

野生油料树种硬核脂肪酸含量群体变异分析

吴 裕,何美莹*,张凤良,毛常丽

(云南省热带作物科学研究所,云南 景洪 666100)

摘 要:以云南省4个县7个群体野生硬核(*Scleropyrum wallichianum*)99株树的种子为材料测定脂肪酸成分及含量,并进行变异分析。GC/MS检测结果表明,所有样品中都含有12类脂肪酸,其中十八碳炔酸(包括8-十八碳炔酸、9-十八碳炔酸)的相对含量最高,变幅为23.47%~72.60%,平均值为41.40%;十八碳烯酸[油酸,18:1(9)]含量变幅为11.18%~24.12%,平均值为17.24%;十八碳酸总含量为40.82%~89.76%,平均值为62.08%。脂肪酸相对含量在群体内部变异大,而在群体间的变异小。

关键词:硬核;油料树种;脂肪酸;群体变异

中图分类号:S722.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2015)06-0099-05

Population Variation of Fatty Acids from the Seeds Wild Oil-bearing Tree *Scleropyrum wallichianum* in Yunnan

WU Yu, HE Mei-ying*, ZHANG Feng-liang, MAO Chang-li

(Yunnan Institute of Tropical Crops, Jinghong, Yunnan 666100, China)

Abstract: In order to explore the population variation pattern of fatty acids from *Scleropyrum wallichianum* seeds, the sample seeds of 99 wild individuals from 7 populations in 4 counties of Yunnan were collected. The components and the percentage of fatty acids of all sample seeds were analyzed. Twelve kinds of fatty acids were detected from all 99 sample seeds simultaneously. The total percentages of 8-octadecynoic acid and 9-octadecynoic acid ranged from 23.47% to 72.60%, with an average of 41.40%, and oleic acid percentage ranged 11.18% to 24.12%, average 17.24%, and 18C fatty acids percentage ranged from 40.82% to 89.76%, average 62.08%. The variation of individuals in population was much larger than that of among populations.

Key words: *Scleropyrum wallichianum*; oil tree; fatty acid; population variation

檀香科(Santalaceae)硬核属(*Scleropyrum*)已知有6个种,分布于东南亚地区及太平洋诸岛,我国海南、广西和云南分布1个种:硬核(*Scleropyrum wallichianum*)^[1-5]。在云南的勐腊和景洪等地区,野生资源比较丰富,种子富含油,当地居民有食用野生硬核种子的历史,烤熟后舂碎食用,有独特香味^[6]。采自海南保亭的样品,种仁油中十八碳烯酸相对含量为15.8%,十八碳二烯酸为33.9%,十八碳三烯酸为45.6%;采自云南勐腊的样品,分别为

19.3%、37.1%和37.8%^[4]。另据报道,采自云南景东的样品,总十八碳炔酸含量为56%,另含11种脂肪酸,可能具有特殊的工业用途^[7]。

同种野生植物不同产地间,皂苷、生物碱、黄酮等次生代谢产物的含量存在显著差异^[8-9];滇杨(*Populus yunnanensis*)优树无性系的表型变异与地理来源无关联^[10]。野生植物的表型差异包括遗传和环境的共同差异,是物种对环境长期适应的结果。云南野生硬核种子表型变异在群体内占93.72%,

收稿日期:2015-07-01 修回日期:2015-08-27

基金项目:云南省热带作物科技创新体系建设专项资金项目(RF2014-9)。

作者简介:吴 裕,男,硕士,副研究员,研究方向:植物种质资源学和遗传育种。E-mail: hhyw20030105@126.com

* 通信作者:何美莹,女,研究员,研究方向:热带植物油脂加工工艺。E-mail: 451970492@qq.com

而群体间仅占 6.28%；随着分布区海拔升高,种子有变小的趋势^[11]。作为食用油品种的育种目标是高含量的十八碳烯酸;而作为工业用油的育种目标是十八碳炔酸。云南野生油料树种硬核脂肪酸成分及含量在群体间的变异无报道,可以认为十八碳烯酸和十八碳炔酸含量是评价硬核油脂品质的重要指标,是优树选择和种源选择的重要依据,开展硬核种子主要脂肪酸含量的群体变异分析,对硬核的良种培育和开发利用有重要的科学意义。

