

木通属 21 个种质油脂基本品质评价

杨玉宁^{1,2}, 刘红昌^{1,2}, 高尔刚³, 李园园^{1,2}, 陈松树^{4*}, 辛雪辉⁵

(1. 贵州大学农学院, 贵州 贵阳, 550025;

2. 贵州省药用植物繁育与种植重点实验室, 贵州 贵阳, 550025;

3. 黎平林业局, 贵州 黎平, 550073;

4. 贵州大学教学实验场, 贵州 贵阳, 550025;

5. 黎平盛竹联创木通农林发展有限公司, 贵州 黎平, 557300)

摘要:比较木通属植物不同种质籽油品质的差异, 综合评价不同种质的优劣, 为其开发利用提供参考。以同一生境同一生长年限下的木通属植物为材料, 分别测定并记录木通属植物 21 份种质的外形参数与产量性状, 利用索氏提取法测定种子含油率, 采用气相色谱法检测脂肪酸种类及含量, 通过变异系数分析种间及种内种质的产量及品质差异。通过相关性分析、主成分分析及灰色关联度分析进行综合评价。结果发现, 木通属 21 份种质种子含油率在 33.86%~47.08%, 酸价在 2.64~11.72 KOH mg·g⁻¹, 过氧化值在 0.03~0.38 g·100g⁻¹, 碘值在 47.33~81.85 g·100g⁻¹, 皂化值在 237.87~281.53 KOH mg·g⁻¹。饱和脂肪酸相对质量分数在 13.56%~18.51%, 不饱和脂肪酸以油酸和亚油酸为主, 其相对质量分数在 45.75%~66.17%。种间及种内籽油品质存在着不同程度的差异, 三叶木通在产量性状方面变异较大, 白木通在油脂品质方面变异较大。相关性分析结果表明, 果实质量与果形指数与籽油部分品质指标具有相关性(单果质量与饱和脂肪酸显著负相关; 果形指数与含油率、油酸、单不饱和脂肪酸、皂化值显著正相关, 与过氧化值显著负相关), 且二者越大, 籽油品质越高。主成分分析及灰色加权关联度分析得到的较优种质均为白木通(B1~B8), 同时三叶木通种质中的 S6 与 S8 在两种分析中的排名中等偏上。果色和果实形状对籽油综合品质的影响较小。白木通种质(B1~B8)及 S6、S8 的籽油综合品质较佳, 具有更高的开发利用价值。

关键词: 木通属; 籽油品质; 主成分分析; 灰色关联度分析; 综合评价

中图分类号: S326

文献标识码: A

文章编号: 1007-9084(2022)02-0365-11

Basic quality evaluation of 21 germplasm oils of *Akebia*

YANG Yu-ning^{1,2}, LIU Hong-chang^{1,2}, GAO Er-gang³, LI Yuan-yuan^{1,2}, CHEN Song-shu^{4*}, XIN Xue-hui⁵

(1. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Key Laboratory of Medicinal Plant Breeding and Planting in Guizhou Province, Guiyang 550025, China; 3. Forestry Bureau of Liping County for Guizhou Province, Liping 557300, China; 4. Teaching Experimental Field of Guizhou University, Guiyang 550025, China; 5. Shengzhu Lianchuang Mutong Agricultural and Forestry Development Co., Ltd., Liping 557300, China)

Abstract: The aim is to compare the differences of seed oil quality among different germplasm of *Akebia*, and evaluate the quality of different germplasm comprehensively, so as to provide reference for its development and utilization. In this experiment, *Akebia* plants in the same habitat and growth years were used as materials. The shape and yield traits of 21 *Akebia* germplasm were measured and recorded. The oil content was determined by Soxhlet extraction method, and fatty acid types and contents were determined by gas chromatography. The yield and quality differences between species and within species were analyzed by coefficient of variation. Through correlation analysis, principal component analysis and grey correlation analysis, comprehensive analysis and evaluation were also carried out. Results showed that oil content, acid value, peroxide value, iodine value and saponification value of 21 accessions of *Akebia* were 33.86–47.08%, 2.64–11.72 KOHmg·g⁻¹, 0.03–0.38 g·100g⁻¹, 47.33–81.85 g·100g⁻¹ and

收稿日期: 2021-01-04

基金项目: 贵州省自然科学基金(黔科合基础[2019]1061号)

作者简介: 杨玉宁(1994–), 女, 硕士研究生, 研究方向为药用植物栽培与品质研究, E-mail: 1455603204@qq.com

* 通讯作者: 陈松树(1987–), 男, 实验师, 研究方向为中药材栽培与育种, E-mail: 429020703@qq.com

237.87–281.53 KOHmg·g⁻¹, respectively. The relative mass fraction of saturated fatty acids ranged from 13.56% to 18.51%. Oleic acid and linoleic acid were the main unsaturated fatty acids, and their relative mass fraction ranged from 45.75% to 66.17%. Differences were found among interspecific and intraspecific. The yield traits of *Akebia trifoliata* (Thunb) Koidz was significantly different, and that of *Akebia trifoliata* (Thunb) Koidz.var. *australis* (Diels) Rehd was larger in oil quality. Correlation analysis showed that the fruit quality and shape index were correlated with some quality indexes of seed oil (single fruit quality was significantly negatively correlated with saturated fatty acids; fruit shape index was positively correlated with oil content, oleic acid, monounsaturated fatty acid, saponification value, and negatively correlated with peroxide value), and the higher the two, the higher the quality of seed oil. Principal component analysis and grey weighted correlation analysis showed that the best germplasm was *Akebia trifoliata* (Thunb) Koidz.var. *australis* (Diels) Rehd (B1–B8). At the same time, S6 and S8 of *Akebia trifoliata* (Thunb) Koidz ranked above the middle in the two kinds of analysis, which was worthy of development and utilization. Fruit color and shape had little effect on the comprehensive quality of seed oil. The comprehensive quality of seed oil from B1 to B8, S6 and S8 was better, thus has higher utilization value.

