

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第8期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.08.004

论文标题： 科尔沁沙地92份元宝枫种仁油脂性状分析与油用优良单株筛选

作　　者： 鲁 敏，闫 婷，师鹏飞，等

收稿日期： 2025-07-31

引文格式： 鲁敏,闫婷,师鹏飞,等.科尔沁沙地92份元宝枫种仁油脂性状分析与油用优良单株筛选[J].中南林业科技大学学报,2026,46(8):37-45.

Lu M, Yan T, Shi P F, et al. Analysis of oil traits in 92 samples of *Acer truncatum* seeds from Horqin sandy land and screening of superior oil-related individuals[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(8):37-45.

相关论文推荐

Recommended articles

元宝枫组织培养与快速繁殖技术

Tissue culture and rapid propagation technology of *Acer truncatum*

山东元宝枫天然种群种实的表型多样性

Fruit and seed phenotypic diversity of natural populations of *Acer truncatum* in Shandong

不同元宝枫优树含油率与脂肪酸含量分析

Oil content and fatty acid composition of superior *Acer truncatum* trees

山东省22份元宝枫种质资源含油率及脂肪酸组分分析

Seed oil content and fatty acid composition analysis of 22 germplasm of *Acer truncatum* Bunge in Shandong Province

元宝枫种子含油率与脂肪酸组分株间变异及单株选择

Variation of seed oil content and fatty acid components among different individuals in *Acer truncatum*

北京低山区油松林和元宝枫林凋落物酶活性研究

Enzyme activities in litter of *Pinus tabulaeformis* and *Acer truncatum* forests in lower mountain area, Beijing

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.08.004
http: //qks.csuft.edu.cn

科尔沁沙地 92 份元宝枫种仁油脂性状分析与油用优良单株筛选

鲁　敏[1, 2]，闫　婷[1]，师鹏飞[1]，刘雪锋[1]，海　龙[1]，薄文浩[3]，杜庆章[3]，胡志伟[4]，张　佳[1]

（1. 内蒙古自治区林业科学研究院 a. 沙地生物资源保护与培育国家林业和草原局重点实验室；
b. 遗传育种研究所，内蒙古 呼和浩特 010010；2. 内蒙古达拉特荒漠生态系统国家定位观测研究站，
内蒙古 鄂尔多斯 014300；3. 北京林业大学 a. 林木育种与生态修复国家工程研究中心；
b. 生物科学与技术学院，北京 100083；4. 内蒙古赤峰市翁牛特旗林业和草原局，内蒙古 赤峰 024500）

摘　要：【目的】分析科尔沁沙地元宝枫种仁含油率和油脂组分的变异特征，筛选油用价值高的种质资源。【方法】以科尔沁沙地 3 个种源地采集的 92 株丰产母树种子为材料，测定种仁含油率及脂肪酸组分与含量，采用方差分析、相关性分析等方法分析油脂变异及其性状关联情况，采用层次分析法对优树油用性状进行综合评价。【结果】1）科尔沁沙地元宝枫丰产优树种仁平均含油率 46.07%，变异系数为 6.33%，遗传多样性指数为 2.05；2）油脂中检测出 14 种脂肪酸成分，其中亚油酸含量（33.76%）最高，花生二烯酸的变异系数（48.32%）最大，山嵛酸的遗传多样性指数（2.08）最大；3）油脂含量在居群间及居群内的方差分量百分比分别为 90.16%、9.476%，变异主要来源于居群间；14 个脂肪酸含量的表型分化系数为 4.484% ～ 95.198%，其中神经酸含量表型分化系数最大，花生酸含量表型分化系数最小；4）相关性分析结果表明，油脂含量与花生一烯酸、硬脂酸含量存在极显著正相关关系（$P < 0.01$），与神经酸呈极显著负相关（$P < 0.01$），各脂肪酸成分间存在复杂的相关关系；5）层次分析结果显示，种仁油脂含量权重值为 0.286，综合权重排名第一，脂肪酸组分中的神经酸综合权重最高（0.215），92 份元宝枫优良单株的综合得分为 0.320 ～ 0.611。【结论】科尔沁沙地元宝枫油脂性状遗传多样性丰富，具有油用种质筛选的物质基础。此外，油脂及神经酸含量在不同优树间遗传差异显著，为定向选育高含油、高神经酸含量品种提供了可能。CF-6、XA-18、XA-11、CF-11、XA-20 的种仁含油率及主要脂肪酸组分含量均处于领先地位，可为元宝枫后续油用优良品种选育提供优质的种质资源。

关键词：科尔沁沙地；元宝枫；油脂；脂肪酸；层次分析法；综合评价

中图分类号：S794.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)08-0037-09

Analysis of oil traits in 92 samples of *Acer truncatum* seeds from Horqin sandy land and screening of superior oil-related individuals

Lu Min[1,2], Yan Ting[1], Shi Pengfei[1], Liu Xuefeng[1], Hai Long[1], Bo Wenhao[3], Du Qingzhang[3], Hu Zhiwei[4], Zhang Jia[1]

(1.a. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Sandy Biological Resources Conservation, Cultivation and Utilization; b.Institute of Genetics and Breeding, Inner Mongolia Academy of Forestry Sciences, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Dalate Desert Ecosystem Observation and Research Station, Ordos 014300, Inner Mongolia, China; 3.a. National Engineering Research Center of Tree Breeding and Ecological Restoration; b.School of Biological Sciences and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 4. Forestry and Grassland Bureau of Onniute Banner, Chifeng 024500, Inner Mongolia, China)

Abstract:【Objective】To analyze the variation in oil yield and oil component composition of *Acer truncatum* seed kernels from Horqin sandy land, and to screen for germplasm resources with high oil value.【Method】This study takes seeds from 92 high-yielding mother trees collected from three provenances in Horqin sandy land as the research subjects. Oil extraction and determination, as

收稿日期（Received）：2025-07-31　　**修订日期**（Revised）：2025-10-09

基金项目：林木遗传育种全国重点实验室（北京林业大学）开放课题基金（2024KFKT03）；内蒙古自治区林业科学研究院科研能力提升“揭榜挂帅”项目（2024NLTS02）；内蒙古自治区林业科学研究院种质资源保护项目（126002005）。

第一作者：鲁敏（lumin-119@163.com），副研究员，博士。　　**通信作者：**闫婷（nmgyanting@163.com），副研究员，博士。

引文格式：鲁敏 , 闫婷 , 师鹏飞 , 等 . 科尔沁沙地 92 份元宝枫种仁油脂性状分析与油用优良单株筛选 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026, 46(8):37-45.