1 材料与方法

1.1 种子采集和处理

根据前期调查和群体划分结果^[6,11],于 2014 年 8—11 月对每个群体分单株采集成熟果实,带回实验室及时洗净果皮获得核果,50℃ 恒温鼓风干燥。采种时保持株间距离>50 m,以最大限度地排除近

缘单株,同时尽量选择表型差异大的植株,共采集了 99 株树的种子。采样过程中用 GPS 定位仪对每个群体进行整体和单株定位(表 1)。

1.2 脂肪酸测定

油脂提取于 2014 年 10—11 月在云南省热带作物科学研究所农产品加工试验室完成;油脂甲脂化和脂肪酸成分测定于 2014 年 12 月委托中国科学院昆明植物研究所测试中心完成。

1.2.1 油脂提取 选取种皮完好无破损的种子,机械脱壳后剔除不饱满、变色等劣质种仁,机械破碎,研钵研细,以石油醚(AR 级,60~90℃ 沸程)为溶剂,用 B-815 脂肪酸提取仪(瑞士步琪有限公司)进行油脂提取,挥去溶剂后获取的油脂,分别用 2 mL 离心管封装,冷藏保存,直接送样分析;用 10 mL 离心管封装,冷藏保存备用。

表 1 硬核采样群体基本信息

Table 1 Basic information of *S. wallichianum* populations

群体编号	采样地点	经纬度	海拔高度/m	采样株数/株
P1	景洪基诺	22°00.002′—22°00.584′N,101°11.733′—101°12.204′E	1 260	15
P2	勐腊象明	22°04.996′—22°06.336′N,101°20.186′—101°24.747′E	1 130	13
P3	勐腊倚邦	22°01.761′—22°13.459′N,101°19.536′—101°21.384′E	1 430	8
P4	勐腊易武	21°59.260′—22°01.426′N,101°27.749′—101°29.516′E	1 390	17
P5	孟连娜允	22°20.761′—22°23.560′N,99°38.950′—99°41.700′E	1 100	10
P6	景洪勐旺	22°24.830′—22°29.636′N,101°19.389′—101°20.155′E	1 220	19
P7	勐海西定	21°54.658′—21°54.787′N,100°07.356′—100°07.625′E	1 580	17

1.2.2 油脂甲脂化反应 取约 50 mg 油脂,加入 20 mL 1%的硫酸甲醇溶液,水浴回流至油珠消失(约 5 h)。将反应产物冷却至室温后加入 3 倍体积的蒸馏水,用乙醚萃取 3 次,合并乙醚萃取液用水洗至中性,经无水硫酸钠干燥后蒸去部分乙醚,即得到该油的脂肪酸甲酯乙醚溶液。反应产物直接进样作 GC 及 GC/MS 分析。

1.2.3 脂肪酸成分测定 仪器:美国 Agilent Technologies 公司生产的 HP6890GC/5973MS 气相色谱-质谱联用仪;美国 Agilent Technologies 公司生产的 6890N 气相色谱仪。气相色谱-质谱(GC/MS)分析条件:GC 条件,DB-225MS 石英毛细管柱(30 mm×0.25 mm×0.25 μm);升温程序:起始温度 180℃,保持 25 min,5℃·min⁻¹升温至 220℃,保持 20 min;柱流量为 1.0 mL·min⁻¹;进样口温度 230℃;柱前压 100 kPa;进样量 1.0 μL;分流比 30:1;载气为高纯氮气。MS 条件:电离方式 EI;电子能量 70;传输线温度 250℃;离子源温度 230℃;四极杆温度 150℃;质量范围 35~500;采用 wiley7n.1 标准谱库检索定性。