Key words: *Akebia*; seed oil quality; principal component analysis; grey correlation analysis; comprehensive evaluation

木通科(Lardizabalaceae)木通属(*Akebia* Decne)植物为多年生缠绕木质藤本,该属植物主要包括木通 *Akebia quinata* (Thunb)Decne、白木通 *Akebia trifoliata* (Thunb) Koidz. var. *australis* (Diels) Rehd 和三叶木通 *Akebia trifoliata* (Thunb) Koidz, 全株均可入药,具有抗癌、利尿通淋,通经下乳,抗菌消炎的药用功效^[1-3]。该属植物果实含籽率较高(9%~15%),在食用及深加工利用时,种子常被丢弃,在一定程度上造成了资源的浪费。研究表明,木通种子的含油率在40%左右,种子油经鉴定可检出多种不饱和脂肪酸,主要成分为油酸与亚油酸,具有开发利用价值^[4],同时该属植物籽油也具有制备生物柴油的巨大潜力^[5]。

木通属植物种质资源丰富,但种子质量参差不齐,需对其品质进行综合评价以筛选优良种质。近年来,药用植物品质综合评价的方法有主成分分析法、灰色关联度分析法、层次分析法等^[6-8]。主成分分析法通过降维,找出几个综合因子来代表原来众多的变量,这些综合因子尽可能地反映原来变量的信息量,同时彼此之间互不相关,从而使数据更简化、客观;灰色关联度分析是一种定量化分析方法,是根据数列的可比性和相似性,分析系统内部相关程度;层次分析法在运用时需要根据经验对各指标的重要程度进行人为赋分,确定权重时具主观片面性,而权重确定是综合评价中的关键环节^[7],为避免评价结果片面、主观,单一评价方法不适用,本试验结合主成分分析法与灰色关联度分析法,以21份木通属植物为研究材料,对各种质的籽油品质进行综合

评价,为其开发利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况及材料

试验地位于贵州省黎平县敖市镇,地理坐标为跨东经109°01′~107°02′,北纬26°23′~26°26′,地形以低山河谷盆地为主,平均海拔447 m,属亚热带温湿季风区,年均气温16.1℃,无霜期280 d。气候温和,阳光充足,雨量充沛。

供试材料为木通科木通属下3个种的各种质种子,均采自黎平盛竹联创木通农林发展有限公司在敖市镇梧寨村建立的种质资源圃。木通属植物的鉴定主要依靠花、小叶数量及叶缘形状,但在不同生境下,形态上均有一定的过渡类型^[9]。本试验为尽可能地代表原始种而选择了最接近原始种的种质,经贵州大学植物鉴定中心鉴定后共有21份,其中木通(小叶5片)种质5份,标记为W1~W5;三叶木通(小叶3片+叶缘波浪状)和白木通(小叶3片+叶缘全缘)各8份,分别标记为S1~S8和B1~B8(表1)。样本均于2014–2015年种植,搭架栽培,株行距1.8 m×2.5 m,栽培管理措施一致。表1为木通属种质外观性状。

主要试剂:肉豆蔻酸对照品(货号:SM9040),棕榈酸对照品(货号:SM8850),油酸对照品(货号:SM8840),亚油酸对照品(货号:SM8800),花生酸对照品(货号:SM9460),均购自北京索莱宝科技有限公司;硬脂酸对照品(批号:RMYJ-W2RJ),棕榈油酸对照品(批号:360H-TNCN),均购自中国食品药

表 1 木通属植物不同种质外观性状
Table 1 Appearance characters of *Akebia* germplasms

种名 Species name	种质 Germplasm	果形 Fruit shape	果色 Fruit color	果表平整程度 Smoothness of fruit surface	果表粗糙程度 Roughness of fruit surface
木通 <i>Akebia quinata</i> (Thunb.) Decne	W1	中型小头形 Medium capitulum	紫红色 Purplish red	平整 Even	光滑 Smooth
	W2	长卵形 Long ovate	绿色 Green	凹凸不平 Uneven	光滑 Smooth
	W3	长卵球形 Long ovoid-globose	褐色 (果锈多) Brown (more fruit rust)	平整 Even	粗糙 Rough
	W4	长卵形 Long ovate	褐色 (果锈多) Brown (more fruit rust)	凹凸不平 Uneven	粗糙 Rough
三叶木通 <i>Akebia trifoliata</i> (Thunb.) Koidz	W5	卵球形+长卵球形 Ovoid-globose+ Long ovoid-globose	杂色 Variegated	平整 Even	光滑 Smooth
	S1	小肾形 Small reniform	紫红色 Purplish red	平整 Even	光滑 Smooth
	S2	大肾形 Large reniform	绿色 Green	凹凸不平 Uneven	光滑 Smooth
	S3	中肾形 Medium reniform	乳白色 Milky white	平整 Even	光滑 Smooth
白木通 <i>Akebia trifoliata</i> (Thunb.) Koidz	S4	中肾形+小头形 Medium reniform+ capitulum	紫红色 Purplish red	平整 Even	光滑 Smooth
	S5	长卵球形 Long ovoid-globose	黄褐色 (果锈少) Yellow brown (less fruit rust)	平整 Even	光滑 Smooth
	S6	中肾形 Medium reniform	紫红色 Purplish red	平整 Even	光滑 Smooth
	S7	长卵球形 Long ovoid-globose	紫红色 Purplish red	平整 Even	光滑 Smooth
白木通 <i>Akebia trifoliata</i> (Thunb.) Koidz. var. <i>australis</i> (Diels) Rehd	S8	中型小头形 Medium capitulum	粉红色 Pink	凹凸不平 Uneven	光滑 Smooth
	B1	中型小头形 Medium capitulum	浅紫色 Light purple	平整 Even	光滑 Smooth
	B2	长型小头形 Long capitulum	紫色 purple	平整 Even	光滑 Smooth
	B3	中型小头形 Medium capitulum	黑紫色 (果锈中等) Black and purple (moderate fruit rust)	平整 Even	光滑 Smooth
	B4	中肾形 Medium reniform	紫蓝色 indigo	平整 Even	光滑 Smooth
	B5	长卵形 Long ovate	绿色 Green	平整 Even	光滑 Smooth
	B6	长卵形 Long ovate	褐色 (果锈多) Brown (more rust)	平整 Even	粗糙 Rough
	B7	长卵形 Long ovate	紫褐色 (果锈中等) Purple brown (moderate rust)	平整 Even	粗糙 Rough

注:长型小头形(果实与果柄连接处的果实头部较小,果形指数 ≥ 2.3);中型小头形(果实与果柄连接处的果实头部较小, $2.0 \leq$ 果形指数 ≤ 2.3);短型小头形(果实与果柄连接处的果实头部较小,果形指数 ≤ 2.0);长卵形(果形指数 ≥ 2.3);长卵球形($2.0 \leq$ 果形指数 ≤ 2.3);卵球形(果形指数 ≤ 2.0);大肾形(果实弯曲,果形指数 ≥ 2.0 且单果质量 ≥ 200);中肾形(果实弯曲,果形指数 ≥ 2.0 且单果质量 ≥ 100);小肾形(果实弯曲,果形指数 ≤ 2.0 或单果质量 ≤ 100)。果形指数为果实纵径与横径的比值

