93 ± 0.20 <sup>e</sup>	1.14 ± 0.36 <sup>e</sup>	91.80 ± 0.37 <sup>ab</sup>	6.40 ± 0.28 <sup>e</sup>
TZ	26.78 ± 3.60 <sup>bc</sup>	28.10 ± 2.32 <sup>ef</sup>	28.13 ± 1.48 <sup>b</sup>	18.47 ± 1.07 <sup>def</sup>	8.25 ± 0.22 <sup>d</sup>	7.50 ± 0.42 <sup>c</sup>	4.46 ± 0.12 <sup>cde</sup>	1.86 ± 0.05 <sup>e</sup>	1.44 ± 0.22 <sup>cd</sup>	91.88 ± 0.31 <sup>a</sup>	6.32 ± 0.12 <sup>e</sup>
	38.41 ± 2.92 <sup>a</sup>	32.55 ± 0.22 <sup>ab</sup>	24.52 ± 0.25 <sup>def</sup>	17.60 ± 0.13 <sup>fg</sup>	8.27 ± 0.12 <sup>d</sup>	6.03 ± 0.09 <sup>de</sup>	4.61 ± 0.04 <sup>bcd</sup>	2.79 ± 0.06 <sup>a</sup>	1.81 ± 0.04 <sup>ab</sup>	90.79 ± 0.25 <sup>cdef</sup>	7.40 ± 0.07 <sup>ab</sup>
WH											
均值	30.44	29.80	25.06	18.76	8.62	7.37	4.75	2.34	1.45	91.05	7.08
变异系数	15.05	5.34	5.75	4.59	3.60	8.38	7.68	11.10	17.08	0.56	5.08

注:同列不同字母表示差异显著( $p < 0.01$ )

Note: Different letters in the same column indicate significant differences ( $p < 0.01$ )

各地区元宝枫种群内的种仁含油率和主要脂肪酸变异系数见表 3。

由表 3 可知, HY(12.59%)、TA(11.22%)和 JN(10.36%)等北方地区元宝枫种仁含油率和主要脂肪酸的平均变异系数较大,表明北方地区的元宝枫种群整体遗传变异更为丰富,更具筛选价值。同时发现 WH 地区中各性状指标平均变异系数(1.76%)显著低于其他地区,推测该地区样本采集可能来源于单一母系,并且已是选育过后的高油种质,因此变异程度不高,而种仁含油率异常偏高。

过往研究表明,元宝枫作为观赏树种,在叶片、种实等表型性状上具有较为丰富的变

异<sup>[23-24]</sup>。本试验证实元宝枫种仁中含油率与脂肪酸组分同样具有较高的变异程度,初步说明元宝枫具备优良种质的筛选条件,这对于筛选高油元宝枫单株并将其用于良种繁育,提高元宝枫的油脂产量、油用价值等具有重要意义,为未来元宝枫经济林效益的提高打下重要理论基础。此次对于元宝枫种仁含油率和脂肪酸组成的测定结果相较于先前报道<sup>[25]</sup>略有不同,推测是环境因素不同导致群体间差异,某单株所处生境条件较差不适合其生长发育,以及个体间变异程度较高,进而影响整体平均值。