Lu M, Yan T, Shi P F, et al. Analysis of oil traits in 92 samples of *Acer truncatum* seeds from Horqin sandy land and screening of superior oil-related individuals[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(8):37-45.

* 本文为第二十八届中国科协年会学术论文成果。

Academic Papers of the 28th Annual Meeting of the China Association for Science and Technology.

well as fatty acid component and content determination, were performed. Variance analysis and correlation analysis were employed to investigate the variation in oil traits and the associations among different traits. The analytic hierarchy process (AHP) was used to conduct a comprehensive evaluation of the oil-related traits of superior trees.【Result】1) The average oil content of the seed kernels of high-yielding superior trees of *A. truncatum* in Horqin Sandy Land was 46.07%, with a coefficient of variation of 6.33% and a genetic diversity index of 2.05; 2) A total of 14 fatty acid components were detected in the oils, among which linoleic acid had the highest content (33.76%), arachidonic acid had the largest coefficient of variation (48.32%), and behenic acid had the highest genetic diversity index (2.08); 3) The variance component percentage of oil content among populations and within populations was 90.16% and 9.476%, respectively, indicating that the variation mainly originated from among populations. The phenotypic differentiation coefficients for the 14 fatty acid contents ranged from 4.484% to 95.198%, with the highest coefficient observed for nervonic acid and the lowest for arachidic acid; 4) Correlation analysis indicated that oil content was significantly positively correlated with the content of arachidonic acid and stearic acid ($P < 0.01$), and significantly negatively correlated with the content of nervonic acid ($P < 0.01$). There are also complex correlations among the different fatty acid components; 5) The results of the AHP showed that the weight value of seed kernel oil content was 0.286, ranking first in comprehensive weight; among the fatty acid compositions, nervonic acid had the highest comprehensive weight (0.215). The comprehensive scores of the 92 superior individuals of *A. truncatum* ranged from 0.320 to 0.611.【Conclusion】The genetic diversity of *A. truncatum* oils in Horqin sandy land is rich, providing a material basis for the screening of oil germplasm resources; Moreover, the genetic differences in oil and nervonic acid content among different superior trees are significant, which provides the possibility for the targeted breeding of varieties with high oil and high nervonic acid content; Preliminary screening identified that the seed kernel oil content and the content of major fatty acid components in CF-6, XA-18, XA-11, CF-11, and XA-20 were all at the forefront. These strains can provide high-quality germplasm resources for the subsequent breeding of oil-related superior.
Keywords: Horqin sandy land; *Acer truncatum*; oil; fatty acids; analytic hierarchy process; comprehensive evaluation

我国是食用油消费大国，2024 年进口食用油 951 万 t，其中高端油料油脂的进口额持续攀升 [1]。木本油料作为高端优质食用油资源的重要补充，其资源的开发利用已被提升至国家战略层面。国家先后出台《关于批准元宝枫籽油和牡丹籽油作为新资源食品的公告》（卫生部公告 2011 年第 9 号）、《关于加快木本油料产业发展的意见》（国办发〔2014〕68 号）、《全国沙产业发展指南》（林沙发〔2022〕9 号）等一系列政策文件，推动木本油料等高端植物油的种植与产业化发展。

元宝枫 *Acer truncatum* Bunge 又名元宝槭，隶属无患子科槭属，是我国特有的多功能木本油料树种 [2-3]。元宝枫种仁的油脂含量高，油脂中不饱和脂肪酸占比超 90%[4]，亚油酸等人体必需脂肪酸含量丰富 [5]，神经酸含量高，具有修复受损大脑神经纤维、促进神经细胞再生等功能，是一种极具开发潜力的高端功能性植物油脂 [6-7]。此外，元宝枫适应范围广、抗逆性强 [8]，木材质优，叶片可用于制茶，是干旱半干旱地区生态修复、经济林营建的重要乡土树种 [9]。内蒙古、甘肃等地区已将元宝枫作为重点木本油料树种纳入林业生态工程与产业发展规划 [10]。近年来，随着天然植物油脂的营养价值与功能性成分研究的不断深入，元宝枫种仁油凭借其独特的脂肪酸组成及潜在的健康功效 [11-12]，已成为木本油料研究领域的热点。

内蒙古科尔沁沙地分布着大面积的天然元宝枫资源 [13-14]，该区域的元宝枫自然类型多样、遗传变异丰富，为筛选高油脂含量、高特异功能性组分的优良品种提供了重要的种质基础。陕西、云南等地区的元宝枫种仁研究结果表明 [15]，种仁含油量受种质特性、生长环境及发育阶段影响，且不同单株间脂肪酸组分存在显著差异。然而，目前针对内蒙古地区元宝枫资源的研究，多集中在苗木繁育、营养成分、油用价值、园林观赏等方面 [16-19]，对其油脂品质缺乏系统分析与综合评价，一定程度上制约了该区域元宝枫资源的定向驯化、良种选育及产业化利用。为此，本研究以科尔沁沙地筛选出的 92 份具丰产特性的优树为试验材料，系统测定油脂含量及 14 个脂肪酸成分指标，分析不同优树间油脂品质的遗传变异特征，明确各油脂性状指标间的相关性；同时，采用层次分析法构建各指标的权重体系，结合各指标得分与权重对油脂品质进行综合评价。本研究旨在明晰科尔沁沙地元宝枫不同种质间的油脂品质差异，筛选出综合品质优良的核心种质，为该区域元宝枫的品种选育与资源高效利用提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2022—2024 年，对内蒙古科尔沁沙地的元宝枫主要自然分布区开展实地踏查，将丰产性高、生长健壮、无病虫害的初选优株进行标记，连续观察结实量；优株调查过程中需保证单株间距离大于 50 m（避免母系遗传），记录标记母树的地