Note: Long capitulum (fruit head at the junction of fruit and fruit stalk is smaller, fruit shape index ≥ 2.3); Medium capitulum (fruit head at the junction of fruit and fruit stalk is smaller, $2.0 \leq$ fruit shape index ≤ 2.3); Short capitulum (fruit head at the junction of fruit and fruit stalk is smaller, fruit shape index ≤ 2.0); Long ovate (fruit shape index ≥ 2.3); Long ovoid-globose ($2.0 \leq$ fruit shape index ≤ 2.3); Ovoid-globose (fruit shape index ≤ 2.0); Large reniform (fruit bending, fruit shape index ≥ 2.0 and single fruit weight ≥ 200); Medium reniform (fruit bending, fruit shape index ≥ 2.0 and single fruit weight ≥ 100); Small reniform (fruit bending, fruit shape index ≤ 2.0 or single fruit weight ≤ 100). Fruit shape index is the ratio of longitudinal diameter to transverse diameter of fruit

品检定研究院。石油醚(30-60)、乙醚、乙醇、异丙醇、异辛烷、冰乙酸、环己烷、三氯甲烷、韦氏试剂、淀粉指示剂、氢氧化钾标准滴定水溶液、碘化钾、硫代硫酸钠,均为分析纯。

主要仪器:索氏提取器(SXT-06)、气相色谱仪(agilent 7890A),电热鼓风干燥箱(101-3AB型)。

1.2 方法

1.2.1 取样 于2019年9月至10月进行取样,每份种质随机选取1株,重复3次,每株在东南西北中

五个方向共摘取10个果实,采摘标准为果实已软化且果皮变色(9~10分熟),每份种质共30个果实,利用网袋取出果肉后将种子取出后置于室温阴干,提取油前再置于40℃烘干至恒重备用。

1.2.2 产量指标测定 单果质量:每份种质称取30个果实鲜重质量,取其平均值;单果种子质量:每份种质测量30个果实中种子鲜重,取其平均值;

种子粒数:每份种质记录30个果实中种子粒数,取其平均值;百粒重:每份种质记录30个果实中

百粒种子重,取其平均值;种子百分率采用公式(1)进行计算,果形指数通过公式(2)计算得出。

$$\text{种子百分率}\% = \frac{\text{种子鲜重}}{\text{果实鲜重}} \quad (1)$$

$$\text{果形指数} = \frac{\text{果实纵径}}{\text{果实横径}} \quad (2)$$

1.2.3 种子油提取及理化指标测定 种子油提取参照李园园等^[10]的索氏提取工艺,油脂理化指标包括酸值、碘值、皂化值以及过氧化值。具体参照周娜娜^[11]的测定方法及计算方法。

1.2.4 脂肪酸组成分析 样品甲酯化处理:操作方法参照李园园等^[10]的甲酯化方法,但超声时间将10 min改为30 min,目的是将油脂充分溶解在异辛烷中。

色谱条件:色谱柱为HP-5(60 m×0.25 mm×0.25 μm)弹性石英毛细管柱,柱温120℃,保持1 min,以10℃·min⁻¹升温至175℃,保持10 min,再以5℃·min⁻¹升温至210℃,保持9.5 min,运行33 min;汽化室温度250℃;载气为高纯氮气;柱前压8.7269 psi,载气流速1.0 mL·min⁻¹;分流比20:1,进样量为1 μL,测花生酸时进样量为2 μL。

1.3 数据分析

1.3.1 相关性分析与主成分分析 品质测定均为3次生物学重复,结果均以“均值”表示,采用Excel 2007对数据进行处理,通过变异系数对品质指标进行分析,利用SPSS19.0软件进行皮尔逊相关性分析,并通过相关性分析结果进行指标筛选,筛选后的指标在主成分分析前进行Z-score标准化,以特征值大于1为依据提取主成分,最后通过综合得分对种质优劣进行排序。

1.3.2 灰色关联度分析 采用主成分分析时选取的品质指标,灰色关联分析前先使用均值化法对数据进行无量纲化处理,再以各项正向指标的最优值及负向指标的最低值为参考列,各项指标作为评价指标为比较数列,最后计算出参试种质的关联度^[12]。

2 结果与分析

2.1 不同种质的产量性状及含油率分析

无论是单果质量、果形指数还是种子产量,白木通在三类木通中三项指标均显示最大,其平均单果质量为185.49 g,种粒数除B3外均在200粒以上,种子平均千粒重达90.42 g。另外,8份白木通种质的平均含油率高达40%以上,是三类木通中最高的。5个产量指标在21份种质中的总变异系数为19%~40%,表明三类木通在产量上具有较大差异,而含油率的总变异系数为8.54%,表明含油率在种

间差异较小。从种内变异系数来看,三叶木通产量性状的变异最大,除含油率外,5个产量指标在8份三叶木通种质中的变异系数均在20%以上(表2)。

2.2 脂肪酸组分分析

脂肪酸结果表明,所测21份种质的木通籽油中均含有肉豆蔻酸、棕榈油酸、棕榈酸、亚油酸、油酸、硬脂酸,而花生酸仅存在于部分种质中。亚油酸(21.75%~34.91%)与油酸(21.88%~37.79%)相对其余五类脂肪酸来说占比较大,其次是棕榈酸(11.43%~15.58%)和硬脂酸(1.60%~3.42%),肉豆蔻酸、棕榈油酸和花生酸在21份种质中的相对质量分数均未达到0.5%。由表3还可知,21份种质的植物籽油主要以不饱和脂肪酸(45.74%~66.17%)为主,其中亚油酸为多不饱和脂肪酸,属于人体不能自身合成的必需脂肪酸。据报道,亚油酸属于n-6多不饱和脂肪酸,其衍生物有预防和抑制癌症和心脑血管疾病等慢性代谢疾病的作用^[13],其在木通属植物籽油的不饱和脂肪酸中占比一半左右。

从种间变异系数来看,肉豆蔻酸、棕榈油酸与花生酸在21份种质中的变异最大,其中花生酸的总变异系数高达100%以上,其余四类脂肪酸的变异系数未达到20%,表明这几类脂肪酸在21份种质中的变异较小;各类脂肪酸虽然含量各异,但饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸的总变异系数均较小,分别为8.86%和10.07%。从种内变异系数来看,各类脂肪酸在种内的变异情况与种间变异情况类似,变异较大的依然是肉豆蔻酸、棕榈油酸和花生酸这三类。三类木通中以白木通的各类脂肪酸含量差异最大(表3)。