气相色谱(GC)条件:DB-WAX 石英毛细管柱(30 mm×0.32 mm×0.53 μm);升温程序:起始温度 200℃,保持 26 min,5℃·min⁻¹升温至 220℃,保持 20 min;柱流量为 1.5 mL·min⁻¹;进样口温度为 250℃;氢火焰检测器温度 250℃;进样量 1.0 μL;分流比 50:1;载气为高纯氮气。

2 结果与分析

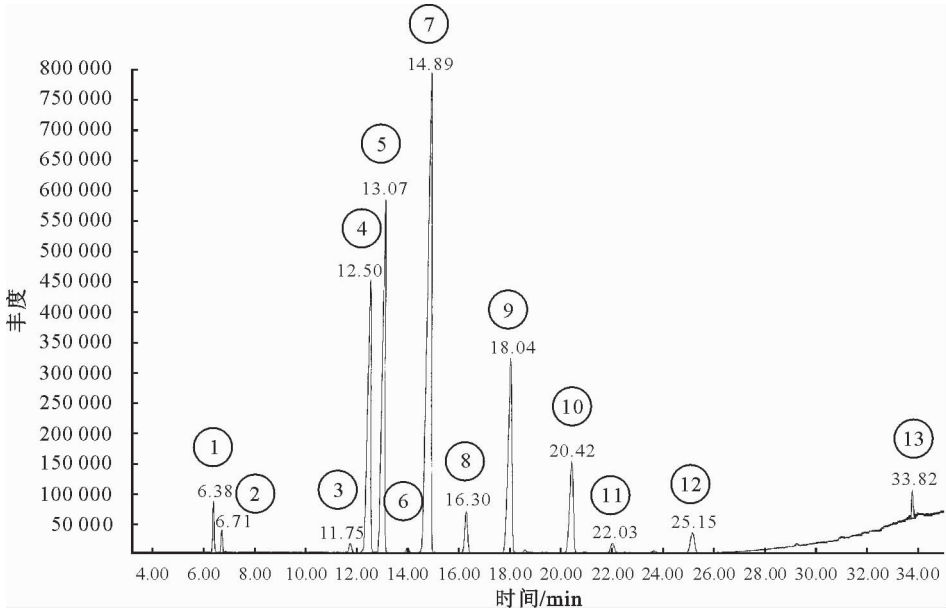
GC/MS 检测结果表明,所有样品中都含有 12 类脂肪酸(图 1),其中十八碳炔酸存在异构体,有 4 类脂肪酸未能鉴定(称“未鉴定酸”)。脂肪酸成分分别为:十六烷酸、十六碳烯酸[棕榈油酸,16:1(9)]、十八烷酸、十八碳烯酸[油酸,18:1(9)]、十八碳二烯酸[亚油酸,18:2(9,12)]、十八碳三烯酸[亚麻油酸,18:3(9,12,15)]、8-十八碳炔酸、9-十八碳炔酸、3-辛基环氧乙烷基辛酸、未鉴定酸 A、未鉴定酸 B、未鉴定酸 C 和未鉴定酸 D。将 7 个群体 99 株树种子的脂肪酸测定数据列于表 2。

2.1 主要脂肪酸相对含量的变异式样

理论上各种脂肪酸的含量之和为 1。从表 2 可

知,7 个群体 99 份样品脂肪酸总含量为 99.22%~99.90%,平均值为99.76%,符合要求。以相对含量的平均值和变幅比较表明,十八碳炔酸>未鉴定酸

A>十八碳烯酸>十八碳三烯酸,其他脂肪酸含量都较低,故以含量较高的 4 类脂肪酸进行群体变异分析。



注:1. 十六烷酸;2. 十六碳烯酸;3. 十八烷酸;4. 十八碳烯酸;5. 8-十八炔酸;6. 十八碳二烯酸;7. 未鉴定酸 A;8. 十八碳三烯酸;9. 9-十八炔酸;10. 未鉴定酸 B;11. 未鉴定酸 C;12. 未鉴定酸 D;13. 3-辛基环氧乙烷基辛酸。