表 3 元宝枫各种群内种仁含油率与主要脂肪酸组分的变异系数

种群	含油率	亚油酸	油酸	芥酸	二十碳一烯酸	神经酸	棕榈酸	硬脂酸	$\alpha$ -亚麻酸	不饱和脂肪酸	饱和脂肪酸	均值
HY	15.66	6.96	5.34	6.41	5.32	10.13	23.87	32.70	24.74	0.53	6.83	12.59
JN	23.58	8.21	9.01	5.82	5.24	10.32	8.02	17.75	20.42	0.52	5.08	10.36
QD	11.73	4.58	5.27	2.64	2.78	6.86	5.86	10.72	13.58	0.49	5.95	6.41
TA	28.84	4.60	4.97	4.15	4.58	8.80	16.65	14.88	19.86	1.60	14.52	11.22
YY	6.40	6.01	11.57	6.67	5.81	13.28	6.13	8.49	24.39	0.68	5.63	8.64
ZZ	14.31	2.09	3.54	2.02	1.27	2.78	1.63	5.28	10.39	0.49	1.18	4.09
BD	19.32	3.77	6.25	6.72	3.91	12.60	7.19	12.67	16.97	0.69	5.61	8.70
XA	15.98	2.98	0.77	3.89	0.69	5.68	3.26	5.31	12.07	0.14	2.50	4.84
NJ	12.19	5.24	8.22	3.73	4.06	10.50	7.69	10.49	13.61	0.56	6.43	7.52
TZ	11.50	10.75	7.72	6.44	5.34	12.58	8.32	10.24	31.59	0.40	4.37	9.93
XZ	13.44	8.26	5.26	5.81	2.69	5.60	2.80	2.51	15.06	0.34	1.92	5.79
WH	7.60	0.67	1.01	0.76	1.51	1.44	0.80	2.09	2.27	0.27	0.96	1.76
均值	15.05	5.34	5.75	4.59	3.60	8.38	7.68	11.10	17.08	0.56	5.08	7.65

对元宝枫种群间、种群内种仁含油率与主要脂肪酸组成进行方差分析,结果见表 4。

由表 4 可知:各指标在元宝枫种群间均有极显著差异,其中油酸的差异性最大,神经酸次之;而在种群内仅有种仁含油率和神经酸呈现显著差异,表明这两个性状指标在种群内变异程度较高,具有较

高的研究价值。综上,所选 12 个元宝枫种群在不同的生境条件下差异性较高,但在种群内则相对稳定,可以初步认为是环境不同所导致的变异。总体来说,元宝枫种群间拥有较差的遗传稳定性以及丰富的变异。

表 4 元宝枫种群间、种群内种仁含油率与主要脂肪酸组分方差分析

项目	均方		随机误差	F 值	
	种群间	种群内		种群间	种群内
含油率	161.946	49.711	22.373	7.239**	2.269*
亚油酸	38.189	12.288	3.108	1.424**	0.454
油酸	76.583	2.901	2.468	31.028**	1.179
芥酸	9.281	1.351	0.839	11.059**	1.626
二十碳一烯酸	1.429	0.072	0.128	11.191**	0.559
神经酸	7.632	0.875	0.458	16.651**	1.939*
棕榈酸	1.240	0.175	0.236	5.264**	0.730
硬脂酸	0.693	0.088	0.126	5.514**	0.696
$\alpha$ -亚麻酸	0.546	0.053	0.074	7.342**	0.707
不饱和脂肪酸	1.907	0.497	0.346	5.513**	1.446
饱和脂肪酸	1.872	0.140	0.220	8.522**	0.631

注: \* 表示在 0.05 水平上差异显著; \*\* 表示在 0.01 水平上差异极显著。下同

Note: \* Significant different at 0.05 level; \*\* Significant different at 0.01 level. The same below

## 2.2 相关性分析

元宝枫种群间的种仁含油率、主要脂肪酸组分与地理因子间的相关性见表 5 和表 6。

由表 5 可知:元宝枫种仁含油率与亚油酸含量呈极显著正相关,与硬脂酸含量呈显著正相关,而与油酸和二十碳一烯酸含量呈显著负相关;亚油酸含

量与硬脂酸、 $\alpha$ -亚麻酸和饱和脂肪酸含量呈极显著正相关,而与油酸、芥酸、二十碳一烯酸和不饱和脂肪酸含量呈极显著负相关;油酸含量与二十碳一烯酸和不饱和脂肪酸含量呈极显著正相关,而与芥酸、神经酸、棕榈酸、硬脂酸、 $\alpha$ -亚麻酸和饱和脂肪酸含量呈极显著负相关;芥酸含量与神经酸含量呈