理坐标及生境信息。2024 年 10 月，翅果由绿色变为黄褐色时进行采收，从每株采种母树的东南西北不同方位分别采集翅果，混合装于网袋并编号记录。将采集的种子晾晒 3 ～ 5 d，去除杂质，保存于阴凉、通风、干燥处备用。各居群自然概况及采集数量见表 1。

表 1　科尔沁沙地元宝枫资源采集的种源地信息

Table 1　Collection resource information of *A. truncatum* in the Horqin sandy land

编号 Serial No.	采集地 Collection site	生境描述 Habitat description	地理坐标 Coordinates	采集数量 Samples number / 株	平均海拔 Average elevation / m	年平均气温 Average annual temperature / ℃	年平均降水量 Average annual precipitation / mm	无霜期 Frost-free period /d
XA	兴安盟巴彦胡硕镇	科尔沁沙地北缘，大兴安岭向科尔沁沙地过渡半干旱疏林草原	121°05′ ～ 121°34′E 45°07′ ～ 45°14′N	24	321	5.2	383	138
CF	赤峰市翁牛特旗	科尔沁沙地西缘，半干旱典型草原	119°14′ ～ 119°32′E 42°50′ ～ 43°13′N	39	648	6.2	351	145
TL	通辽市科左后旗	科尔沁沙地东南缘，温带阔叶落叶林	122°41′ ～ 122°48′E 42°57″ ～ 43°01′N	29	219	5.6	450	145

1.2　试验方法

选取各采集单株饱满且无病虫害的果实各 15 g，经脱壳、去皮处理后获取种仁，将种仁粉碎后过 0.425 mm 孔径筛，重复 3 次，保证样品粒径均一。

1.2.1　油脂提取与测定

油脂提取参考 GB5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中的索氏抽提法。称取 5 g（精确至 0.1 mg）种仁粉末，滤纸包裹后置于索氏抽提器的抽提筒内，加入石油醚，60 ℃水浴回流抽提 8 h，水浴蒸干，置于（100±5）℃干燥至恒质量，测定样品提取前后的质量。

1.2.2　脂肪酸组分及含量测定

将样品种仁中的脂肪经石油醚提取后，在碱性条件下依次进行皂化和甲酯化反应，生成脂肪酸甲酯。使用气相色谱仪（Agilent 8890）进行脂肪酸组成分析，通过安捷伦化学工作站对数据进行处理，以保留时间作为定性依据，采用面积归一化法定量计算各脂肪酸含量。

气相色谱仪分析条件：毛细管色谱柱为 HP-INNOWAX 柱 (100 m×0.25 mm×0.20 μm)；载气为高纯氮气，分流比为 100∶1，流速 1.0 mL/min；进样口温度 220 ℃，检测器温度 275 ℃。升温程序为：初始温度 140 ℃保持 2 min，以 4 ℃ /min 升至 250 ℃，保持 5 min，进样量为 1 μL。

1.2.3　油脂含量及脂肪酸组分层次分析及综合评价

利用层次分析法（AHP）对元宝枫油脂含量及脂肪酸组成进行权重赋值，构建元宝枫种仁油用价值的综合评价体系。构建目标层（元宝枫种仁综合利用价值）、准则层（油脂总量、脂肪酸组成）、指标层（具体油脂及脂肪酸含量）的层次结构模型。采用 Saaty[20] 的 1 ～ 9 标度赋值法（即不同指标的重要程度用 1 ～ 9 的整数表示），邀请 7 位同行专家对元宝枫油脂各性状指标进行打分，结合专家打分情况，构建矩阵并进行一致性检验，计算各指标综合权重。

1.3　数据统计与分析

采用 Excel 2021 软件进行数据统计、常规分析与遗传多样性指数计算，运用 SPSS 23.0 软件进行方差分析、表型分化系数 [21] 计算、显著性检验与因子分析，采用 Origin 2021 软件进行相关性分析制图。通过层次分析法确定各性状指标的权重系数，结合隶属函数计算单株的综合评价得分。本研究含油率、遗传多样性指数、隶属函数值及综合评价值的计算公式均参考文献 [22-24]。

2　结果与分析

2.1　油脂含量及脂肪酸组分遗传多样性分析

由表 2 可知，科尔沁沙地筛选的元宝枫丰产优树种仁含油率为 38.53% ～ 52.40%，平均含油率 46.07%，变异系数为 6.33%，遗传多样性指数为 2.05，表明科尔沁沙地分布的元宝枫资源油脂含量高，且遗传多样性丰富。

科尔沁沙地元宝枫种仁油脂中检测出 14 种脂肪酸成分，各脂肪酸平均含量由高到低依次为亚油酸（33.76%）、油酸（26.03%）、芥酸（15.67%）、花生一烯酸（8.12%）、神经酸（5.40%）、棕榈酸（4.25%）、硬脂酸（2.38%）、α- 亚麻酸（1.74%）、γ- 亚麻酸（0.92%）、山嵛酸（0.77%）、花生二烯酸（0.33%）、木焦油酸（0.31%）、花生酸（0.25%）、

棕榈烯酸（0.09%）。92 份种质资源的脂肪酸组分变异系数为 3.18% ～ 48.32%，遗传多样性指数为 1.13 ～ 2.08。其中，变异系数最大的是花生二烯酸（48.32%），最小的是花生一烯酸（3.18%）。山嵛酸的遗传多样性指数最大（2.08），其次是棕榈烯酸及木焦油酸（2.05）、硬脂酸（2.03）、棕榈酸（2.01）、神经酸及 α- 亚麻酸（2.00），花生二烯酸的遗传多样性指数最小（1.13）。研究结果表明，科尔沁沙地元宝枫种质在脂肪酸含量方面变异类型丰富多样，具有较高的开发利用潜力。