2.3 不同种质油脂的理化性质分析

酸价和过氧化值是评价油脂变质和氧化程度的常用指标,二者越小,说明油脂质量越好^[10],21份种质油脂的酸价及过氧化值偏高,仅部分种质符合国家安全植物原油标准GB 2716-2018(酸价≤4 mg·g⁻¹,过氧化值≤0.25 g·100g⁻¹),未符合标准的种质其酸价在4.04~11.72 mg·g⁻¹,过氧化值在0.25~0.38 g·100g⁻¹,这可能是种子在空气中放置时间过长及索氏抽提时温度较高使其氧化酸败所致^[14,15]。碘值代表油脂的不饱和程度,二者成正比,碘值越大,油脂中所含的双键数越多,不饱和度也越大^[16]。21份种质的油脂中碘值较低,为47~82 g·100g⁻¹,说明其不饱和程度较低,属于不干性油。皂化值与油脂中脂肪酸分子量有密切关系,皂化值越大,油脂的脂肪酸分子量越小,油脂越纯正^[14],按照注射及食用标

表2 木通属植物不同种质的产量性状及含油率分析
Table 2 Analysis on yield characteristics and oil content of different germplasm of Akebia

种质 Germplasm	单果质量/g Single fruit weight / g	果形指数 Fruit shape index	单果种子质量/g Single fruit seed weight / g	种子百分率/% Seed percentage /%	种粒数/粒 Seed number / seed	千粒重/g 1000 grain weight / g	含油率/% Oil content /%
W1	64.68	2.26	8.07	12.53	153	53.69	40.95
W2	102.53	2.34	9.92	9.70	187	53.90	37.00
W3	80.82	2.32	7.71	9.69	138	55.56	38.03
W4	103.82	2.29	8.29	7.53	142	58.49	42.91
W5	86.63	2.28	6.39	7.69	127	51.07	42.68
S1	87.84	1.89	12.14	13.69	175	63.15	33.86
S2	199.47	2.18	21.23	10.81	235	91.23	37.70
S3	78.04	2.18	8.64	11.11	140	61.93	39.79
S4	110.98	2.37	14.33	12.77	178	81.09	45.02
S5	94.19	2.03	9.91	10.46	207	48.20	43.83
S6	171.53	2.39	17.24	9.97	155	110.35	46.95
S7	70.58	1.83	7.41	10.22	107	66.21	36.73
S8	241.21	2.04	15.49	5.82	140	109.86	38.86
B1	112.56	2.16	12.34	11.28	206	60.77	43.43
B2	188.00	2.59	21.59	11.42	239	89.67	42.26
B3	164.00	2.22	17.68	10.94	164	109.20	40.46
B4	161.93	2.44	16.24	10.11	219	72.24	44.98
B5	178.10	2.52	19.79	11.80	213	93.45	47.08
B6	193.38	2.56	25.05	13.24	241	103.21	41.25
B7	148.85	2.38	21.73	14.61	242	90.24	46.41
B8	208.48	2.32	19.82	9.53	205	104.61	43.27
M _W	87.70	2.30	8.08	9.43	149	54.54	40.32
M _S	115.65	2.11	13.30	10.61	167	79.00	40.34
M _B	185.49	2.40	19.28	11.62	216	90.42	43.64
M	135.60	2.27	14.33	10.71	181	77.53	41.59
C _W /%	16.59	1.24	14.02	19.20	13.66	4.48	5.97
C _S /%	37.27	9.07	32.93	20.56	22.86	27.38	10.45
C _B /%	14.91	6.16	18.81	13.22	11.27	17.21	5.07
C /%	38.29	8.63	39.26	19.13	22.46	27.72	8.54

注: M_W 表示该表格中 W1~W5 的平均值, M_S 表示 S1~S8 的平均值, M_B 表示 B1~B8 的平均值, M 表示 21 份种质的平均值; C_W 表示 W1~W5 的变异系数, C_S 表示 S1~S8 的变异系数, C_B 表示 B1~B8 的变异系数, C 表示 21 份种质的变异系数, 即总变异系数。下同。

Note: M_W is the average value of W1~W5, M_S is the average value of S1~S8, M_B is the average value of B1~B8, and M is the average value of 21 germplasms; C_W is the coefficient of variation of W1 - W5, C_S is the coefficient of variation of S1~S8, C_B is the coefficient of variation of B1~B8, and C is the coefficient of variation of 21 germplasms. Same as below

准,分子量越小亲水性越强对人体消化吸收越有利,因而 21 份种质籽油的皂化值普遍较高(表 4)。

四个理化指标中,无论在种间还是在种内变异最大的都是过氧化值与酸价,其次为碘值,最后为皂化值,这可能是由于 21 份种质籽油中含有的抗氧化物质差异较大,从而导致籽油的氧化酸败程度差异大。在三类木通中,白木通籽油的理化性质变异是最大的。

2.4 相关性分析

为了揭示各指标的关联程度,也为筛选核心指

标提供依据,现对木通属植物果实的籽油品质指标进行相关性分析是。研究发现,单果质量与单果种子质量及千粒重呈极显著正相关,与种粒数呈显著正相关,与棕榈酸、饱和脂肪酸呈显著负相关;果形指数与单果种子质量、种粒数呈显著正相关,与含油率、油酸、单不饱和脂肪酸、皂化值呈极显著正相关,与过氧化值呈显著负相关;种子百分率与种粒数呈显著正相关。由此可推测,果实质量和果形指数较大的种质,其种子含油率较高,饱和脂肪酸含量较低,单不饱和脂肪酸含量较高,且籽油不易被

表3 木通属植物不同种质籽油的脂肪酸相对质量分数分析
Table 3 Analysis of relative content of fatty acids in seed oil of *Akebia* germplasms /%

