果 树 学 报 2022,39(10):1798-1812
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20220058

澳洲坚果种质资源数量分类研究

万继锋,邹明宏,陈 菁,宋喜梅,杨 倩,罗炼芳,曾 辉*

(中国热带农业科学院南亚热带作物研究所·农业农村部热带果树生物学重点实验室·
海南省热带园艺产品采后生理与保鲜重点实验室,广东湛江 524091)

摘 要:【目的】分析澳洲坚果种质资源表型性状多样性,并根据其多样性进行数量分类。**【方法】**根据《澳洲坚果种质资源描述规范和数据标准》和《澳洲坚果种质资源鉴定技术规范》中的鉴定评价方法进行观测和描述,并基于此进行聚类分析和主成分分析。**【结果】**26个描述性状平均变异类型为3.4个,嫩叶颜色、叶片形状和种脐侧面凹痕大小的变异类型最为丰富,各为5个;26个数量性状中,含油率的变异系数最小为1.68%,花序长度的变异系数最大为21.54%;Q型聚类分析将60份种质资源在欧氏距离为20.83时分为4个类群,类群内种质以单果质量、叶序、叶柄长度、嫩叶颜色、小花颜色、带壳果表面质地聚类;R型聚类分析将52个表型性状在相关系数2.16处聚为5组,多数性状表现两两相关;主成分分析结果将52个表型性状简化为15个主成分,包含叶序、嫩叶颜色、叶柄长度、花序长度、小花数量、小花颜色、带皮果单粒鲜质量、带皮果腹缝线、带壳果单粒干质量、带壳果表面质地、带壳果表面斑纹分布、带壳果腹缝线、珠孔、种脐、果壳厚度、果仁单粒干质量、出仁率、一级果仁率等主要表型性状,第1和第2主成分解释的总变异为27.427 2%,其结果与聚类分析基本一致。**【结论】**澳洲坚果种质资源表型性状存在丰富的多样性,基于表型性状的数量分类对构建澳洲坚果种质分类体系具有参考价值。

关键词:澳洲坚果;种质资源;表型性状;多样性;数量分类

中图分类号:S664.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-9980(2022)10-1798-15

Study on numerical taxonomy of *Macadamia* spp. germplasm resources

WAN Jifeng, ZOU Minghong, CHEN Jing, SONG Ximei, YANG Qian, LUO Lianfang, ZENG Hui*

(South Subtropical Crop Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences/Key Laboratory of Tropical Fruit's Biology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Key Laboratory for Postharvest Physiology and Technology of Tropical Horticultural Products of Hainan Province, Zhanjiang 524091, Guangdong, China)

Abstract:【Objective】According to the phenotypic and genetic diversity, the numerical taxonomy of macadamia germplasm resources was studied. The traditional morphological taxonomy is based on one or several botanical characteristics, which may not represent the comprehensive characteristics of each germplasm resource. Morphological numerical taxonomy is based on the similarity of phenotypic traits, and constructs a clustering tree diagram by quantitative comparison and pedigree analysis of biological population, which is more objective and accurate than the traditional morphological taxonomy.【Methods】52 phenotypic traits were observed and described with reference to the methods described in the books of "Description specification and data standard for macadamia germplasm resources" and "Technical specification of identification for macadamia germplasm resources", and the data were analyzed by Q cluster analysis, R cluster analysis and principal component analysis. After the original data were standardized, the clustering tree diagram of 60 macadamia germplasm resources was constructed by Q cluster analysis using the method of average Euclidean distance and square sum of deviations. 52 phenotypic traits were analyzed by R cluster analysis using the method of correlation coefficient and square sum of deviations. Based on the standardized data, 52 phenotypic traits were analyzed by principal com-

收稿日期:2022-02-18 **接受日期:**2022-05-20

基金项目:农业农村部品种改良提升专项;海南省自然科学基金青年基金项目(321QN300);中国热带农业科学院"揭榜挂帅"项目(1630062022002);国家科技资源共享服务平台国家热带植物种质资源库项目(NTPGRC2022-012)