图 1 硬核种子脂肪酸总离子流

Fig. 1 Total ion chromatogram of fatty acids from *S. wallichianum* seed

十八碳炔酸的相对含量最高,变幅为 23.47%~72.60%,平均值为 41.40%。十八碳炔酸有 2 种异构体,其中 8-十八碳炔酸含量较高(15.63%~67.55),9-十八碳炔酸含量较低(3.48%~31.23%)。十八碳烯酸含量变幅为 11.18%~24.12%,平均值为 17.24%。未鉴定脂肪酸有 4 类,总含量变幅为 6.90%~56.45%,平均值为 34.59%,其中未鉴定酸 A 含量最高,变幅为 2.29%~50.18%,平均值为 30.16%。十八碳三烯酸含量变幅为 1.63%~3.39%,平均值为 2.44%。

针对 7 个群体,计算各个群体的平均值和变幅(表 2)。结果表明,十八碳炔酸含量最低的是勐海西定群体,变幅为 24.10%~51.90%,平均值为 32.94%,含量最高的是景洪勐旺群体,变幅为 27.67%~68.32%,平均值为 49.01%;十八碳烯酸含量最低的是景洪基诺群体,变幅为 11.18%~20.99%,平均值为 15.87%,含量最高的是勐腊象明群体,变幅为 14.22%~22.92%,平均值为 18.01%;未鉴定酸 A 含量最低的是景洪勐旺群体,变幅为 4.32%~48.90%,平均值为 23.54%,含量最高的是勐海西定群体,变幅为 20.87%~50.18%,平均值为 37.84%。将十八碳烯酸、十八碳炔酸和未鉴定酸 A 的相对含量按采样群体顺序作散点图(图 2)。

2.2 脂肪酸含量的相关性分析

由于各种脂肪酸含量的总和为 1,理论上其中一种脂肪酸的绝对含量增加,会导致其他脂肪酸的相对含量下降。本研究中,十八碳炔酸、未鉴定酸 A 和十八碳烯酸的相对含量占绝对优势,其绝对含量的少量变化对其他脂肪酸相对含量的影响可以忽略不计。将碳链长度相同的十八碳烷酸、十八碳烯酸、十八碳二烯酸、十八碳三烯酸、十八碳炔酸计算总和,称为“总十八碳酸”(表 2)。以 99 份样品中十八碳烯酸、十八碳炔酸、总十八碳酸和未鉴定酸 A 的相对含量分析相关性(表 3)。结果表明,十八碳烯酸与十八碳炔酸、总十八碳酸和未鉴定酸 A 的含量变化没有相关性;十八碳炔酸与未鉴定酸 A 呈极显著负相关($p<0.001$);总十八碳酸与十八碳炔酸呈极显著正相关($p<0.001$);总十八碳酸与未鉴定酸 A 呈极显著负相关($p<0.001$)。说明十八碳炔酸和未鉴定酸 A 是脂肪酸中最主要的成分,呈此消彼长的趋势。

十六烷酸与十六碳烯酸呈极显著正相关($p<0.01$)。8-十八碳炔酸和 9-十八碳炔酸含量的相关系数为-0.222 6,呈显著负相关($p<0.05$),但是从散点图看不出明显的变化规律。十八烷酸、十八碳烯酸、十八碳二烯酸和十八碳三烯酸之间呈显著或极显著正相关,可能在十八烷酸去饱和作用的过程