表 2 科尔沁沙地元宝枫种仁油脂和脂肪酸含量的变异性及遗传多样性分析

Table 2 Variability and genetic diversity analysis of oil and fatty acid content of *A. truncatum* seed kernels in the Horqin sandy land

性状指标 Trait	含量 Content /%				变异系数 Coefficient of variation /%	遗传多样性指数 Genetic diversity index
	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 Standard deviation		
油脂 Oil	38.53	52.40	46.07	2.93	6.33	2.05
亚油酸 Linoleic acid	28.40	36.80	33.76	1.38	4.09	1.94
油酸 Oleic acid	23.00	33.03	26.03	2.03	7.82	1.86
芥酸 Erucic acid	11.23	17.53	15.67	1.22	7.72	1.89
花生一烯酸 Cis-11-Eicosenoic acid	7.57	8.77	8.12	0.26	3.18	1.98
神经酸 Nervonic acid	3.20	7.15	5.40	0.75	13.81	2.00
棕榈酸 Palmitic acid	3.37	5.27	4.25	0.34	8.01	2.01
硬脂酸 Stearic acid	1.95	2.98	2.38	0.20	8.45	2.03
α- 亚麻酸 α-linolenic acid	0.90	2.99	1.74	0.47	26.65	2.00
γ- 亚麻酸 γ-linolenic acid	0.44	1.83	0.92	0.28	30.27	1.94
花生二烯酸 Cis-11,14-Eicosadienoic acid	0.21	1.10	0.33	0.16	48.32	1.13
山嵛酸 Behenic acid	0.57	0.93	0.77	0.08	9.80	2.08
木焦油酸 Wood tar oleic acid	0.20	0.41	0.31	0.04	14.30	2.05
花生酸 Arachidic acid	0.19	0.59	0.25	0.04	16.74	1.56
棕榈烯酸 Palmitoleic acid	0.04	0.17	0.09	0.03	29.81	2.05

2.2 油脂及脂肪酸含量在居群间的分化

由表 3 可以看出，油脂含量在居群间及居群内的方差分量百分比分别为 90.160%、9.476%。14 种脂肪酸含量在居群间的方差分量百分比为 24.160% ～ 97.159%，居群内的方差分量百分比为 2.390% ～ 26.923%。居群间方差分量百分比平均值（75.808%）高于居群内（13.378%），表明油脂及脂肪酸含量的变异主要来源于居群间。油脂及 14 个脂肪酸含量的表型分化系数为 4.484% ～ 95.198%，平均值为 67.648%。其中，花生一烯酸含量的表型分化系数最高，花生酸含量的表型分化系数最小。油脂及脂肪酸含量的丰富变异为油用品种选育提供了资源基础。

2.3 油脂含量及脂肪酸各组分的相关性分析

油脂含量与各脂肪酸组分含量的相关性分析结果显示（图 1），油脂含量与花生一烯酸、硬脂酸含量存在极显著正相关（$P < 0.01$），与神经酸存在极显著负相关（$P < 0.01$）。各脂肪酸成分间存在复杂的相互影响关系，其中山嵛酸、芥酸、神经酸、木焦油酸之间均呈极显著正相关（$P < 0.01$），亚油酸与油酸、花生一烯酸，芥酸与花生一烯酸、油酸呈极显著负相关（$P < 0.01$），神经酸、芥酸均与油酸、花生一烯酸、棕榈酸、硬脂酸、棕榈烯酸呈极显著负相关（$P < 0.01$），山嵛酸、木焦油酸均与油酸、花生一烯酸、棕榈酸呈极显著负相关（$P < 0.01$），γ- 亚麻酸与芥酸、神经酸呈显著负相关（$P < 0.05$），花生二烯酸与芥酸、神经酸呈显著正相关（$P < 0.05$）。