作者简介:万继锋,男,助理研究员,主要从事果树种质资源与遗传育种工作。Tel:13531135520,E-mail:wanjifeng2002@163.com

*通信作者 Author for correspondence. E-mail:13692441670@163.com

ponent analysis, and the numbers of principal components were determined according to the latent root and accumulative contributor ratio, and the phenotypic traits were selected according to the loading value.【Results】The average variation type of 26 descriptive characteristics was up to 3.4, among which the young leaf color, leaf shape and dent size on lateral hilum had the most variation with coefficient 5. The frequency of various types of descriptive characteristics varied greatly. The frequency of 12 descriptive types was more than 60% and the frequency of 5 descriptive types was less than 5%. Among 26 numerical characteristics, the inflorescence length was largest and the coefficient of variation was 21.54%, and the smallest coefficient of variation of the oil content was 1.68%. The variation coefficients of leaf length, leaf width, leaf shape index, leaf petiole length, inflorescence length, floweret number, fresh weight of single fruit, fruit petiole length, dry weight of single seed, shell thickness, dry weight of single kernel and percentage of kernel were 12.53%−21.54%. The leaf shape index was very significantly and positively correlated with leaf length and negatively correlated with leaf width, while inflorescence length was very significantly and positively correlated with floweret number. The fresh weight of single fruit, fruit longitudinal diameter and fruit transverse diameter were very significantly or significantly positively correlated with the dry weight of single seed, seed longitudinal diameter and seed transverse diameter, dry weight of single kernel, kernel longitudinal diameter and kernel transverse diameter. The percentage of kernel was very significantly and positively correlated with the dry weight of single kernel and negatively correlated with the shell thickness. The Grade 1 kernel percentage was very significantly or significantly positively correlated with the dry weight of single seed, dry weight of single kernel and kernel transverse diameter. The oil content was very significantly or significantly positively correlated with the dry weight of single seed, dry weight of single kernel and Grade 1 kernel percentage. The result of Q cluster analysis based on 52 phenotypic characteristics demonstrated that 60 macadamia germplasm resources were divided into 4 groups at the Euclidean distance of 20.83 according to the characteristics of the fresh weight of single fruit, dry weight of single seed, dry weight of single kernel, leaf arrangement, leaf petiole length, young leaf color, floweret color and surface texture of seed, e.g., *M. integrifolia* with small fruit, *M. integrifolia* with medium fruit, *M. integrifolia* with large fruit and *M. integrifolia* × *M. tetraphylla* Hybrids with largest fruit. The result of R cluster analysis showed that 52 phenotypic characteristics were significantly clustered into 5 groups with the coefficient of 2.16, which revealed well the correlation between phenotypic characteristics. Principal component analysis indicated 52 phenotypic characteristics were mainly composed of 15 independent principal components, the first and second principal components explained 27.427 2% of total variance, and the results were basically consistent with those of the cluster analysis.【Conclusion】The phenotypic and genetic diversities of plant, leaf, flower and fruit were abundant in macadamia germplasm resources. The main phenotypic characteristics, such as leaf arrangement, leaf petiole length, young leaf color, inflorescence length, floweret number, floweret color, fresh weight of single fruit, dry weight of single seed, dry weight of single kernel, surface texture of seed, percentage of kernel, Grade.1 kernel percentage, shell thickness, fruit abdominal suture, seed abdominal suture, surface speckle distribution of seed, micropyle and hilum, played an important role in the phenotypic diversity of macadamia germplasm resources. 60 macadamia germplasm resources were clustered into four groups according to the characteristics of the weight of single fruit, leaf arrangement, leaf petiole length, young leaf color, floweret color and surface texture of seed. Based on phenotypic characteristics, numerical taxonomy had an applied value for building the taxonomy system for macadamia germplasm resources.

Key words: *Macadamia* spp.; Germplasm resources; Phenotypic characteristics; Diversity; Numerical taxonomy

澳洲坚果（*Macadamia* spp.）原产澳大利亚，为山龙眼科（Proteaceae）澳洲坚果属（*Macadamia* F. Muell）常绿乔木果树[1-2]，至今有160多年的栽培历史，因最先在美国夏威夷开展商业化大规模种植，故又称为夏威夷果。澳洲坚果因其果实的经济价值高且市场消费量大，越来越多宜植区的国家和地区正积极引种试种或扩大种植面积。澳洲坚果最早于20世纪初由我国台湾引种于台北植物园，直到20世纪70年代末才在我国大陆开展澳洲坚果引种试种试验工作。经过40多年的发展，我国已成为世界上澳洲坚果种植面积最大的国家，主要分布在云贵、两广海拔1300 m以下的丘陵山地，西藏林芝地区也在积极引种试种[3]。据农业农村部统计资料，截至2019年底，我国澳洲坚果种植面积占全球种植面积的61%，约24.5万hm^2，位居全球第一，但因投产面积少，带壳果产量约2.1万t，位居南非、澳大利亚、肯尼亚之后的全球第四。

澳洲坚果商业栽培品种从形态性状上传统划分为光壳种、粗壳种及其杂交种[4]。这种传统形态分类方法往往根据澳洲坚果植物学某一个或某几个性状，不能代表各品种的综合性状，更不能有效反映个体、群体间的亲缘关系。数量分类以表型性状的相似性为基础，运用数学统计学等方法对生物种群进行定量比较和系谱分析，构建系统聚类树系图，将生物种群分类研究从定性的描述水平提升至定量的综合分析水平[5-6]。近年来，数量分类在柚[7]、木瓜[8]、石榴[9]、龙眼[10]、枇杷[5]、橄榄[11]、黄皮[6]、梨[12]等果树分类研究中得到了广泛应用，万继锋等[13]从叶片表型性状结合数量分类学探讨了澳洲坚果种质资源分类，但尚未结合植株、花、果实等表型性状进行进一步研究。

表型性状，如叶序、小花颜色、带壳果表面质地等，不仅是澳洲坚果种质鉴定评价的重要性状，也是区分不同澳洲坚果种质的主要性状。笔者在本研究中以收集保存于中国热带农业科学院南亚热带作物研究所国家热带果树种质资源（澳洲坚果）圃内的60份种质资源为试验材料，分析其植株、叶片、花、果实等表型性状的多样性，并基于此对澳洲坚果种质资源进行聚类分析和主成分分析，旨在为构建一种客观的、量化的澳洲坚果种质资源分类体系提供参考，也为澳洲坚果种质资源的合理利用及种质创制提供依据。

1 材料和方法

1.1 材料

以位于广东省湛江市中国热带农业科学院南亚热带作物研究所国家热带果树种质资源（澳洲坚果）圃内的60份种质资源为研究材料，所有种质均为18~20 a（年）成年树，以嫁接方式保存，常规管理，其编号及名称见表1。