极显著正相关,与棕榈酸含量呈显著正相关,而与硬脂酸含量呈极显著负相关,与二十碳一烯酸含量呈显著负相关;二十碳一烯酸含量与神经酸含量呈极显著负相关,与 $\alpha$ -亚麻酸含量呈显著负相关;神经酸含量与棕榈酸含量呈显著正相关,而与硬脂酸含量呈极显著负相关;棕榈酸含量与饱和脂肪酸含量呈极显著正相关,而与硬脂酸和不饱和脂肪酸含量呈极显著负相关;硬脂酸含量与 $\alpha$ -亚麻酸和饱和脂肪酸含量呈极显著正相关,而与不饱和脂肪酸含量呈极显著负相关; $\alpha$ -亚麻酸与饱和脂肪酸含量呈极显著正相关,而与不饱和脂肪酸含量呈极显著负相关;不饱和脂肪酸含量与饱和脂肪酸含量呈极显著负相关。综上所述,元宝枫种仁含油率和脂肪酸组分之间的正、负相关性没有呈现出明显规律,其复杂关系仍需要后续研究进行分析讨论。

由表6可知:元宝枫种仁含油率与各地因子均无显著相关性,初步推测其为独立因子;二十碳一烯酸含量与海拔呈显著正相关,不饱和脂肪酸含量则与其呈极显著负相关,说明二十碳一烯酸含量在

一定程度上会随海拔升高而增加,不饱和脂肪酸含量则会减少;神经酸含量与经度呈极显著正相关,硬脂酸含量与经度呈显著正相关;纬度与芥酸和神经酸含量呈极显著正相关,与亚油酸和饱和脂肪酸含量呈显著正相关,仅与油酸含量呈极显著负相关;油酸、芥酸和神经酸含量均与温度、降水量和无霜期相关性较高,油酸含量与这些因子均呈显著或极显著正相关,除芥酸含量与7月均温无显著相关性外,芥酸与神经酸含量与上述因子呈显著或极显著负相关;除此之外,亚油酸含量还与1月均温和无霜期呈显著负相关,二十碳一烯酸和不饱和脂肪酸含量与无霜期呈显著正相关,棕榈酸和饱和脂肪酸含量与1月均温和无霜期呈极显著或显著负相关, $\alpha$ -亚麻酸含量与无霜期也呈极显著负相关。可以看出,部分脂肪酸含量与温度、降水量以及无霜期呈显著或极显著的负相关,这正好对应了元宝枫抗旱喜温凉的生长习性<sup>[26]</sup>。在之后的研究中,需要进一步扩大元宝枫种群采集地的范围,同时增加样本量,破除采样地点的局限性,得出更加准确、可靠的研究结论。

表5 元宝枫种仁含油率与主要脂肪酸组分间的相关性分析

Table 5 Correlation analysis between seed kernel oil content and main fatty acid components of *Acer truncatum*

项目	含油率	亚油酸	油酸	芥酸	二十碳一烯酸	神经酸	棕榈酸	硬脂酸	$\alpha$ -亚麻酸	不饱和脂肪酸	饱和脂肪酸
含油率	1										
亚油酸	0.348**	1									
油酸	-0.189*	-0.699**	1								
芥酸	-0.052	-0.252**	-0.435**	1							
二十碳一烯酸	-0.209*	-0.423**	0.448**	-0.225*	1						
神经酸	-0.101	-0.172	-0.461**	0.807**	-0.421**	1					
棕榈酸	-0.123	0.105	-0.396**	0.230*	-0.035	0.188*	1				
硬脂酸	0.208*	0.447**	-0.258**	-0.305**	0.006	-0.305**	-0.272**	1			
$\alpha$ -亚麻酸	0.082	0.411**	-0.525**	0.014	-0.225*	0.071	0.159	0.306**	1		
不饱和脂肪酸	0.047	-0.342**	0.452**	0.123	-0.001	0.127	-0.596**	-0.419**	-0.379**	1	
饱和脂肪酸	0.027	0.406**	-0.548**	0.005	-0.029	-0.035	0.748**	0.435**	0.360**	-0.847**	1