表 2 硬核种子脂肪酸相对含量群体变幅及均值

Table 2 Variation range and average value of fatty acids percentage from <i>Scleropyrum wallichianum</i> individuals /%								
脂肪酸	P1		P2		P3		P4	
	平均	变幅	平均	变幅	平均	变幅	平均	变幅
十六烷酸	1.42	1.00~2.02	1.59	1.32~1.88	1.58	1.33~1.83	1.77	1.39~2.27
十六碳烯酸	0.67	0.58~0.85	0.71	0.58~1.03	0.73	0.64~0.89	0.74	0.62~0.88
十八烷酸	0.62	0.33~1.02	0.69	0.37~0.95	0.79	0.56~1.02	0.76	0.45~1.35
十八碳烯酸	15.87	11.18~20.99	18.01	14.22~22.92	17.76	15.46~21.57	17.91	13.32~22.54
十八碳二烯酸	0.24	0.14~0.51	0.29	0.17~0.43	0.47	0.33~0.73	0.34	0.18~0.66
十八碳三烯酸	2.13	1.70~2.75	2.20	1.84~2.56	2.50	2.08~2.93	2.67	2.14~3.19
8-十八碳炔酸	39.83	21.62~62.29	31.89	19.23~44.83	34.04	21.00~45.82	32.26	15.63~67.55
9-十八碳炔酸	7.02	3.48~10.13	9.12	5.07~18.42	6.94	4.35~10.13	6.74	4.94~8.55
总十八碳炔酸	46.85	27.79~66.81	41.00	29.17~51.96	40.98	27.44~51.99	38.99	23.47~72.60
总十八碳酸	65.71	49.30~89.76	62.20	50.67~74.47	62.50	47.76~75.14	60.68	44.45~89.31
3-辛基环氧乙烷基辛酸	0.86	0.65~1.10	0.84	0.69~0.93	0.77	0.59~0.93	0.79	0.61~0.90
未鉴定酸 A	27.09	2.84~41.40	29.18	17.44~ 40.21	29.74	18.72~44.33	31.47	2.29~47.11
未鉴定酸 B	1.56	0.42~2.94	2.90	0.84~6.69	2.06	0.72~5.05	2.04	0.20~4.12
未鉴定酸 C	1.36	0.53~3.48	1.15	0.48~2.30	1.13	0.42~2.15	1.11	0.37~4.55
未鉴定酸 D	1.11	0.16~3.05	1.22	0.53~1.79	1.30	0.63~2.58	1.19	0.18~2.38
总含量	99.77	99.64~99.89	99.77	99.66~99.90	99.80	99.72~99.90	99.78	99.70~99.88

脂肪酸	P5		P6		P7		总体	
	平均	变幅	平均	变幅	平均	变幅	平均	变幅
十六烷酸	1.44	1.12~1.76	1.55	1.07~1.94	1.71	1.21~2.32	1.59	1.00~2.32
十六碳烯酸	0.67	0.59~0.80	0.71	0.55~0.82	0.67	0.52~0.96	0.70	0.52~1.03
十八烷酸	0.78	0.46~1.36	0.57	0.28~0.89	0.74	0.49~1.29	0.69	0.28~1.36
十八碳烯酸	17.63	15.01~20.60	16.57	11.52~21.14	17.48	11.48~24.12	17.24	11.18~24.12
十八碳二烯酸	0.22	0.16~0.30	0.21	0.11~0.38	0.44	0.28~0.80	0.31	0.11~0.80
十八碳三烯酸	2.54	1.85~2.81	2.20	1.63~2.89	2.85	2.16~3.39	2.44	1.63~3.39
8-十八碳炔酸	30.45	22.53~47.58	41.68	17.70~62.52	27.12	19.37~43.30	34.24	15.63~67.55
9-十八碳炔酸	7.63	5.84~10.79	7.33	4.34~31.23	5.82	4.66~8.60	7.15	3.48~31.23
总十八碳炔酸	38.08	30.10~54.47	49.01	27.67~68.32	32.94	24.10~51.90	41.40	23.47~72.60
总十八碳酸	59.25	50.86~72.44	68.54	43.88~88.74	54.45	40.82~73.21	62.08	40.82~89.76
3-辛基环氧乙烷基辛酸	0.78	0.70~0.84	0.77	0.63~0.92	0.78	0.67~0.91	0.80	0.59~1.10
未鉴定酸 A	33.71	21.20~41.70	23.54	4.32~48.90	37.84	20.87~50.18	30.16	2.29~50.18
未鉴定酸 B	2.06	1.14~3.52	1.53	0.23~9.06	2.00	1.21~3.10	1.98	0.20~9.06
未鉴定酸 C	0.80	0.37~1.47	1.76	0.36~3.41	0.94	0.48~2.59	1.22	0.36~4.55
未鉴定酸 D	1.13	0.59~2.13	1.31	0.25~2.63	1.34	0.37~2.37	1.23	0.16~3.05
总含量	99.82	99.73~99.90	99.72	99.22~99.88	99.73	99.55~99.83	99.76	99.22~99.90