1.2 表型性状观测

试验观测于2018年1月至2019年12月进行，每份种质调查3株长势基本一致的成年树。嫩叶颜色在叶片的展叶期观测，其他叶片性状均在末次梢成熟期观测，每株树从树冠外围中上部东、南、西、北方向各挑选1条成熟枝条，观测从枝条顶端往下发育正常的第2轮叶。花序性状均在开花期观测，每株树从树冠内膛中上部东、南、西、北部位各挑选1个盛花期花序。果实性状均在果实成熟期观测，每株树从树冠内膛中上部东、南、西、北部位各挑选发育正常果实10粒。采用观察法目测树姿、树形等26项描述性状并赋值，采用测量法测量叶片长度、叶片宽度等26项数量性状（表2）。性状鉴定评价参照《澳洲坚果种质资源描述规范和数据标准》[14]和NY/T 1687—2009《澳洲坚果种质资源鉴定技术规范》[15]的方法。

1.3 数据统计

原始数据经标准化处理后，采用平均欧氏距离和离差平方和法对60份澳洲坚果种质进行Q型聚类分析，作出系统聚类树系图。采用相关系数和离差平方和法对52个表型性状进行R型聚类分析。以标准化数据为基础，对52个表型性状进行主成分分析，根据特征值和累积贡献率确定主成分的个数，并根据负荷量的绝对值选择性状。所有数据的统计分析均在DPS V9.01统计分析软件上完成。

2 结果与分析

2.1 澳洲坚果种质资源表型性状评价

2.1.1 描述性状多样性评价 26项描述性状在参试的60份澳洲坚果种质资源中共检测到88个变异类型，每个性状的平均变异类型为3.4个，各个性状的变异类型各不相同。嫩叶颜色、叶片形状和种脐侧面凹痕大小的变异类型最为丰富，各为5个（表3）。说明供试澳洲坚果种质的树姿、树形、叶片、花、果实等表型描述性状差异明显。

表1　澳洲坚果种质资源编号及名称

Table 1　The number and name of 60 macadamia germplasm resources

编号 No.	种质名称 Germpiasm name	来源 Source	种质类型 Germplasm types	编号 No.	种质名称 Germpiasm name	来源 Source	种质类型 Germplasm types
1	HAES246	美国 America	*M. integrifolia*	31	优株A Elite plant A	中国 China	*M. integrifolia*
2	HAES333	美国 America	*M. integrifolia*	32	优株B Elite plant B	中国 China	*M. integrifolia*
3	HAES344	美国 America	*M. integrifolia*	33	优株D Elite plant D	中国 China	*M. integrifolia*
4	HAES508	美国 America	*M. integrifolia*	34	实选8号 Seedling selection 8	中国 China	*M. integrifolia*
5	HAES660	美国 America	*M. integrifolia*	35	实选9号 Seedling selection 9	中国 China	*M. integrifolia*
6	HAES695	美国 America	*M. integrifolia*×*M. tetraphylla* Hybrids	36	实选10号 Seedling selection 10	中国 China	*M. integrifolia*
7	HAES741	美国 America	*M. integrifolia*	37	实选15号 Seedling selection 15	中国 China	*M. integrifolia*
8	HAES783	美国 America	*M. integrifolia*	38	实选17号 Seedling selection 17	中国 China	*M. integrifolia*
9	HAES788	美国 America	*M. integrifolia*	39	实选18号 Seedling selection 18	中国 China	*M. integrifolia*
10	HAES800	美国 America	*M. integrifolia*	40	实选19号 Seedling selection 19	中国 China	*M. integrifolia*
11	HAES814	美国 America	*M. integrifolia*	41	实选23号 Seedling selection 23	中国 China	*M. integrifolia*×*M. tetraphylla* Hybrids
12	HAES826	美国 America	*M. integrifolia*	42	实选24号 Seedling selection 24	中国 China	*M. integrifolia*
13	HAES900	美国 America	*M. integrifolia*×*M. tetraphylla* Hybrids	43	实选25号 Seedling selection 25	中国 China	*M. integrifolia*
14	A_4	澳大利亚 Australia	*M. integrifolia*×*M. tetraphylla* Hybrids	44	实选36号 Seedling selection 36	中国 China	*M. integrifolia*
15	A_{16}	澳大利亚 Australia	*M. integrifolia*×*M. tetraphylla* Hybrids	45	实选39号 Seedling selection 39	中国 China	*M. integrifolia*
16	$B_{3\text{-}74}$	澳大利亚 Australia	*M. integrifolia*	46	实选41号 Seedling selection 41	中国 China	*M. integrifolia*
17	DAD	澳大利亚 Australia	*M. integrifolia*	47	实选43号 Seedling selection 43	中国 China	*M. integrifolia*
18	H_2	澳大利亚 Australia	*M. integrifolia*	48	实选50号 Seedling selection 50	中国 China	*M. integrifolia*
19	NG_{18}	澳大利亚 Australia	*M. integrifolia*	49	实选52号 Seedling selection 52	中国 China	*M. integrifolia*
20	O.C.	澳大利亚 Australia	*M. integrifolia*	50	实选55号 Seedling selection 55	中国 China	*M. integrifolia*
21	Own venture	澳大利亚 Australia	*M. integrifolia*	51	实选58号 Seedling selection 58	中国 China	*M. integrifolia*
22	Winks	澳大利亚 Australia	*M. integrifolia*	52	实选59号 Seedling selection 59	中国 China	*M. integrifolia*
23	Yonik	澳大利亚 Australia	*M. integrifolia*	53	实选113号 Seedling selection 113	中国 China	*M. integrifolia*
24	特殊种 Special species	澳大利亚 Australia	*M. integrifolia*	54	实选114号 Seedling selection 114	中国 China	*M. integrifolia*
25	南亚1号 Nanya 1	中国 China	*M. integrifolia*	55	实选117号 Seedling selection 117	中国 China	*M. integrifolia*
26	南亚2号 Nanya 2	中国 China	*M. integrifolia*	56	实选118号 Seedling selection 118	中国 China	*M. integrifolia*
27	南亚3号 Nanya 3	中国 China	*M. integrifolia*	57	实选121号 Seedling selection 121	中国 China	*M. integrifolia*
28	南亚12号 Nanya 12	中国 China	*M. integrifolia*	58	实选123号 Seedling selection 123	中国 China	*M. integrifolia*
29	南亚116号 Nanya 116	中国 China	*M. integrifolia*	59	实选127号 Seedling selection 127	中国 China	*M. integrifolia*
30	桂热1号 Guire 1	中国 China	*M. integrifolia*	60	实选130号 Seedling selection 130	中国 China	*M. integrifolia*