表6 元宝枫种仁含油率、主要脂肪酸组分与地理因子间的相关性分析

Table 6 Correlation analysis between seed kernel oil content, main fatty acid components and geographical factors of *Acer truncatum*

项目	海拔	经度	纬度	年均温	1月均温	7月均温	年降水量	无霜期
含油率	0.140	-0.129	-0.039	0.134	-0.055	0.090	0.081	-0.163
亚油酸	0.095	0.098	0.201*	-0.040	-0.210*	-0.096	-0.076	-0.191*
油酸	-0.183	-0.151	-0.504**	0.250**	0.544**	0.220*	0.332**	0.426**
芥酸	0.071	0.062	0.372**	-0.191*	-0.406**	-0.092	-0.289**	-0.307**
二十碳一烯酸	0.201*	-0.184	-0.132	-0.010	0.098	-0.031	-0.022	0.237*
神经酸	-0.080	0.260**	0.461**	-0.360**	-0.406**	-0.256**	-0.344**	-0.268**
棕榈酸	0.173	-0.183	0.120	0.048	-0.245**	0.136	-0.089	-0.232*
硬脂酸	0.029	0.186*	0.115	-0.104	-0.136	-0.189*	-0.04	-0.029
$\alpha$ -亚麻酸	0.115	0.111	0.054	-0.008	-0.104	-0.025	0.058	-0.378**
不饱和脂肪酸	-0.255**	0.123	-0.172	0.034	0.288**	0.025	0.138	0.195*
饱和脂肪酸	0.180	-0.041	0.191*	-0.027	-0.323**	-0.004	-0.110	-0.238*

### 2.3 聚类分析

将 12 个地区的元宝枫按照各性状数据进行系统聚类分析,结果见图 1。

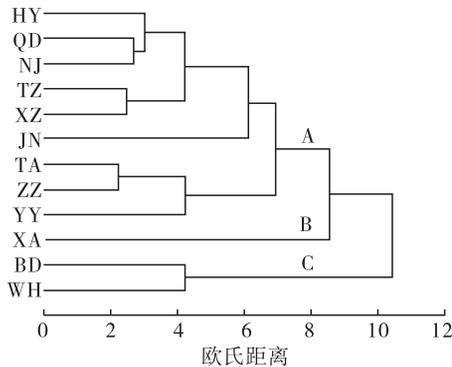


图 1 元宝枫种群间聚类分析图

Fig. 1 Cluster analysis diagram among populations of *Acer truncatum*

由图 1 可知,在欧氏距离 8 处,样本被分为 A、B、C 3 个类群。总体来看,元宝枫并未按照各个产地的地理位置进行聚类,元宝枫种仁油各性状的遗传变异不具备较强的规律性。总体来看,在 A 类群中,芥酸、神经酸相对含量较高;B 类群仅包括 XA, XA 单独分为一类,表明 XA 的元宝枫种仁油性状与其他产地差异较大,其种仁含油率、亚油酸、芥酸、神经酸和  $\alpha$ -亚麻酸含量较低,但油酸和二十碳一烯酸含量较高;C 类群中,元宝枫种仁含油率、亚油酸含量较高。

### 2.4 主成分分析

对 12 个地区的元宝枫种仁含油率及主要脂肪酸进行主成分分析,结果见表 7。

表 7 元宝枫种仁含油率及主要脂肪酸组成的主成分分析结果

Table 7 Principal component analysis of seed kernel oil content and main fatty acid components in *Acer truncatum*

项目	载荷		
	PC1	PC2	PC3
含油率	0.197	-0.159	0.573
亚油酸	0.709	-0.277	0.456
油酸	-0.856	-0.344	-0.228
芥酸	0.108	0.886	-0.010
二十碳一烯酸	-0.369	-0.394	-0.563
神经酸	0.141	0.914	0.101
棕榈酸	0.568	0.280	-0.647
硬脂酸	0.459	-0.581	0.253
$\alpha$ -亚麻酸	0.626	-0.037	0.171
不饱和脂肪酸	-0.773	0.244	0.444
饱和脂肪酸	0.847	-0.139	-0.431
特征值	3.683	2.495	1.812
累积贡献率/%	33.478	56.158	72.630