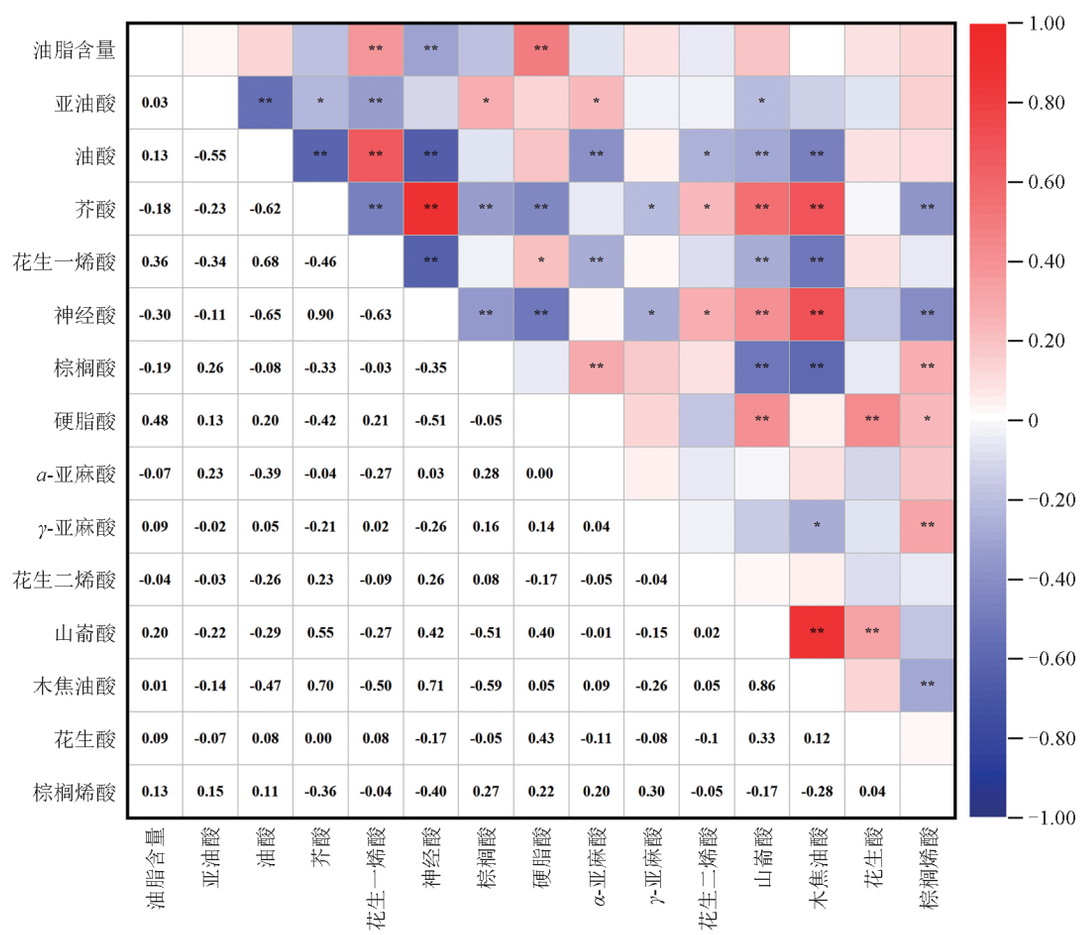
2.4 油脂含量及脂肪酸组分层次分析及综合评价

由表 4 可知，种仁油脂含量权重值为 0.286，综合权重排名第一，表明油脂含量是元宝枫油最基本的特性之一，直接影响元宝枫油的产量和提取加工的经济效益。在脂肪酸组成中，神经酸的综合权重最高，为 0.215，其他脂肪酸的综合权重值从大到小依次为油酸（0.144）、亚油酸（0.094）、α- 亚麻酸（0.058）、花生一烯酸（0.043）、芥酸（0.040）、棕榈酸（0.027）、硬脂酸（0.024）。不常见脂肪酸（γ- 亚麻酸、山嵛酸、花生二烯酸、木焦油酸、花生酸、棕榈烯酸）在元宝枫油中的占比较低，且其对健康和功能的影响尚未得到充分研究，因此综合权重较低，均小于 0.02。脂肪酸各组

表 3　科尔沁沙地元宝枫种仁油脂性状的方差分量及表型分化系数

Table 3　Variance components and phenotypic differentiation coefficients of *A. truncatum* seed kernels oil traits in the Horqin sandy land

性状指标 Trait	方差分量 Variance component			方差分量百分比 Variance component percentage /%			表型分化系数 Phenotype differentiation coefficient /%
	居群间 Among populations	居群内 Within populations	随机误差 Random error	居群间 Among populations	居群内 Within populations	随机误差 Random error	
油脂含量 Oil content	68.565	7.207	0.277	90.160	9.476	0.364	80.978
亚油酸 Linoleic acid	4.841	1.835	0.140	71.028	26.923	2.049	45.028
油酸 Oleic acid	19.300	3.794	0.201	82.851	16.287	0.862	67.142
芥酸 Erucic acid	24.575	0.959	0.101	95.864	3.742	0.394	92.487
花生一烯酸 Cis-11-Eicosenoic acid	0.323	0.060	0.025	79.088	14.722	6.190	68.614
神经酸 Nervonic acid	12.132	0.298	0.056	97.159	2.390	0.451	95.198
棕榈酸 Palmitic acid	0.487	0.106	0.034	77.673	16.963	5.364	64.152
硬脂酸 Stearic acid	0.351	0.034	0.019	86.900	8.398	4.703	82.376
α- 亚麻酸 α-linolenic acid	0.776	0.205	0.047	75.517	19.941	4.542	58.219
γ- 亚麻酸 γ-linolenic acid	0.264	0.072	0.028	72.510	19.873	7.617	56.977
花生二烯酸 Cis-11,14-Eicosadienoic acid	0.221	0.021	0.015	85.802	8.333	5.865	82.296
山嵛酸 Behenic acid	0.017	0.005	0.008	56.665	18.076	25.260	51.631
木焦油酸 Wood tar oleic acid	0.018	0.002	0.004	75.982	6.705	17.313	83.783
花生酸 Arachidic acid	0.002	0.002	0.004	24.160	22.086	53.754	4.484
棕榈烯酸 Palmitoleic acid	0.006	0.001	0.003	65.754	6.762	27.485	81.351
平均值 Average				75.808	13.378	10.814	67.648



* 表示在 0.05 水平上显著相关，** 表示在 0.01 水平上极显著相关。

* indicates significant correlation at $P < 0.05$, and ** indicates highly significant correlation at $P < 0.01$.

图 1　科尔沁沙地元宝枫种仁油脂含量与脂肪酸各组分的相关性分析

Fig. 1　Correlation analysis between oil content and fatty acid components of *A. truncatum* seed kernels in the Horqin sandy land

表 4 科尔沁沙地元宝枫种仁油脂含量及脂肪酸组分各层次权重值及一致性检验

Table 4 Hierarchical weights and consistency test of oil content and fatty acid components of *A. truncatum* seed kernels in the Horqin sandy land

元宝枫种仁综合油用价值 Criterion layer	权重 Weight	指标层 Indicator layer	权重 Weight	一致性检验 Consistency check	综合权重 Comprehensive weight
油脂总量 Total oil content	0.286	种仁油脂含量	1.000	0.000 ＜ 0.1	0.286
脂肪酸组分 Fatty acid composition	0.714	神经酸	0.301	0.099 ＜ 0.1	0.215
		油酸	0.202		0.144
		亚油酸	0.131		0.094
		α- 亚麻酸	0.081		0.058
		花生一烯酸	0.060		0.043
		芥酸	0.056		0.040
		棕榈酸	0.038		0.027
		硬脂酸	0.033		0.024
		γ- 亚麻酸	0.023		0.016
		山嵛酸	0.020		0.014
		花生二烯酸	0.017		0.012
		木焦油酸	0.013		0.009
		花生酸	0.012		0.009
		棕榈烯酸	0.013		0.009