树姿和树形具有多种形态，供试材料中树姿以半开张和开张为主，分别占供试材料的41.67%和46.67%；树形以圆形和椭圆形为主，分别占供试材料的51.67%和33.33%。

叶片：供试材料中91.67%的种质叶序为3叶轮生，3叶和4叶轮生兼有的较少；嫩叶以黄绿色居多，成熟叶多为浓绿色，均占供试材料的50.00%以上；65.00%种质的叶片为倒披针形，叶尖以急尖、钝尖和锐尖为主，叶基以急尖的种质居多；多数种质叶缘表现为波浪形或明显波浪形，叶缘锯齿状数较多。

花：小花具有乳白色、淡粉色、粉红色3种颜色，供试材料中93.34%的种质为乳白色；小花开放顺序表现出3种形式，50.00%种质的小花为自花序轴基部向顶端依次开放，83.33%种质为一批次开花现象。

果实：供试材料中带皮果的形状以卵圆形居多，其腹缝线以明显居多，颈部以短、长为主，顶点以乳头状突起明显和极明显为主；带壳果具有4种形状，分布较均匀，表面质地以光滑为主，表面斑纹分布以

表 2 52 个性状及其分级标准

Table 2 52 characters and their grading standards

编号 No.	性状 Character	分级标准 Grading standard
1	树姿 Tree habit(TH)	1=直立，2=半开张，3=开张 1=Upright，2=Upright to spreading，3=Spreading
2	树形 Tree shape(TS)	1=圆形，2=椭圆形，3=圆锥形，4=不规则形 1=Circular, 2=Elliptical, 3=Conic, 4=Irregular
3	叶序 Leaf arrangement(LA)	1=3 叶轮生，2=3 叶和 4 叶轮生，3=4 叶轮生 1=Trifoliate whorl, 2=Trifoliate and tetrafoliate whorls, 3=Tetrafoliate whorls
4	叶片形状 Leaf shape(LS)	1=倒卵形，2=卵圆形，3=椭圆形，4=倒披针形，5=其他形 1=Obovate, 2=Oval, 3=Elliptical, 4=Oblanceolate, 5=Other
5	叶尖形状 Leaf tip shape(LTS)	1=截形，2=钝尖，3=急尖，4=锐尖 1=Truncate, 2=Obtuse, 3=Acute, 4=Sharp
6	叶基形状 Leaf base shape(LBS)	1=渐尖，2=急尖，3=截形 1=Acuminate, 2=Acute, 3=Truncate
7	叶缘形状 Leaf margin shape(LMS)	1=平滑，2=波浪形，3=极明显波浪形 1=Smooth，2=Wavy，3=Obvious wavy
8	叶缘锯齿状数 Serrate number of leaf margin (SNLM)	1=无或极少（< 0.5），2=少（≥ 0.5，< 7.2），3=较多（≥ 7.2，< 25），4=多（≥ 25） 1=Not or very few（< 0.5），2=Few（≥ 0.5，< 7.2），3=Many（≥ 7.2，< 25），4=Very many（≥ 25）
9	嫩叶颜色 Young leaf color(YLC)	1=浅绿色，2=绿色，3=黄绿色，4=微红色，5=紫红色 1=Light green, 2=Green, 3=Yellow green, 4=reddish, 5=Red purple
10	成熟叶颜色 Mature leaf color(MLC)	1=淡绿色，2=绿色，3=浓绿色 1=Light green, 2=Green, 3=Strong green
11	叶片长度 Leaf length(LL)/cm	
12	叶片宽度 Leaf width(LW)/cm	
13	叶形指数 Leaf shape index(LSI)	
14	叶柄长度 Leaf petiole length(LPL)/cm	
15	小花颜色 Floweret color(FC)	1=乳白色，2=淡粉色，3=粉红色 1=Creamy white, 2=Light pink, 3=Pink
16	小花开放顺序 Floweret opening sequence(FOS)	1=自花序轴基部向顶端依次开放，2=由花序轴中部向两端依次开放，3=自花序轴顶端向基部依次开放 1=Floweret opening sequentially from the base of inflorescence axis to the top, 2=Floweret opening sequentially from the middle of inflorescence axis to the both ends, 3=Floweret opening sequentially from the top of inflorescence axis to the base
17	批次开花 Flowering batch(FB)	1=多批次，2=一批次 One batch 1=Multi batch，2=One batch
18	花序长度 Inflorescence length(IL)/cm	
19	小花长度 Floweret length(FL)/mm	
20	小花数 Floweret number(FN)	
21	带皮果单粒鲜质量 Fresh weight of single fruit (FWSF)/g	
22	带皮果形状 Fruit shape(FS)	1=球形，2=卵圆形，3=椭圆形 1=Sphere, 2=Oval, 3=Elliptical
23	带皮果纵径 Fruit longitudinal diamete r (FLD) /mm	
24	带皮果横径 Fruit transverse diameter(FTD)/mm	
25	带皮果果形指数 Fruit shape index(FSI)	
26	带皮果腹缝线 Fruit abdominal suture(FAS)	1=不明显，2=明显 1=Not obvious, 2=Obvious
27	带皮果颈部 Shape of fruit neck (SFN)	1=无，2=短，3=长 1=Not, 2=Short, 3=Long
28	带皮果顶点 Shape of fruit apex(SFA)	1=乳头状突起不明显，2=乳头状突起明显，3=乳头状突起极明显 1=Papillae are not obvious, 2=Papillae are obvious, 3=Papillae are very obvious
29	果柄长度 Fruit petiole length(FPL)/mm	
30	出种率 Percentage of seed recovery(PSR)/%	
31	带壳果单粒干质量 Dry weight of single seed(DWSS) /g	