以特征值大于 1 为原则,提取出 3 个主成分。

由表 7 可知,前 3 个主成分的累积贡献率高达 72.630%,能够解释大部分信息。在第 1 主成分(PC1)中,主要由饱和脂肪酸、亚油酸和  $\alpha$ -亚麻酸起到正向贡献作用,而油酸和不饱和脂肪酸则起负向贡献;在第 2 主成分(PC2)中,神经酸和芥酸的贡献较大,因此第 2 主成分主要由芥酸和神经酸决定;而第 3 主成分(PC3)中主要由种仁含油率起正向贡献,棕榈酸起负向贡献。

### 2.5 元宝枫种仁含油率及主要脂肪酸组分的综合评价

品质评价是林木遗传育种工作中的重要环节,通过常用的主成分分析法和隶属函数法进行综合评价,可以确保评价结果的科学性和准确性<sup>[27]</sup>。从相关性分析结果可知,元宝枫种仁油中的各脂肪酸组分间均具有复杂的相关性,难以采用某个特定的指标来确定种群之间价值的高与低,因此通过主成分分析法和隶属函数法计算元宝枫不同种群各指标的综合评分,结果见表 8。

表 8 元宝枫种仁含油率及主要脂肪酸组分的综合评价

Table 8 Comprehensive evaluation of seed kernel oil content and main fatty acid components in *Acer truncatum*

种群	主成分分析法		种群	隶属函数法	
	综合评分	位次		综合评分	位次
JN	0.31	1	TA	0.51	1
TA	0.31	1	YY	0.51	1
QD	0.28	3	JN	0.48	3
TZ	0.21	4	WH	0.48	3
HY	0.20	5	BD	0.47	5
YY	0.02	6	ZZ	0.46	6
BD	-0.05	7	HY	0.45	7
ZZ	-0.10	8	NJ	0.44	8
XZ	-0.20	9	QD	0.42	9
NJ	-0.30	10	TZ	0.42	9
WH	-0.42	11	XZ	0.40	11
XA	-0.45	12	XA	0.39	12

由表 8 可知,主成分分析法和隶属函数法得出的评分结果出入较大,但排名靠前的均为北方地区(TA、JN),初步推测是由于个体间遗传变异水平较高,差异较大,生境条件不同导致。

### 3 结论

本研究以全国 5 个省份 12 个地区共 114 份元宝枫种质为研究对象,通过脉冲核磁共振含油含水量分析仪测得 12 个地区的元宝枫平均种仁含油率为 30.44%,遗传变异程度较高,元宝枫种仁油中主要脂肪酸平均含量为亚油酸(29.80%) > 油酸(25.06%) > 芥酸(18.76%) > 二十碳一烯酸

(8.62%) > 神经酸(7.37%) > 棕榈酸(4.75%) > 硬脂酸(2.34%) >  $\alpha$ -亚麻酸(1.45%),其中神经酸(8.38%)、硬脂酸(11.10%)和 $\alpha$ -亚麻酸(17.08%)变异系数较高;山东海阳(12.59%)、山东泰安(11.22%)和山东济南(10.36%)元宝枫种仁含油率及各脂肪酸的平均变异系数较大。方差分析表明,种仁含油率和各脂肪酸在种群间均有极显著差异。种仁含油率与脂肪酸组分间相关性关系复杂,而与地理因子间均无显著相关性;主要脂肪酸与温度、降水和无霜期呈较强的相关性。聚类分析按照种仁含油率和脂肪酸含量将12个地区元宝枫划分为3个类群。主成分分析法和隶属函数法综合评价认为华北地区的元宝枫更适合作为优良种群选育地。本研究为高油元宝枫优良种质资源的选育工作提供了科学的理论基础。