图 2 硬核种子脂肪酸含量散点图

Fig. 2 Scatter diagram of fatty acids percentage from *S. wallichianum* seed

表 3 硬核种子脂肪酸含量的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of fatty acids percentage from *S. wallichianum*

脂肪酸	十八碳炔酸	总十八碳酸	未鉴定酸 A
十八碳烯酸	-0.020 7	0.055 0	-0.079 4
十八碳炔酸	—	0.964 4***	-0.949 6***
总十八碳酸	—	—	-0.991 3***

注:***表示差异显著($p<0.001$)。

中,少部分十八碳烯酸进一步去饱和后形成十八碳二烯酸和十八碳三烯酸。

从烷酸到烯酸和炔酸的变化是积累能量的过程,然而能量的最终来源是太阳辐射产生的热量。如果硬核的脂肪酸合成途径也符合这条规律,推测 7 个群体的环境热量都能满足合成十八碳烷酸、十八碳烯酸、十八碳二烯酸、十八碳三烯酸,表现为在 7 个群体间的相对含量基本无差异(图 2、表 2 和表 3);合成炔酸的过程需要更多热量,热量充足的群体合成的炔酸较多,热量较低的群体合成炔酸也较少,表现为海拔高度越高,十八碳炔酸含量越低。

3 结论与讨论

通过云南省 4 个县 7 个群体 99 株树的种子脂肪酸测定和分析表明,十八碳炔酸的相对含量最高,变幅为 23.47%~72.60%,平均值为 41.40%;十八碳烯酸含量变幅为 11.18%~24.12%,平均值为 17.24%;十八碳酸总含量为 40.82%~89.76%,平均值为 62.08%。本研究中未能鉴定的脂肪酸有 4 类,总含量变幅为 6.90%~56.45%,平均值为 34.59%,其中未鉴定酸 A 含量最高,变幅为 2.29%~50.18%,平均值为 30.16%。云南野生硬核种子脂肪酸含量在群体内单株间差异大,群体间差异小,这与种子表型变异主要来源于群体内部的结论一致^[11],即形态学和油脂化学的群体变异式样一致。

采自海南岛和云南勐腊的样品未发现十八碳炔酸,其中十八碳烯酸、十八碳二烯酸、十八碳三烯酸的含量具有良好的一致性^[4];采自云南景东的样品含有大量 9-十八碳炔酸和十八碳烯炔酸,另外含有 11 种脂肪酸^[7],与本研究的数据差异较大,但本研究没有采集到景东地区的样品,尚需进一步研究。

植物多不饱和脂肪酸的合成是先合成 16 至 18 碳的饱和脂肪酸,然后在去饱和酶的作用下形成单不饱和脂肪酸或者多不饱和脂肪酸^[12-14],在脂肪酸去饱和过程中第一个双键的引入一般发生在碳链中部,油酸(18:1)是最常见的不饱和脂肪酸,双键位于第 9 碳位^[12],而且发现有些去饱和酶能在脂肪酸同一位置形成双键和三键^[13]。本研究中,十六碳烯酸、十八碳烯酸、十八碳二烯酸、十八碳三烯酸的第