32	带壳果形状 Seed shape(SS)	1=扁圆形，2=球形，3=倒卵形，4=椭圆形 1=Oblate, 2=Sphere, 3=Obovate, 4=Elliptical
33	带壳果纵径 Seed longitudinal diameter(SLD)/mm	
34	带壳果横径 Seed transverse diameter(STD)/mm	
35	带壳果果形指数 Seed shape index(SSI)	
36	带壳果表面质地 Surface texture of seed(STS)	1=光滑，2=较粗糙，3=粗糙 1=Smooth, 2=Moderately rough, 3=Rough
37	带壳果表面斑纹分布 Surface speckle distribution of seed(SSDS)	1=分散，2=集中在珠孔附近，3=集中在中部，4=集中在种脐附近 1=Scattered, 2=Concentrated near the micropyle, 3=Concentrated in the middle, 4=Concentrated near the hilum
38	带壳果腹缝线 Seed abdominal suture(SAS)	1=不明显，2=明显，3=极明显 1=Not obvious, 2=Obvious, 3=Very obvious
39	珠孔 Micropyle(MI)	1=小，2=中，3=大，4=特大 1=Small, 2=Medium, 3=Big, 4=Especially big
40	种脐 Hilum(HI)	1=小，2=中，3=大，4=特大 1=Small, 2=Medium, 3=Big, 4=Especially big
41	种脐侧面凹痕 Dent on lateral hilum(DLH)	1=无，2=有 1=Not, 2=Yes
42	种脐侧面凹痕大小 Dent size on lateral hilum(DSLH)	1=0，2=小，3=中，4=大，5=特大 1=Zero, 2=Small, 3=Medium, 4=Big, 5=Especially big
43	果壳厚度 Shell thickness(ST)/mm	
44	果仁单粒干质量 Dry weight of single kernel(DWSK)/g	
45	果仁纵径 Kernel longitudinal diameter(KLD)/mm	
46	果仁横径 Kernel transverse diameter(KTD)/mm	
47	果仁果形指数 Kernel shape index(KSI)	
48	果仁颜色 Kernel color(KC)	1=白色，2=乳白色，3=乳黄色 1=White, 2=Creamy white, 3=Creamy yellow
49	出仁率 Percentage of kernel recovery(PKR)/%	
50	一级果仁率 No.1 kernel percentage(NKP)/%	
51	含油率 Oil content(OC)/%	
52	蛋白质含量 Protein content(PC)/%	

表3　26个描述性状多样性统计分析

Table 3　Analysis of diversity for 26 descriptive characters

性状 Character	评价 Evaluation	种质份数 Germpasm number	百分比 Percentage/%
树姿 Tree habit	直立 Upright	7	11.66
	半开张 Upright to spreading	25	41.67
	开张 Spreading	28	46.67
树形 Tree shape	圆形 Circular	31	51.67
	椭圆形 Elliptical	20	33.33
	圆锥形 Conic	6	10.00
	不规则形 Irregular	3	5.00
叶序 Leaf arrangement	3叶轮生 Trifoliate whorl	55	91.67
	3叶和4叶轮生 Trifoliate and tetrafoliate whorls	5	8.33
	4叶轮生 Tetrafoliate whorl	0	0.00
嫩叶颜色 Young leaf color	浅绿色 Light green	4	6.67
	绿色 Green	18	30.00
	黄绿色 Yellow green	35	58.33
	微红色 reddish	3	5.00
	紫红色 Red purple	0	0.00
成熟叶颜色 Mature leaf color	淡绿色 Light green	3	5.00
	绿色 Green	18	30.00
	浓绿色 Strong green	39	65.00
叶片形状 Leaf shape	倒卵形 Obovate	4	6.67
	卵圆形 Oval	4	6.67
	椭圆形 Elliptical	10	16.66
	倒披针形 Oblanceolate	39	65.00
	其他形 Other	3	5.00
叶尖形状 Leaf tip shape	截形 Truncate	1	1.67
	钝尖 Obtuse	18	30.00
	急尖 Acute	24	40.00
	锐尖 Sharp	17	28.33
叶基形状 Leaf base shape	渐尖 Acuminate	21	35.00
	急尖 Acute	30	50.00
	截形 Truncate	9	15.00
叶缘形状 Leaf margin shape	平滑 Smooth	5	8.33
	波浪形 Wavy	29	48.34
	明显波浪形 Obvious wavy	26	43.33
叶缘锯齿状数 Serrate number of leaf margin	无或极少 Not or very few	3	5.00
	少 Few	16	26.67
	较多 Many	25	41.66
	多 Very many	16	26.67
小花颜色 Floweret color	乳白色 Creamy white	56	93.34
	淡粉色 Light pink	2	3.33
	粉红色 Pink	2	3.33
小花开放顺序 Floweret opening sequence	自花序轴基部向顶端依次开放 Floweret opening sequentially from the base of inflorescence axis to the top	30	50.00
	由花序轴中部向两端依次开放 Floweret opening sequentially from the middle of inflorescence axis to the both ends	10	16.67
	自花序轴顶端向基部依次开放 Floweret opening sequentially from the top of inflorescence axis to the base	20	33.33