#### 参考文献:

- [1] 尹丹丹,李珊珊,吴倩,等.我国6种主要木本油料作物的研究进展[J].植物学报,2018,53(1):110-125.
- [2] 中国科学院中国植物志编辑委员会.中国植物志[M].北京:科学出版社,1993.
- [3] 李超.元宝枫结果习性和花发育研究[D].北京:北京林业大学,2021.
- [4] 张志丹,曹治国,闫广轩,等.北京5种典型风景游憩林的大气颗粒物吸滞特征[J].林业科学,2024,60(9):1-11.
- [5] LE X, ZHANG W, SUN G, et al. Research on the differences in phenotypic traits and nutritional composition of *Acer truncatum* Bunge seeds from various regions [J/OL]. Foods, 2023, 12(13): 2444 [2024-07-26]. <https://doi.org/10.3390/foods12132444>.
- [6] 李云志,曾凡骏,曾里.元宝枫的综合开发利用[J].食品与发酵工业,2004,30(6):90-94.
- [7] 李娟娟,樊金拴,魏伊楚,等.几种槭属植物的油脂营养成分分析[J].中国粮油学报,2018,33(5):55-59.
- [8] BI W, GAO Y, SHEN J, et al. Traditional uses, phytochemistry, and pharmacology of the genus *Acer* (maple): A review[J]. J Ethnopharmacol, 2016, 189: 31-60.
- [9] SINCLAIR A J, CRAWFORD M A. The accumulation of arachidonate and docosahexaenoate in the developing rat brain[J]. J Neurochem, 1972, 19(7): 1753-1758.
- [10] LIU F, WANG P, XIONG X, et al. A review of nervonic acid production in plants: Prospects for the genetic engineering of high nervonic acid cultivars plants[J/OL]. Front Plant Sci, 2021, 12: 626625 [2023-07-26]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.626625>.
- [11] YANG R, ZHANG L, LI P, et al. A review of chemical composition and nutritional properties of minor vegetable oils in China[J]. Trends Food Sci Technol, 2018, 74: 26-32.
- [12] 王性炎,王姝清.新资源食品:元宝枫籽油[J].中国油脂,2011,36(9):56-59.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 乔谦,丰震,任红剑,等.元宝枫种子含油率与脂肪酸组分株间变异及单株选择[J].中南林业科技大学学报,2018,38(2):76-82.
- [16] 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.
- [17] ZHANG K, HAN J, CHANG T, et al. Lipid and nutrient profile, and anti-alcohol evaluation of *Acer truncatum* Bunge seed extract[J]. J Food Nutr Res, 2023, 11(2): 136-143.
- [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.
- [19] 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.
- [20] 熊荟璇.五种油用玫瑰品种在湖南的生长表现及适应性评价[D].长沙:中南林业科技大学,2024.
- [21] 吴红,燕丽萍,李成忠,等.不同元宝枫优树含油率与脂肪酸含量分析[J].中南林业科技大学学报,2023,43(12):165-176.
- [22] 王因花,孔雨光,燕丽萍,等.山东省22份元宝枫种质资源含油率及脂肪酸组分分析[J].中南林业科技大学学报,2023,43(2):180-187.
- [23] 韩旻昊,任飞,燕丽萍,等.山东元宝枫天然种群种实的表型多样性[J].中南林业科技大学学报,2023,43(11):173-184,192.
- [24] 魏伊楚.不同产地元宝枫种实表型性状及化学成分研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [25] QIAO Q, WANG X, REN H, et al. Oil content and nervonic acid content of *Acer truncatum* seeds from 14 regions in China [J]. Horticult Plant J, 2019, 5(1): 24-30.
- [26] 冯继涛,段战歌,李宏伟,等.元宝枫特性及平原区栽培管理技术[J].中国园艺文摘,2017,33(5):101,119.
- [27] 梁慧珍,许兰杰,余永亮,等.红花籽油中脂肪酸组成评价与分析[J].食品科学,2021,42(6):244-249.