分综合权重值的差异，进一步反映出各组分在元宝枫种仁油用综合利用价值中的贡献程度不同。

通过层次分析法确定各指标权重系数，运用隶属函数法计算得到各单株的综合评价值（表 5）。结果表明，92 份元宝枫优良单株的综合得分为 0.320 ～ 0.611，其中 CF-6、XA-18、XA-11、CF-11、XA-20 综合得分值排名前 5，初步确定为油用价值较高的优良单株。

3 讨 论

种质资源作为生物遗传多样性的重要载体，是开展育种研究与品种创新的物质基础 [25]。对不同种质资源开展评价分析，是育种研究工作的重要内容，也是资源开发利用的关键环节。近年来，有研究者基于叶片、果实等性状，对山东、江苏、陕西等地区的元宝枫种质资源的遗传多样性进行了深入研究 [26]，为元宝枫资源的保护、评价及创新利用奠定了基础。本研究结果表明，科尔沁沙地 92 份元宝枫优树的种仁平均油脂含量为 46.07%，个体间存在丰富的遗传多样性，该结果比山东、江苏、河北等地区的元宝枫资源油脂含量更高 [27]，可能与科尔沁沙地独特的干旱半干旱气候特征以及沙性土壤条件等生境因素相关。由于含油率易受立地条件、气候因素等影响 [28]，推测科尔沁沙地的逆境环境对植物脂质合成与逆境应答存在正向调控作用 [29-30]，从而有效提高了植物抗旱能力。本研究中元宝枫含油率变异主要来源于居群间，进一步表明该群体的遗传变异程度较高，为油用品种筛选提供了丰富的遗传基础，因此在油用优良单株筛选与品种选育时，应关注元宝枫的遗传潜力与价值。此外，脂肪酸中神经酸含量的表型分化系数最高，表明该成分在不同优树间的遗传差异显著，这一结论也为定向选育高神经酸含量的品种提供了可能。

对种仁油脂性状进行相关性分析，能够系统揭示油脂成分间的内在关联规律，明确各性状间的协同或拮抗关系，为油用品种选育提供针对性指导。本研究结果表明，元宝枫的油脂含量与花生一烯酸、硬脂酸呈极显著正相关，与神经酸极显著负相关，这一结论与韩旻昊等 [31] 的研究结果一致，进一步说明在元宝枫油用品种选育过程中，较难选育出同时兼顾高油含量与高神经酸含量的品种，需根据不同育种目标筛选具备特定油脂功能成分的品种。脂肪酸组分间的相关性结果显示，各组分间存在着复杂的遗传调控网络。因此，在后续研究中有必要从转录调控、代谢通路等层面深入解析关键油脂性状的遗传机制，为元宝枫油用品种改良提供理论依据。

科学的评价方法是筛选林木种质优异资源的重要手段。目前，元宝枫的油用品质评价主要采用主成分分析、隶属函数分析等方法 [32]。由于元宝枫油脂与脂肪酸组分之间存在复杂的相互关联与制约关系 [33]，因此，有必要根据生产实际需求，建立更科学、更贴合产业需求的油用价值综合评价方法。本研究基于层次分析法 [34] 构建权重体系，其中种仁油脂含量权重为 0.286，神经酸含量权重

表 5　科尔沁沙地 92 份元宝枫单株油脂品质综合评价得分

Table 5　Comprehensive evaluation scores of the oil quality of 92 individual *A. truncatum* samples from the Horqin sandy land

编号 No.	综合评价得分 Comprehensive evaluation score	排名 Rank	编号 No.	综合评价得分 Comprehensive evaluation score	排名 Rank	编号 No.	综合评价得分 Comprehensive evaluation score	排名 Rank
XA-1	0.483	52	CF-8	0.523	36	CF-39	0.464	62
XA-2	0.445	73	CF-9	0.477	54	TL-1	0.353	91
XA-3	0.459	68	CF-10	0.520	37	TL-2	0.411	84
XA-4	0.457	70	CF-11	0.601	4	TL-3	0.411	84
XA-5	0.427	78	CF-12	0.563	13	TL-4	0.390	88
XA-6	0.580	9	CF-13	0.506	42	TL-5	0.539	27
XA-7	0.450	71	CF-14	0.532	28	TL-6	0.462	65
XA-8	0.497	45	CF-15	0.509	40	TL-7	0.432	76
XA-9	0.495	46	CF-16	0.532	28	TL-8	0.478	53
XA-10	0.467	60	CF-17	0.566	12	TL-9	0.320	92
XA-11	0.602	3	CF-18	0.573	10	TL-10	0.448	72
XA-12	0.554	18	CF-19	0.542	26	TL-11	0.563	13
XA-13	0.517	38	CF-20	0.543	25	TL-12	0.356	90
XA-14	0.463	64	CF-21	0.466	61	TL-13	0.551	21
XA-15	0.553	19	CF-22	0.511	39	TL-14	0.492	47
XA-16	0.526	33	CF-23	0.509	40	TL-15	0.461	67
XA-17	0.593	6	CF-24	0.529	31	TL-16	0.506	42
XA-18	0.608	2	CF-25	0.442	75	TL-17	0.458	69
XA-19	0.584	8	CF-26	0.368	89	TL-18	0.418	80
XA-20	0.599	5	CF-27	0.468	58	TL-19	0.476	55
XA-21	0.471	56	CF-28	0.587	7	TL-20	0.443	74
XA-22	0.548	22	CF-29	0.470	57	TL-21	0.546	24
XA-23	0.548	22	CF-30	0.503	44	TL-22	0.492	47
XA-24	0.562	15	CF-31	0.411	84	TL-23	0.531	30
CF-1	0.525	34	CF-32	0.485	51	TL-24	0.525	34
CF-2	0.553	19	CF-33	0.417	81	TL-25	0.527	32
CF-3	0.561	16	CF-34	0.462	65	TL-26	0.464	62
CF-4	0.487	50	CF-35	0.397	87	TL-27	0.468	58
CF-5	0.428	77	CF-36	0.425	79	TL-28	0.417	81
CF-6	0.611	1	CF-37	0.416	83	TL-29	0.492	47
CF-7	0.572	11	CF-38	0.559	17			