续表 Continued Table

性状Character	评价Evaluation	种质份数 Germpasm number	百分比 Percentage/%
批次开花 Flowering batch	多批次Multi batch	10	16.67
	一批次One batch	50	83.33
带皮果形状 Fruit shape	球形Sphere	9	15.00
	卵圆形Oval	40	66.67
	椭圆形Elliptical	11	18.33
带皮果腹缝线 Fruit abdominal suture	不明显Not obvious	14	23.33
	明显Obvious	46	76.67
带皮果颈部 Shape of fruit neck	无Not	4	6.67
	短Short	29	48.33
	长Long	27	45.00
带皮果顶点 Shape of fruit apex	乳头状突起不明显Papillae are not obvious	5	8.33
	乳头状突起明显Papillae are obvious	22	36.67
	乳头状突起极明显Papillae are very obvious	33	55.00
带壳果形状 Seed shape	扁圆形Oblate	11	18.33
	球形Sphere	19	31.67
	倒卵形Obovate	13	21.67
	椭圆形Elliptical	17	28.33
带壳果表面质地 Surface texture of seed	光滑Smooth	55	91.67
	较粗糙Moderately rough	5	8.33
	粗糙Rough	0	0.00
带壳果表面斑纹分布 Surface speckle distribution of seed	分散Scattered	35	58.34
	集中在珠孔附近Concentrated near the micropyle	8	13.33
	集中在中部Concentrated in the middle	14	23.33
	集中在种脐附近Concentrated near the hilum	3	5.00
带壳果腹缝线 Seed abdominal suture	不明显Not obvious	12	20.00
	明显Obvious	24	40.00
	极明显Very obvious	24	40.00
珠孔Micropyle	小Small	9	15.00
	中Medium	47	78.33
	大Big	3	5.00
	特大Especially big	1	1.67
种脐Hilum	小Small	38	63.33
	中Medium	14	23.33
	大Big	4	6.67
	特大Especially big	4	6.67
种脐侧面凹痕 Dent on lateral hilum	无Not	47	78.33
	有Yes	13	21.67
种脐侧面凹痕大小 Dent size on lateral hilum	0 Zero	47	78.33
	小Small	8	13.33
	中Medium	3	5.00
	大Big	1	1.67
	特大Especially big	1	1.67
果仁颜色Kernel color	白色White	2	3.33
	乳白色Creamy white	25	41.67
	乳黄色Creamy yellow	33	55.00

分散为主，腹缝线多为明显和极明显；多数种质表现为中珠孔、小种脐、种脐侧面无凹痕，南亚1号表现为特大珠孔，H_2表现为特大种脐及侧面凹痕；果仁颜色多为乳黄色，约占供试材料的55%。

2.1.2　数量性状多样性评价　供试的60份澳洲坚果种质的叶片长度、叶片宽度、叶形指数等26项数量性状的变异系数介于1.68%~21.54%之间，平均变异系数为12.37%（表4）。说明供试澳洲坚果种质的表型数量性状多样性较丰富。

叶片：叶片长度、叶片宽度、叶形指数、叶柄长度的平均值分别为17.12 cm、4.38 cm、3.93、1.18 cm。叶片长度最短的NG18为10.90 cm，最长的实选8号为24.40 cm；叶片宽度最窄的HAES344为3.10 cm，最宽的Winks为5.50 cm；叶形指数最小的H_2为2.65，最大的HAES800为5.68；叶柄长度最短的特殊种为0.50 cm，最长的HAES826为1.80 cm。

表4　26个数量性状多样性统计分析

Table 4　Analysis of diversity for 26 numerical characters

性状Character	平均值Mean	最大值Max	最小值Min	标准差SD	极差Range	变异系数*CV*/%
叶片长度LL/cm	17.12	24.40	10.90	3.31	13.50	19.33
叶片宽度LW/cm	4.38	5.50	3.10	0.58	2.40	13.24
叶形指数LSI	3.93	5.68	2.65	0.73	3.03	18.58
叶柄长度LPL/cm	1.18	1.80	0.50	0.25	1.30	21.19
花序长度IL/cm	19.31	29.00	11.70	4.16	17.30	21.54
小花长度FL/mm	7.97	9.40	6.50	0.68	2.90	8.53
小花数FN	186.50	277.00	130.00	39.84	147.00	21.36
带皮果单粒鲜质量FWSF/g	17.90	27.07	11.05	3.38	16.02	18.88
带皮果纵径FLD/mm	36.33	43.19	28.81	3.44	14.38	9.47
带皮果横径FTD/mm	31.31	35.76	25.53	2.15	10.23	6.87
带皮果果形指数FSI	1.16	1.33	0.96	0.07	0.37	6.03
果柄长度FPL/mm	4.78	6.71	3.28	0.78	3.43	16.32
出种率PSR/%	47.35	55.48	38.53	4.00	16.95	8.45
带壳果单粒干质量DWSS/g	6.43	9.12	3.63	1.28	5.49	19.91
带壳果纵径SLD/mm	25.20	28.46	20.82	1.91	7.64	7.58
带壳果横径STD/mm	24.47	27.12	21.55	1.34	5.57	5.48
带壳果果形指数SSI	1.03	1.22	0.93	0.05	0.29	4.85
果壳厚度ST/mm	2.33	3.40	1.30	0.49	2.10	21.03
果仁单粒干质量DWSK/g	2.17	2.95	1.18	0.45	1.77	20.74
果仁纵径KLD/mm	15.05	17.20	10.38	1.04	6.82	6.91
果仁横径KTD/mm	18.59	20.96	14.96	1.23	6.00	6.62
果仁果形指数KSI	0.81	0.95	0.69	0.05	0.26	6.17
出仁率PKR/%	34.23	41.40	20.20	4.29	21.20	12.53
一级果仁率NKP/%	92.04	100.00	62.20	8.16	37.80	8.87
含油率OC/%	77.53	80.30	73.60	1.30	6.70	1.68
蛋白质含量PC/%	7.51	8.99	6.12	0.70	2.87	9.32