	饱和脂肪酸					单不饱和脂肪酸			多不饱和脂肪酸	不饱和脂肪酸
	Saturated fatty acids					Monounsaturated fatty acids			Polyunsaturated fatty acids	Unsaturated fatty acids
	肉豆蔻酸 C14:0	棕榈酸 C16:0	硬脂酸 C18:0	花生酸 C20:0	小计 Total	油酸 C18:1	棕榈油酸 C16:1	小计 Total	亚油酸 C18:2	小计 Total
W1	0.135	15.576	2.799	—	18.510	33.383	0.316	33.699	30.979	64.678
W2	0.117	14.468	2.518	—	17.103	31.264	0.196	31.46	26.696	58.156
W3	0.151	14.411	2.556	—	17.118	30.912	0.242	31.154	24.218	55.372
W4	0.163	14.809	3.413	—	18.385	35.525	0.211	35.736	27.681	63.417
W5	0.098	15.176	3.110	0.089	18.473	36.779	0.236	37.015	23.835	60.850
S1	0.128	14.234	2.091	—	16.453	21.880	0.248	22.128	32.579	54.707
S2	0.217	14.496	2.279	—	16.992	24.211	0.269	24.48	31.867	56.347
S3	0.100	14.712	2.629	0.068	17.509	28.967	0.222	29.189	27.323	56.512
S4	0.166	15.254	2.593	0.059	18.072	29.931	0.291	30.222	30.541	60.763
S5	0.141	14.071	2.433	0.064	16.709	27.598	0.280	27.878	34.136	62.014
S6	0.144	14.183	2.656	0.066	17.049	25.173	0.192	25.365	30.399	55.764
S7	0.134	13.433	2.479	0.058	16.104	22.585	0.274	22.859	33.785	56.644
S8	0.143	13.431	2.544	0.071	16.189	24.301	0.218	24.519	31.364	55.883
B1	0.089	12.642	1.674	—	14.405	22.804	0.133	22.937	25.360	48.297
B2	0.073	12.813	1.990	0.042	14.918	27.929	0.208	28.137	24.630	52.767
B3	0.173	11.431	1.960	—	13.564	25.440	0.117	25.557	21.881	47.438
B4	0.119	12.014	2.151	—	14.284	29.615	0.216	29.831	21.750	51.581
B5	0.075	13.736	2.431	0.053	16.295	33.800	0.230	34.03	30.217	64.247
B6	0.078	13.567	2.511	—	16.156	37.788	0.218	38.006	28.166	66.172
B7	0.111	14.386	2.308	—	16.805	29.135	0.271	29.406	34.908	64.314
B8	0.074	12.119	1.600	—	13.793	22.148	0.115	22.263	23.487	45.750
M _W	0.13	14.89	2.88	0.02	17.92	33.57	0.24	33.81	26.68	60.49
M _S	0.15	14.23	2.46	0.05	16.88	25.58	0.25	25.83	31.50	57.33
M _B	0.10	12.84	2.08	0.01	15.03	28.58	0.19	28.77	26.30	55.07
M	0.13	13.86	2.42	0.03	16.42	28.63	0.22	28.85	28.37	57.22
C _W	17.49	2.95	11.83	200.00	3.69	6.86	17.26	6.82	9.72	5.62
C _S	21.58	4.05	7.34	58.33	3.72	10.78	13.17	10.70	6.45	4.24
C _B	32.77	7.26	15.06	174.65	7.68	17.43	29.13	17.45	16.17	14.38
C	29.46	7.92	17.21	119.08	8.86	16.74	23.45	16.66	14.15	10.07

氧化(表5)。

酸价与饱和脂肪酸及不饱和脂肪酸呈极显著相关,但与单不饱和脂肪酸及多不饱和脂肪酸(亚油酸)都不相关,只与单不饱和脂肪酸中的棕榈油酸及饱和脂肪酸中的棕榈酸和硬脂酸显著正相关,皂化值与多不饱和脂肪酸(亚油酸)呈极显著正相关,与油酸呈显著正相关。过氧化值与酸价、棕榈酸呈极显著正相关,与亚油酸呈显著正相关。肉豆蔻酸、花生酸及碘值与所测指标无显著相关性。

2.5 主成分分析

2.5.1 指标筛选与数据标准化 为满足主成分分析时抽样适应性检验(KMO)≥0.6的前提条件,以及避免因相关指标过多,使评价时信息重复而导致结

果不准确的发生,因此需对指标进行筛选。根据上述相关性分析可知,在产量性状中,单果质量、果形指数对种子产量及品质有较大影响,同时又与单果种子质量、千粒重、种粒数具有显著相关性,而种粒数又与种子百分率显著相关,因此选择单果质量及果形指数代表这几类指标。含油率虽然与果形指数相关,但在生产中,不同种质的含油率相差5%都值得研究与比较,因此在产量性状中选择了单果质量、果形指数及含油率三个指标;脂肪酸中则选择饱和脂肪酸与总不饱和脂肪酸两类代表其余脂肪酸;理化指标中,过氧化值、皂化值与果形指数相关,可由果形指数代表这两个指标,因此选择酸价与碘值两个指标,最后筛选的指标为单果质量、果

表 4 木通属植物不同种质籽油的理化指标分析
Table 4 Analysis of physicochemical indexes of seed oil from different germplasm of Akebia

种质 Germplasm	酸价/(KOHmg·g ⁻¹) Acid value	碘值/(g·100g ⁻¹) Iodine value	皂化值/(KOHmg·g ⁻¹) Saponification value	过氧化值/(g·100g ⁻¹) Peroxide value
W1	8.58	47.33	269.26	0.15
W2	10.32	75.22	279.38	0.27
W3	6.79	77.16	279.76	0.15
W4	6.23	75.63	272.57	0.13
W5	11.72	78.55	280.32	0.22
S1	6.34	74.74	240.27	0.28
S2	10.04	79.19	237.87	0.27
S3	7.63	54.95	238.94	0.25
S4	8.98	58.25	240.68	0.24
S5	8.92	67.76	243.88	0.38
S6	6.00	57.49	244.38	0.27
S7	8.70	81.85	238.42	0.27
S8	11.00	73.58	241.08	0.16
B1	3.31	76.27	275.06	0.04
B2	4.04	73.09	280.78	0.05
B3	4.77	75.76	274.22	0.05
B4	6.73	69.54	281.53	0.05
B5	7.18	70.30	279.94	0.07
B6	10.38	68.02	279.68	0.15
B7	5.16	73.22	280.96	0.03
B8	2.64	69.03	240.90	0.05
M _W	8.73	70.78	276.26	0.18
M _S	8.45	68.48	240.69	0.27
M _B	5.53	71.90	274.13	0.06
M	7.40	70.33	261.90	0.17
C _W /%	23.79	16.65	1.63	28.92
C _S /%	19.03	14.31	0.93	21.20
C _B /%	42.40	4.07	4.68	56.16
C/%	33.86	12.33	7.11	60.46

形指数、含油率、饱和脂肪酸、不饱和脂肪酸、酸价、碘值,其中饱和脂肪酸与酸价为负向指标,将二者正向化后,需通过 SPSS 描述性统计对各指标数据标准化。

2.5.2 主成分分析 通过 SPSS 进行主成分分析,结果显示 KMO 为 0.625(>0.6),Bartlett 球形检验的显著性 *P* 值为 0.000(<0.05),说明数据可以做主成分分析。表 6 显示前 3 个主成分的特征值大于 1,累计贡献率为 80.855%,表明这 3 个主成分反映了原始变量的绝大部分信息。由表 6 可知,对第一主成分影响较大的主要是饱和脂肪酸、不饱和脂肪酸及酸价,对第二主成分影响较大的主要是果形指数、含油率,对第三主成分影响较大的有单果质量及碘值。