一个双键都位于第 9 碳位,少部分十八碳炔酸的三键也位于第 9 碳位,这符合一般规律,但是大部分十八碳炔酸的三键位于第 8 碳位,其去饱和过程,有待进一步研究。

本研究有 4 类脂肪酸未能鉴定清楚,尚需进一步鉴定。热量充足的群体,合成十八碳炔酸多,而未鉴定酸 A 较少,相反热量较低的群体合成十八碳炔酸较少,而未鉴定酸 A 较多。目前尚不清楚硬核去饱和酶的类型和结构,一般认为不同物种的基因序列不同,所编码的去饱和酶功能也不一致。不同植物的同一去饱和酶甚至同一植物同一去饱和酶的不同拷贝之间的结构都不完全相同^[12],有关合成十八碳炔酸与未鉴定酸 A 的去饱和酶类型及其作用机理尚需进一步研究。

在油脂提取和保存过程中,发现 99 株树的油脂存在从乳白色到红褐色的连续变异,在室温环境和 4℃ 冰箱环境中都存在纯固体、液固共存、纯液体的状态差异。随机抽取在室温环境中液固共存的 3 个样品,进行液固分离,各自测定脂肪酸成分及含量,比较结果基本无差异。但是纯固体油脂和纯液体油脂的脂肪酸成分和含量都存在较明显的差异(株间差异)。至于油脂颜色和状态差异与脂肪酸成分和含量差异的相关性需要设计更精确的对比试验。

海拔越高,炔酸含量越低,与吴裕^[11]等研究一致。炔酸在植物中很少见,含炔酸的油脂具有特殊的工业用途^[7],已知在檀香科(Santalaceae)、铁青树科(Olacaceae)、菊科(Compositae)的部分类群中有分布^[15],硬核油中十八碳炔酸相对含量为 23.47%~72.60%,可能具有重要的工业用途。另外,种仁含油率高达 70%,十八碳烯酸(油酸)相对含量为 11.18%~24.12%,当地居民已作为食用。云南野生硬核属于硬核分布区的北部边缘群体,生长粗放,不管作为食用油还是工业用油,也许都会有良好的利用前景。群体内部变异大,具备优良单株选择的物质基础,以脂肪酸相对含量、种仁含油率、种子产量等进行优良单株选择培育无性系品种是有效的途径,但种源选择的意义不大。

参考文献:

[1] WU Z Y, RAVEN P H, HONG D Y. Flora of China:vol. 5 [M]. Beijing:Science Press, 2003:208-219.

[2] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志:第 24 卷 [M]. 北京:科学出版社,1988:52-85.

[3] 中国科学院昆明植物研究所. 云南植物志:第 4 卷[M]. 北京:科学出版社,1986:286-300.

YANG X J, WANG X C, WU F X, *et al.* Study on the development and application of RPA[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2004, 32(4): 37-40. (in Chinese)

[21] 杨学军, 韩崇选, 王明春, 等. 多效抗旱驱鼠剂在飞播造林中的应用研究[J], 林业科学研究, 2002, 15(5): 609-613

YANG X J HAN C X, WANG M C, *et al.* Study on the application of RPA in aerial seeding [J]. Forest Research, 2002, 15(5): 609-613. (in Chinese)

[22] 广东省林科所马尾松飞播防鼠鸟害调查组. 川豫陕三省应用 R-8 复合忌食剂防止鼠鸟取食飞(撒)播油松种子效果的调查报告[J]. 广东林业科技, 1989(6): 1-2

[23] 韩崇选, 崔迅, 张刚龙, 等. 林地鼯鼠发生规律与林分郁闭度的模型分析[J]. 西北林学院学报, 2007, 22 (5): 94-100

HAN C X, CUI X, ZHANG G L, *et al.* Model analysis of the outbreak regularity of zokor and the shade density[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(5): 94-100. (in Chinese)