为 0.215，二者在评价体系中占主导地位。其中，油脂含量直接影响元宝枫油籽的产量，神经酸则是提升产品经济价值的关键成分，与元宝枫油用价值的核心属性匹配度较高。根据综合评价结果，本研究筛选出 CF-6、XA-18、XA-11、CF-11、XA-20 等排名靠前的高油用价值单株，其种仁含油率及主要脂肪酸组分含量均表现优良。筛选出的优良单株可为元宝枫油用良种选育提供优质种质材料，也为科尔沁沙地元宝枫资源的后续产业化利用奠定了基础。

4　结　论

本研究对内蒙古科尔沁沙地 92 份丰产元宝枫种仁油脂进行测定分析，结果表明：元宝枫丰产优树的种仁平均含油率为 46.07%，从油脂中共检测出 14 种脂肪酸成分，其中亚油酸含量（33.76%）最高。14 种脂肪酸含量的表型分化系数为 4.484% ～ 95.198%，其中神经酸含量的表型分化系数最高，表明神经酸成分在不同优树间的遗传差异显著。相关性分析表明，油脂含量与神经酸含量呈极显著负相关，进一步提示生产中需要根据实际需求选育具有不同营养功能的油用品种。本研究初步筛选出了种仁含油率及主要脂肪酸组分表现优异的单株，编号分别为 CF-6、XA-18、XA-11、CF-11、XA-20，可为后续不同价值方向的元宝枫油用品种选育提供育种材料。

参考文献：

[1] 王瑞元 .2022 年我国粮油产销和进出口情况 [J]. 中国油脂 , 2023,48(6):1-7.
Wang R Y. Introduction of grain and oil production, marketing, import and export in 2022 in China[J]. China Oils and Fats,2023, 48(6):1-7.

[2] 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.

[3] 马建文 , 顾锡亭 , 王珊 , 等 . 元宝枫 KCS 基因家族的鉴定及时空表达分析 [J]. 经济林研究 ,2022,40(2):201-214.
Ma J W, Gu X T, Wang S, et al. Identification and spatio-temporal expression profiles of the KCS gene family in *Acer truncatum*[J]. Non-wood Forest Research,2022,40(2):201-214.

[4] 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 prospect of *Acer truncatum* Bunge seed oil rich in nervonic acid in China[J]. China Oils and Fats,2018,43(12):93-95,104.

[5] 刘祥义 , 付惠 , 陈玉惠 . 元宝枫油理化特性及脂肪酸组成研究 [J]. 中国油脂 ,2003,28(3):66-67.
Liu X Y, Fu H, Chen Y H. Study on the physico-chemical properties and fatty acid composition of *Acer truncatum* Bunge oil[J]. China Oils and Fats,2003,28(3):66-67.

[6] 王性炎 , 樊金栓 , 王姝清 . 中国含神经酸植物开发利用研究 [J]. 中国油脂 ,2006,31(3):69-71.
Wang X Y, Fan J S, Wang S Q. Development situation and outlook of nervonic acid plants in China[J]. China Oils and Fats, 2006,31(3):69-71.

[7] Li X, Li T, Hong X Y, et al. *Acer truncatum* seed oil alleviates learning and memory impairments of aging mice[J]. Frontiers in Cell and Developmental Biology,2021,9:680386.

[8] 王性炎 . 中国元宝枫 [M]. 杨凌 : 西北农林科技大学出版社 , 2013:41-43.
Wang X Y. *Acer truncatum* in China[M]. Yangling: Northwest A & F University Press,2013:41-43.

[9] 杨继平 , 封加平 , 陈圣林 , 等 . 关于元宝枫产业发展的调研报告 [J]. 中国林业产业 ,2021(5):5-13.
Yang J P, Feng J P, Chen S L, et al. Investigation report on *Acer truncatum* industry development[J]. China Forestry Industry, 2021(5):5-13.

[10] 刘怡彤 . 基于 MaxEnt 模型的天然元宝枫在不同气候背景下的潜在适生区研究 [D]. 北京 : 中国林业科学研究院 ,2022:1-6.
Liu Y T. Simulating the potential suitable habitats of natural *Acer truncatum* in different climate background based on MaxEnt model[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry,2022:1-6.

[11] 刘晓悦 , 王盼娣 , 熊小娟 , 等 . 油料作物种子中神经酸含量提升研究进展 [J]. 华中农业大学学报 ,2024,43(2):64-74.
Liu X Y, Wang P D, Xiong X J, et al. Progress on improving content of nervonic acid in seeds of cruciferous oil crops[J]. Journal of Huazhong Agricultural University,2024,43(2):64-74.

[12] 冉娴婷 . 元宝枫籽油产品研发及其改善记忆功能评价 [D]. 贵阳 : 贵州大学 ,2024:78-79.
Ran X T. Research and development of *Acer truncatum* seed oil products and evaluation of their memory-improving function[D]. Guiyang: Guizhou University,2024:78-79.

[13] 王性炎 . 科尔沁沙地元宝枫林亟待保护 [J]. 中国林业 , 2004(22):37.
Wang X Y. The *Acer truncatum* maple forest in Horqin sandy land needs urgent protection[J]. Forestry of China,2004(22):37.

[14] 王雨晴 , 吴莎 , 许言 , 等 . 科尔沁沙地不同种源元宝枫功能性状变异及其环境驱动因子研究 [J]. 西北植物学报 ,2024,44(2): 300-309.
Wang Y Q, Wu S, Xu Y, et al. Study on the variation of functional traits and environmental driving factors of different species origins of *Acer truncatum* in the Horqin sandy land[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2024,44(2):300-309.

[15] 畅盼 , 顾锡亭 , 马建文 , 等 . 油用型元宝枫果实发育过程中油脂积累动态研究 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2022,50(10):57-67,77.
Chang P, Gu X T, Ma J W, et al. Dynamics of oil and fatty acid accumulation during fruit development of *Acer truncatum* Bunge used for oil[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition),2022,50(10):57-67,77.