2.5.3 主成分分析的综合得分与评价 用各指标变量的主成分载荷除以主成分相对应的特征值开

平方根,便得到 3 个主成分中每个指标所对应的系数即特征向量,以特征向量为权重构建 3 个主成分的函数表达式,再以各主成分所对应的方差贡献率作为权重,根据主成分得分和对应的权重线性加权求和得到主成分的综合得分模型: $F=0.371F_1+0.290F_2+0.147F_3$ 。

通过各主成分的函数表达式计算出 21 份种质各主成分得分值,然后再以主成分综合得分模型计算出 21 份种质果实品质性状的综合得分和排名。在综合得分排序情况中(表 7),排名在前的基本为白木通种质,其中三叶木通的 S6 在 21 份种质中排名第 6 位。

2.6 灰色关联度分析

2.6.1 无量纲化处理 进行灰色关联度分析前要进行无量纲化处理,将各参试种质各指标的值得除以

表5 各品质指标的相关性分析
Table 5 Correlation analysis of each quality index

	单果质量 Single fruit weight	单果指数 Fruit shape index	单果种子质量 Single fruit seed weight	种子百分率 Seed percent-age	种子数 Seed number	千粒重 1000 grain weight	含油率 Oil content	肉豆蔻酸 C14:0	棕榈酸 C16:0	硬脂酸 C18:0	花生酸 C20:0	油酸 C18:1	棕榈油酸 C16:1	亚油酸 C18:2	饱和脂肪酸 Saturated fatty acids	单不饱和脂肪酸 Monounsaturated fatty acids	不饱和脂肪酸 Unsaturated fatty acids	碘值 Iodine value	皂化值 Saponification value	过氧化值 Peroxide value
单果质量 Single fruit weight	1																			
果形指数 Fruit shape index	0.389	1																		
单果种子质量 Single fruit seed weight	0.845**	0.536*	1																	
种子百分率 Seed percentage	-0.147	0.182	0.375	1																
种子数 Seed number	0.518*	0.520*	0.784**	0.521*	1															
千粒重 1000 grain weight	0.878**	0.326	0.828**	0.046	0.327	1														
含油率 Oil content	0.262	0.599**	0.34	0.098	0.344	0.270	1													
肉豆蔻酸 C14:0	-0.092	-0.381	-0.187	-0.169	-0.271	-0.017	-0.283	1												
棕榈酸 C16:0	-0.525*	-0.07	-0.450*	0.078	-0.307	-0.483*	-0.089	0.252	1											
硬脂酸 C18:0	-0.389	0.024	-0.493*	-0.339	-0.530*	-0.360	0.030	0.274	0.747**	1										
花生酸 C20:0	-0.052	-0.149	-0.238	-0.340	-0.405	0.005	0.214	-0.102	0.254	0.353	1									
油酸 C18:1	-0.193	0.581**	-0.100	-0.002	0.011	-0.259	0.282	-0.201	0.454*	0.675**	0.037	1								
棕榈油酸 C16:1	-0.407	-0.176	-0.258	0.279	-0.095	-0.394	-0.103	0.303	0.731**	0.506*	0.238	0.283	1							
亚油酸 C18:2	-0.119	-0.425	0	0.314	0.01	-0.024	-0.074	0.262	0.498*	0.224	0.228	-0.164	0.682**	1						
饱和脂肪酸 Saturated fatty acids	-0.511*	-0.059	-0.491*	-0.050	-0.399	-0.468*	-0.061	0.292	0.980**	0.864**	0.312	0.531*	0.709**	0.452*	1					
单不饱和脂肪酸 Monounsaturated fatty acids	-0.197	0.577**	-0.103	0.001	0.009	-0.262	0.280	-0.197	0.461*	0.679**	0.039	1.000**	0.293	-0.156	0.537*	1				
不饱和脂肪酸 Unsaturated fatty acids	-0.247	0.186	-0.086	0.219	0.015	-0.236	0.182	0.018	0.732**	0.723**	0.192	0.720**	0.719**	0.566**	0.763**	0.726**	1			
酸价 Acid value	-0.132	-0.168	-0.264	-0.254	-0.264	-0.219	-0.301	0.272	0.552**	0.607**	0.396	0.421	0.565**	0.32	0.606**	0.426	0.579**	1		
碘值 Iodine value	0.132	-0.24	0.030	-0.295	0.043	-0.026	-0.343	0.078	-0.34	-0.181	-0.174	-0.195	-0.253	-0.136	-0.31	-0.197	-0.259	-0.012	1	
皂化值 Saponification value	-0.023	0.629**	0.105	0.093	0.276	-0.137	0.281	-0.373	-0.136	0.074	-0.361	0.622**	-0.179	-0.487*	-0.099	0.618**	0.176	-0.131	0.207	1
过氧化值 Peroxide value	-0.412	-0.517*	-0.448*	-0.099	-0.351	-0.373	-0.393	0.405	0.556**	0.395	0.433*	-0.08	0.491*	0.511*	0.552**	-0.075	0.293	0.612**	-0.122	-0.608**

表 6 各品质指标的成分载荷矩阵
Table 6 Composition load matrix of each quality index

品质指标 Quality index	主成分 1	主成分 2	主成分 3
	PC1	PC2	PC3
X1	0.586	0.321	0.618
X2	0.187	0.833	0.213
X3	0.187	0.854	-0.108
X4	0.932	-0.125	0.035
X5	-0.813	0.387	0.220
X6	0.753	0.129	-0.519
X7	0.299	-0.569	0.521
特征值 Eigenvalue	2.599	2.031	1.030
贡献率 Contribution rate /%	37.127	29.014	14.714
累计贡献率 Cumulative contribution rate /%	37.127	66.141	80.855

注:表中 X1~X7 依次为单果质量、果形指数、含油率、饱和脂肪酸、不饱和脂肪酸、酸价、碘值
Note: X1 - X7 are single fruit weight, fruit shape index, oil content, saturated fatty acid, unsaturated fatty acid, acid value and iodine value respectively

表 7 木通属植物不同种质的籽油品质主成分得分
Table 7 Main component scores of seed oil quality of Akebia germplasm