花：花序长度、小花长度、小花数的平均值分别为19.31 cm、7.97 mm、186.50朵。花序长度最短的HAES800为11.70 cm，最长的南亚116号为29.00 cm；小花长度最短的实选118为6.50 mm，最长的南亚2号为9.40 mm；小花数最少的HAES800为130朵，最多的南亚116号为277朵。

带皮果：带皮果单粒鲜质量、带皮果纵径、带皮果横径、带皮果果形指数、果柄长度、出种率的平均值分别为17.90 g、36.33 mm、31.31 mm、1.16、4.78 mm和47.35%。带皮果单粒鲜质量最轻的HAES814为11.05 g，最重的实选113号为27.07 g；带皮果纵径最短的H_2为28.81 mm，最长的HAES900为43.19 mm；带皮果横径最短的HAES826为25.53 mm，最长的实选113为35.76 mm；带皮果果形指数最小的H_2为0.96，最大的A_4为1.33；果柄长度最短的HAES814为3.28 mm，最长的实选59号为6.71 mm；出种率最小的实选121号为38.53%，最大的DAD为55.48%。

带壳果：带壳果单粒干质量、带壳果纵径、带壳果横径、带壳果果形指数、果壳厚度的平均值分别为6.43 g、25.20 mm、24.47 mm、1.03、2.33 mm。带壳果单粒干质量最轻的HAES826为3.63 g，最重的实选52

号为9.12 g；带壳果纵径最短的B_3/74为20.82 mm，最长的优株D为28.46 mm；带壳果横径最短的HAES826为21.55 mm，最长的南亚1号为27.12 mm；带壳果果形指数最小的特殊种为0.93，最大的实选23号为1.22；果壳厚度最薄的HAES814为1.30 mm，最厚的实选58号3.40 mm。

果仁：果仁单粒干质量、果仁纵径、果仁横径、果仁果形指数、出仁率、一级果仁率、含油率、蛋白质含量的平均值分别为2.17 g、15.05 mm、18.59 mm、0.81、34.23%、92.04%、77.53%、7.51%。果仁单粒干质量最轻的HAES826为1.18 g，最重的实选114号2.95 g；果仁纵径最短的HAES333为10.38 mm，最长的南亚1号为17.20 mm；果仁横径最短的HAES333为14.96 mm，最长的实选117号为20.96 mm；果仁果形指数最小的HAES333为0.69，最大的HAES826为0.95；出仁率最小的实选130号为20.2%，最大的A_4 41.4%；一级果仁率最小的实选113号为62.2%，最大的南亚1号为100%；含油率最小的实选43号为73.6%，最大的南亚116号为80.3%；蛋白质含量最小的南亚12号为6.12%，最大的实选123号为8.99%。

2.1.2 数量性状相关性分析 26个数量性状的相关性分析结果表明，多数性状间相关程度较高；叶形指数与叶片长度呈极显著正相关，与叶片宽度呈显著负相关；花序长度与小花数呈极显著正相关；带皮果单粒鲜质量、带皮果纵径、带皮果横径、带壳果单粒干质量、带壳果纵径、带壳果横径、果仁单粒干质量、果仁纵径、果仁横径间两两呈极显著正相关；果仁单粒干质量与一级果仁率、出仁率、含油率呈极显著或显著正相关；果壳厚度与出仁率、一级果仁率呈极显著或显著负相关；一级果仁率与出仁率、含油率呈极显著正相关（表5）。

2.2 基于澳洲坚果种质资源表型性状的聚类分析

2.2.1 Q型聚类分析 从表6和图1可以看出，在欧氏距离20.83处，60份种质资源被明显分为4个类群，各类群中澳大利亚种质、美国种质与国内种质相互交错。

类群Ⅰ为光壳种，包括HAES246、桂热1号、南亚2号、优株D、DAD、H_2等11份种质，该类群种质的叶柄长度、花序长度、小花数、带皮果单粒鲜质量、带壳果单粒干质量、果仁单粒干质量、果壳厚度多介于类群Ⅱ和类群Ⅲ之间。

类群Ⅱ为光壳种，包括HAES333、HAES508、HAES783、HAES660、HAES814、HAES826等13份种质，该类群种质的叶片3叶轮生，叶柄较长（1.30 cm），花序最短（16.30 cm），小花乳白色且数最少（161.20朵），单粒带皮果鲜质量、带壳果单粒干质量及果仁单粒干质量均最轻（分别为13.78、4.82、1.69 g），带壳果表面光滑，果壳薄（1.90 mm）。