[16] 郑广顺 , 孟会静 , 刁科豪 , 等 . 元宝枫古树组织培养快速繁殖体系研究 [J]. 温带林业研究 ,2023,6(1):24-28.
Zheng G S, Meng H J, Diao K H, et al. Research on tissue culture and rapid propagation system of *Acer truncatum* ancient tree[J]. Journal of Temperate Forestry Research,2023,6(1):24-28.

[17] 包哈森高娃 , 白雪峰 , 吴志萍 , 等 . 乌旦塔拉元宝枫种仁营养成分及其含量特征 [J]. 林业科技 ,2025,50(2):8-13.
Bao H S G W, Bai X F,Wu Z P, et al. Seed nutritional composition and content characteristics of *Acer truncatum* Bunge in Wudantala[J]. Forestry Science& Technology,2025,50(2):8-13.

[18] 闫婷 , 鲁敏 , 孟显悦 , 等 . 代钦塔拉自然保护区元宝枫不同年龄古树种子含油特征的研究 [J]. 中国粮油学报 ,2024,39(6): 146-150.
Yan T, Lu M, Meng X Y, et al. Fatty acid content of purpleblow maple difference ages ancient trees kernel in Daiqintala nature

reserve[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024,39(6):146-150.

[19] 张越 . 元宝枫种源变异及叶用类型评选 [D]. 杨凌 : 西北农林科技大学 ,2024:1-3.
Zhang Y. Provenance variation and leaf section selection of *Acer truncatum*[D]. Yangling: Northwest A & F University,2024: 1-3.

[20] Saaty T L. The analytic hierarchy process[M]. New York: McGraw-Hill International Book Co,1980:18-24.

[21] 刘倩 , 张鸿翎 , 白淑兰 , 等 . 内蒙古 12 个天然五角枫种群的表型多样性 [J]. 经济林研究 ,2025,43(2):184-194.
Liu Q, Zhang H L, Bai S L, et al. Phenotypic diversity of 12 natural populations *Acer pictum* in Inner Mongolia[J]. Non-wood Forest Research,2025,43(2):184-194.

[22] 乔谦 , 丰震 , 任红剑 , 等 . 元宝枫天然种群种实表型多样性 [J]. 生态学杂志 ,2017,36(10):2707-2715.
Qiao Q, Feng Z, Ren H J, et al. Phenotypic diversity of wing fruits and seeds in natural populations of *Acer truncatum* Bunge in China[J]. Chinese Journal of Ecology,2017,36(10):2707-2715.

[23] 马兆阳 , 杨玉莹 , 曹云娥 , 等 . 基于隶属函数法的陕西关中地区大棚黄瓜品种综合评价 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2025,53(3):36-48.
Ma Z Y, Yang Y Y, Cao Y E, et al. A comprehensive evaluation of cucumber cultivars in plastic tunnel in Guanzhong area of Shaanxi Province based on membership function method[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2025,53(3):36-48.

[24] 鲁敏 , 师鹏飞 , 刘雪锋 , 等 . 内蒙古酸枣自然居群果实性状变异分析及仁用种质综合评价筛选 [J]. 植物遗传资源学报 , 2024,25(8):1309-1320.
Lu M, Shi P F, Liu X F, et al. Fruit phenotypic traits diversity analysis and kernel-using germplasm evaluation of jujube natural population in Inner Mongolia[J]. Journal of Plant Genetic Resources,2024,25(8):1309-1320.

[25] 刘旭 , 李立会 , 黎裕 , 等 . 作物种质资源研究回顾与发展趋势 [J]. 农学学报 ,2018,8(1):1-6.
Liu X, Li L H, Li Y, et al. Crop germplasm resources: advances and trends[J]. Journal of Agriculture,2018,8(1):1-6.

[26] 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.
Han M H, Ren F, Yan L P, et al. Fruit and seed phenotypic diversity of natural populations of *Acer truncatum* in Shandong[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023,43(11):173-184,192.

[27] 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 acids composition of *Acer truncatum*[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association,2018,33(4):56-63.

[28] Liu J, Wu L C, Chen D, et al. Soil quality assessment of different *Camellia oleifera* stands in mid-subtropical China[J]. Applied Soil Ecology,2017,113:29-35.

[29] 刘俊羽 , 杨帆 , 毛爽 , 等 . 植物脂质应答逆境胁迫生理功能的研究进展 [J]. 生物工程学报 ,2021,37(8):2658-2667.
Liu J Y, Yang F, Mao S, et al. Advances in the physiological functions of plant lipids in response to stresses[J]. Chinese Journal of Biotechnology,2021,37(8):2658-2667.

[30] Xie L J, Zhou Y, Chen Q F, et al. New insights into the role of lipids in plant hypoxia responses[J]. Progress in Lipid Research, 2021,81:101072.

[31] 韩旻昊 , 燕丽萍 , 王因花 , 等 . 不同种群元宝枫种仁含油率及脂肪酸组成分析与评价 [J]. 中国油脂 ,2025,50(5):85-92.
Han M H, Yan L P, Wang Y H, et al. Analysis and evaluation of oil content in seed kernel and fatty acid composition of *Acer truncatum* from different populations[J]. China Oils and Fats, 2025,50(5):85-92.

[32] 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.
Wu H, Yan L P, Li C Z, et al. Oil content and fatty acid composition of superior *Acer truncatum* trees[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2023,43(12): 165-176.

[33] Ma Q Y, Wang Y X, Li S S, et al. Ribosome footprint profiling enables elucidating the systemic regulation of fatty acid accumulation in *Acer truncatum*[J]. BMC Biology,2023,21:68.

[34] 邓雪 , 李家铭 , 曾浩健 , 等 . 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究 [J]. 数学的实践与认识 ,2012,42(7):93-100.
Deng X, Li J M, Zeng H J, et al. Research on computation methods of AHP weight vector and its applications[J]. Mathematics in Practice and Theory,2012,42(7):93-100.

[本文编校：戴欧琳]