种质 Germplasm	F1	F2	F3	F	排名 Ranking
W1	-2.65	1.03	-1.67	-0.93	19
W2	-1.10	-0.92	0.71	-0.57	16
W3	-0.31	-0.99	-0.28	-0.44	14
W4	-1.13	0.36	-0.12	-0.33	13
W5	-2.01	-0.22	0.84	-0.69	17
S1	-0.30	-2.85	-0.77	-1.05	20
S2	-0.18	-1.12	1.75	-0.13	11
S3	-1.22	-0.08	-1.59	-0.71	18
S4	-1.48	1.51	-0.56	-0.19	12
S5	-1.20	-0.20	-0.46	-0.57	15
S6	0.36	1.99	-0.70	0.61	6
S7	-0.67	-2.96	-0.15	-1.13	21
S8	0.12	-1.01	1.91	0.03	10
B1	2.25	-0.76	-1.18	0.44	8
B2	2.20	0.98	0.28	1.14	2
B3	2.67	-0.97	-0.19	0.68	5
B4	1.81	0.85	0.05	0.92	3
B5	0.10	2.15	0.81	0.78	4
B6	-0.70	1.44	1.77	0.42	9
B7	0.02	1.48	0.10	0.45	7
B8	3.42	0.28	-0.54	1.27	1

注:表中 F1~F3 依次为主成分 1 的得分、主成分 2 的得分及主成分 3 的得分,F 为综合得分
Note: F1 - F3 are scores of main component 1, main component 2 and main component 3 in turn, and F is comprehensive score

该指标的平均值,来消除量纲带来的影响。

2.6.2 构建理想种质 以 21 份种质的各正向指标(单果质量、果形指数、含油率、不饱和脂肪酸、碘

值)的最大值及负向指标(饱和脂肪酸、酸价)的最小值作为参考种质,并将理想种质的理想值按照 2.6.1 的方法进行无量纲化处理,结果如表 8 所示。

2.6.3 关联系数计算 计算出 21 份种质的绝对差值后,并找出最小绝对差值(0)与最大绝对差值(1.302),最后计算出 21 份种质的 8 个品质指标对理想种质的关联系数。

2.6.4 关联度计算 按关联分析原则,关联度大的数列与参考数列最为接近,即该种质越接近“理想种质”,代表其品质越好。反之,相似程度低,综合性状表现越差^[12]。加权关联度表示各性状特征值的重要性不相同,根据其重要程度给予不同的权重系数,并通过权重系数计算出等权关联度后,最后得出加权关联度。结果如表 9 所示,排名在前的为白木通种质,三叶木通种质中的 S8 在 21 份种质中排名第 8 位。

2.7 综合评价

综合表 7 与表 9 来看,两种方法分析的排名情况中只有少数种质的排序结果变幅较大,且综合排名在前的始终为白木通种质,这说明其结果具有一定的可信度,白木通种质确实较优,同时还有三叶木通种质中的 S6 与 S8 两份种质,前者在主成分分析中排名第 6 位,后者在灰色关联度中排名第 8 位,总体排名中等偏上,同样值得开发利用。

21 份种质中果皮色泽的变异也非常大,结合果皮色泽与排名情况来看,同为绿色的 W2 与 B5,前者排名第 4 位和第 2 位,后者在第 16 和第 18 位;同为褐色且果锈斑多的 W3 与 B6,前者排名第 9 和第 5 位,后者排名第 14 和第 16 位;同为紫红色的 W1、S1、S4、S6、S7 的排名从居中到靠后的均有涉及,从

表 8 理想种质的参考值与无量纲值
Table 8 Reference value and dimensionless value of ideal germplasm

理想种质	单果质量	果形指数	含油率	饱和脂肪酸	不饱和脂肪酸	酸价	碘值
Ideal germplasm	Single fruit weight	Fruit shape index	Oil content	Saturated fatty acids	Unsaturated fatty acids	Acid value	Iodine value
理想值	241.21	2.59	47.08	13.56	66.17	2.64	81.85
Ideal value							
无量纲值	1.78	1.14	1.13	0.83	1.16	0.36	1.16
Dimensionless value							

表 9 木通属植物不同种质的加权关联度及排名
Table 9 Weighted association degree and ranking of different germplasm of Akebia

种质	单果质量	果形指数	含油率	饱和脂肪酸	不饱和脂肪酸	酸价	碘值	种质加权关联度	排名
Germplasm	Single fruit weight	Fruit shape index	Oil content	Saturated fatty acids	Unsaturated fatty acids	Acid value	Iodine value	Weighted correlation degree of germplasm	Ranking
W1	0.003 4	0.020 6	0.020 5	0.014 4	0.028 5	0.006 2	0.010 0	0.103 7	19
W2	0.004 5	0.021 7	0.015 8	0.016 8	0.020 1	0.004 4	0.022 7	0.106 0	18
W3	0.003 7	0.020 7	0.016 3	0.016 3	0.017 5	0.008 4	0.023 9	0.106 8	16
W4	0.004 2	0.019 1	0.020 8	0.013 1	0.024 0	0.009 1	0.021 4	0.111 8	10
W5	0.003 9	0.019 9	0.021 6	0.013 7	0.022 4	0.003 5	0.025 4	0.110 4	12
S1	0.004 1	0.014 0	0.013 7	0.018 8	0.017 8	0.009 7	0.022 8	0.100 9	20
S2	0.012 9	0.017 2	0.015 5	0.016 1	0.017 6	0.004 4	0.025 1	0.108 7	13
S3	0.003 9	0.019 2	0.019 4	0.016 7	0.019 7	0.007 5	0.012 4	0.098 8	21
S4	0.004 8	0.022 2	0.025 3	0.014 5	0.022 4	0.005 5	0.012 8	0.107 4	14
S5	0.004 1	0.015 4	0.023 4	0.017 5	0.023 8	0.005 5	0.017 2	0.107 0	15
S6	0.008 6	0.021 3	0.027 1	0.015 6	0.016 7	0.009 5	0.011 7	0.110 5	11
S7	0.003 5	0.013 0	0.015 7	0.019 5	0.019 0	0.005 9	0.029 9	0.106 5	17
S8	0.027 0	0.014 3	0.015 9	0.017 4	0.016 6	0.003 6	0.019 4	0.114 1	8
B1	0.004 4	0.015 8	0.020 4	0.022 6	0.012 0	0.020 3	0.020 9	0.116 2	6
B2	0.009 7	0.025 0	0.018 0	0.019 7	0.013 5	0.015 0	0.017 6	0.118 7	3
B3	0.007 6	0.017 0	0.017 2	0.026 6	0.011 8	0.012 8	0.020 7	0.113 5	9
B4	0.007 4	0.022 0	0.023 0	0.023 5	0.013 8	0.007 8	0.016 6	0.114 1	7
B5	0.008 7	0.023 3	0.025 5	0.016 2	0.023 1	0.006 8	0.016 3	0.119 7	2
B6	0.011 1	0.025 4	0.017 9	0.017 1	0.026 4	0.003 9	0.015 6	0.117 4	5
B7	0.006 1	0.019 7	0.024 5	0.015 1	0.023 3	0.011 1	0.018 2	0.118 0	4
B8	0.013 0	0.017 4	0.018 7	0.023 4	0.010 2	0.024 4	0.014 9	0.122 0	1