[24] 辛晓辉, 董晓波, 杨泽春, 等. 黄土高原次改林地林下植被与鼯鼠种群结构的关系[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(3): 118-125

XIN X H, DONG X B, YANG Z C, *et al.* Relationship between population structure of zokor and under-herbosa in the improved secondary forests on the Loess Plateau[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(3): 118-125. (in Chinese)

[25] 郎杏茹, 王培新, 韩崇选, 等. 黄土高原次改林地林下植物与鼯鼠繁殖的关系[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(6): 78-84

LANG X R, WANG P C, HAN C X, *et al.* Study on the relation between reproduction of zokor and under-herbosa in the improved secondary forests on the Loess Plateau[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(6): 78-84. (in Chinese)

(上接第 103 页)

[4] 中国油脂植物编写委员会. 中国油脂植物[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 90-92.

[5] 傅立国, 陈潭清, 郎楷永, 等. 中国高等植物: 第 7 卷[M]. 青岛: 青岛出版社, 2001: 722-737.

[6] 吴裕, 张凤良, 何美莹, 等. 云南油料树种硬核野生分布调查[J]. 热带农业科技, 2015, 38(1): 24-26.

[7] 王静萍, 李京民, 于凤兰. 硬核油的炔酸成分研究[J]. 云南植物研究, 1992, 14(1): 101-104.

[8] 邵文豪, 姜景民, 董汝湘, 等. 不同产地无患子果皮皂苷含量的地理变异研究[J]. 植物研究, 2012, 32(5): 627-631.

SHAO W H, JIANG J M, DONG R X, *et al.* Geographic variation of saponins contents in *Sapindus mukorossi* peels from different habitats [J]. Bulletin of Botanical Research, 2012, 32 (5): 627-631. (in Chinese)

[9] 邵红, 李钧敏, 金则新, 等. 不同产地大血藤次生代谢产物含量比较[J]. 植物研究, 2006, 26(3): 342-348.

SHAO H, LI J M, JN Z X. The comparison of the secondary metabolism content in *Sargentodoxa cuneata* from different producing areas [J]. Bulletin of Botanical Research, 2006, 26 (3): 342-348. (in Chinese)

[10] 何承忠, 张晏, 段安安, 等. 滇杨优树无性系苗期叶片性状变异分析[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(6): 28-32.

HE C Z, ZHANG Y, DUAN A A, *et al.* Variation analysis on leaf traits in seedling duration of *Populus yunnanensis* plus tree clones [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(6): 28-32. (in Chinese)

[11] 吴裕, 张凤良, 毛常丽, 等. 野生硬核种子表型变异分析[J]. 东北林业大学学报, 2015, 43(8): 29-33.

WU Y, ZHANG F L, MAO C L, *et al.* Phenotype Variations of Seed in Wilding *Scleropyrum wallichianum* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2015, 43 (8): 29-33. (in Chinese)

[12] 戴晓峰, 肖玲, 武玉花, 等. 植物脂肪酸去饱和酶及其编码基因研究进展[J]. 植物学通报, 2007, 24(1): 105-113.

DAI X F, XIAO L, WU Y H, *et al.* An overview of plant fatty acid desaturases and the coding genes [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2007, 24 (1): 105-113. (in Chinese)

[13] 丁兆坤, 麻艳群, 许友卿. 合成高度不饱和脂肪酸去饱和酶的分子生物学研究 I. 结构与功能[J]. 中国生物工程杂志, 2008, 28(6): 196-200.

[14] 曾硕士, 江黎明, 元冬娟. 脂肪酸去饱和酶的研究进展[J]. 生命科学, 2008, 20(5): 816-820.

ZENG S S, JIANG L M, YUAN D J. Research and development of fatty acid desaturase [J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2008, 20 (5): 816-820. (in Chinese)

[15] 周荣汉, 段金廛. 植物化学分类学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2005: 191-209.