中可以看出果色对籽油综合品质的影响并不大。

在果形方面,本试验将 21 份种质的果实形状分为了 7 种,结合果形与排名情况来看,果形对籽油的综合品质影响并不大,例如上述分析中的相同果色且同为长卵形的 W2 与 B5;同为中肾形的 S3 与 B4,前者排名第 18 与第 21,后者排名第 3 与第 7;同为中型小头形的 W1 与 B3,前者排名第 19,后者排名第 5 和第 9 名。

3 讨论与结论

本试验研究的三种木通时尽可能选择了更贴近原始种的种质,三类种质(白木通、三叶木通、木通)无论是果皮色泽还是果实形状的变异都较大,

这与陈绪中等人^[9]的研究结果一致。同时在果实形状命名方面也较一致,但本文进行了更为细致的分类,将长卵形果形分为了长卵形、长卵球形及卵球形,将肾形果形分为了大肾形、中肾形及小肾形,但未采用近梨形,因为在研究中发现,头部较小的果形有长形果形及短形果形,因此本文改用了“小头形”一词来描述该类果形。

前人的研究发现,木通属植物籽油的酸值在 0.418~8.85 KOH mg·g⁻¹,各研究的酸值差异较大^[5,10,17,18],这可能与种质及生长环境不同有关,与本研究结果较为一致,例如试验中由于种质不同测出的酸值为 2.64~11.72 KOH mg·g⁻¹。从中也可以看出木通属植物籽油酸值具有不确定性,认为容易酸

败变质,并且推断出不同的种质籽油抗氧化酸败的能力参差不齐。过氧化值也仅有部分种质符合国家食用原油标准,这些都表明了木通属植物种子在放置过程中,籽油发生了氧化降解。虽然本试验的籽油品质仅代表 21 份种质的种子在相同的放置时间下(半年左右)测定出的品质,但也同样能比较出不同种质的优劣。

木通属植物籽油应用较广,本试验以食用油脂的标准对 21 份木通属植物种质籽油的产量及品质进行综合评价,从种间及种内的变异情况来看,发现三叶木通在产量性状方面变异较大,白木通在油脂品质方面变异较大。但简单的变异系数分析并不能准确评价出哪一种质的优劣,进行综合分析是综合评价的前提。本试验综合了主成分分析与灰色关联度分析,使用这两种原理完全不同的方法进行综合评价,其目的是使结果可信度更高。主成分分析结果显示,前 4 个主成分的累计贡献率为 80.855%,同时白木通种质的综合得分较高;灰色加权关联度结果显示排名在前的虽然也为白木通,但其排名略有差异。同时还有三叶木通种质中的 S6 与 S8 两份种质,前者在主成分分析中排名第 6 位,后者在灰色关联度中排名第 8 位,总体排名中等偏上,同样值得开发利用。

目前木通籽油的品质研究多集中在含油率、理化性质及脂肪酸组成上,而其他功能性伴随脂质(如生育酚、甾醇、磷脂或者其他特定组分)少有报导,它们是否存在于木通籽油中以及在不同的种质中含量的差异大小这些都有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(第一部 2015 版)[S]. 北京: 中国医药科技出版社, 2015.
- [2] Lu W, Yang T, Song Q, et al. *Akebia trifoliata* (Thunb.) Koidz seed extract inhibits human hepatocellular carcinoma cell migration and invasion *in vitro* [J]. *J Ethnopharmacol*, 2019, 234(24): 204–215.
- [3] 郭林新, 马养民, 李梦云, 等. 三叶木通利尿活性部位筛选及其化学成分[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2017, 23(3): 66–70. DOI: 10.13422/j.cnki.syfjx.2017030066.
- [4] 欧阳玉祝, 李勇, 吴道宏, 等. 八月瓜籽中脂肪酸的超声提取及 GC-MS 分析[J]. *食品科学*, 2010, 31(20): 322–324.
- [5] 胡冰峰. 白木通种子油的理化特性及制备生物柴油的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2012.
- [6] 刘雷, 曹柳, 杜玖珍, 等. 基于主成分及聚类分析的川产半夏产量与品质的综合评价[J]. *中草药*, 2016, 47(14): 2519–2525. DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2016.14.022.
- [7] 郭方其, 黑银秀, 刘君, 等. 基于层次分析法的切花多头菊品质性状评价[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(17): 51–56.
- [8] 李欣, 卓冰雨, 祁晓娟, 等. 黄芩异黄酮含量与气候因子的灰色关联度和通径分析[J]. *中国中药杂志*, 2020, 45(14): 3407–3413. DOI: 10.19540/j.cnki.cjcmm.20200506.104.
- [9] 李丽, 陈绪中, 姚小洪, 等. 三种木通属植物的地理分布与资源调查[J]. *武汉植物学研究*, 2010, 28(4): 497–506. DOI: 10.3724/SP.J.1142.2010.40497.
- [10] 李园园, 陈松树, 刘红昌, 等. 基于籽油理化特性及脂肪酸组成的白木通种质资源评价[J]. *中国油料作物学报*, 2020, 42(5): 843–850.
- [11] 周娜娜. 三叶木通籽油提取及生物活性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018.
- [12] 张晓梅, 杨燕, 王鲁北, 等. 鲁南地区 8 个苜蓿品种营养品质测定及关联分析[J]. *黑龙江畜牧兽医(下半月)*, 2019(8): 125–128. DOI: 10.13881/j.cnki.hljxmsy.2018.12.0230.
- [13] Franczyk-Żarów M, Kuś E, Kostogrys R B. Effect of conjugated linoleic acid and different type of dietary fat on serum lipid profile, liver enzymes activity and oxidative stress markers in Wistar rats [J]. *Rocz Panstw Zakl Hig*, 2019, 70(1): 27–33. DOI: 10.32394/rp-zh.2019.0049.
- [14] 许泽群, 张乐, 杨静媚, 等. 食用油煎炸过程特征指标的相关性分析[J]. *粮油食品科技*, 2020, 28(5): 131–137.
- [15] 卢银洁. 胡麻油贮存品质的研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2017.
- [16] 陈柏林. 南带油茶油脂品质特征研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018.
- [17] 李朝阁. 八月瓜酒酿造及籽油、多酚提取和抗氧化性研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2016.
- [18] 欧阳玉祝, 张晓旭, 唐项婉, 等. 八月瓜果籽油功能成分与抗氧化活性研究[J]. *中国油脂*, 2015, 40(8): 85–88.

(责任编辑:郭学兰)