类群Ⅲ为光壳种与粗壳种的杂交种，包括A_4、A_{16}、HAES695、HAES900、实选23号等5份种质，该类群种质的叶柄最短（0.90 cm），花序最长（21.30 cm），小花数量最多（214.20朵），带皮果单粒鲜质量、带壳果单粒干质量及果仁单粒干质量均较大（分别为18.67 g、6.82 g、2.27 g），果壳厚度（2.50 mm），具有光壳种与粗壳种的一些特征且特征偏重于粗壳种，叶片既有3叶轮生又有4叶轮生，嫩叶为微红色，叶缘刺较多，小花为淡粉色至粉红色，带壳果表面较粗糙，但A_4和A_{16}的嫩叶为黄绿色，特征偏重于光壳种。

类群Ⅳ为光壳种，包括O.C.、Own venture、HAES788、NG_{18}、南亚1号、南亚3号、南亚12号、优株B等31份种质，该类群种质的叶片3叶轮生，叶柄较长（1.2 cm），花序较长（20.6 cm），小花乳白色且数量较多（193.7朵），带皮果单粒鲜质量、带壳果单粒干质量及果仁单粒干质量均最大（分别为19.76、7.00、2.35 g），带壳果表面光滑，果壳厚（2.5 mm）。这些结果为今后对澳洲坚果种质资源的开发利用奠定了基础。

2.2.2 R型聚类分析 从R型聚类的树系图（图2）可以看出，在相关系数2.16处可将52个表型性状分为5组。Ⅰ组包括树姿、树形、嫩叶颜色、小花开放顺序等20个性状；Ⅱ组包括叶片形状、叶尖形状、叶片长度等8个性状，除了蛋白质含量外，其他性状叶片相关性状；Ⅲ组包括批次开花、果仁颜色、花序长度、小花数量等7个性状，主要是与花和种脐及其侧面相关的性状；Ⅳ组包括带皮果形状、带皮果果形指数、带皮果顶点等8个性状，主要是与果实形状相关的性状；Ⅴ组包括带皮果单粒鲜质量、带壳果单粒干质量、果仁单粒干质量等9个性状，主要是与果实大小相关的性状；多数性状表现两两相关，部分性状之间相关程度较高。逻辑相关的性状有叶片长度与叶形指数（$r = 0.779$），花序长度与小花数（$r = 0.860$），带皮果单粒鲜质量与带壳果单粒干质量（$r = 0.887$），带皮果单粒鲜质量与果仁单粒干质量（$r = 0.656$），带壳果单粒干质量与果仁单粒干质量（$r = 0.810$），带皮果形状与带皮果果形指数（$r = 0.742$），带

表5　26个数量性状的相关性分析

Table 5　Correlation analysis of 26 numerical characters

性状 Trait	LL	LW	LSI	LPL	IL	FL	FN	FWSF	FLD	FTD	FSI	FPL	PSR
LL	1												
LW	0.374**	1											
LSI	0.779**	−0.282*	1										
LPL	0.234*	−0.003	0.245*	1									
IL	0.147	0.114	0.078	−0.082	1								
FL	0.001	0.107	−0.075	0.180	−0.078	1							
FN	0.143	0.210	0.010	−0.079	0.860**	−0.013	1						
FWSF	0.286*	−0.050	0.306**	−0.099	0.391**	−0.207	0.265*	1					
FLD	0.318**	−0.075	0.353**	−0.060	0.338**	−0.146	0.309**	0.764**	1				
FTD	0.327**	−0.047	0.335**	−0.117	0.450**	−0.179	0.393**	0.834**	0.786**	1			
FSI	0.137	−0.068	0.186	0.047	0.022	−0.029	0.035	0.270*	0.700**	0.111	1		
FPL	0.268*	0.045	0.223*	0.187	−0.043	0.349**	0.051	0.013	0.260*	0.161	0.245*	1	
PSR	−0.242*	−0.030	−0.213	−0.001	−0.222*	0.023	−0.176	−0.337**	−0.424**	−0.372**	−0.254*	−0.335*	1
DWSS	0.183	−0.108	0.244*	−0.205	0.381**	−0.166	0.251*	0.886**	0.617**	0.767**	0.116	−0.075	−0.045
SLD	0.222*	−0.094	0.282*	−0.176	0.380**	−0.177	0.289*	0.756**	0.782**	0.797**	0.346**	0.013	−0.261*
STD	0.220*	−0.080	0.250*	−0.062	0.313**	−0.144	0.223*	0.753**	0.601**	0.863**	−0.022	0.010	−0.102
SSI	0.086	−0.057	0.141	−0.200	0.225*	−0.121	0.187	0.312**	0.517**	0.260*	0.539**	−0.001	−0.283*
ST	0.264*	−0.052	0.292*	−0.142	0.323**	−0.188	0.142	0.559**	0.475**	0.505**	0.186	−0.039	−0.250*
DWSK	0.199	0.005	0.189	−0.177	0.287*	−0.029	0.296*	0.656**	0.492**	0.592**	0.116	0.010	0.095
KLD	0.320**	0.091	0.272*	−0.043	0.353**	−0.114	0.329**	0.589**	0.563**	0.564**	0.252*	−0.155	−0.069
KTD	0.181	0.018	0.146	−0.052	0.320**	−0.104	0.291*	0.537**	0.501**	0.662**	0.044	−0.043	0.058
KSI	0.197	0.125	0.157	0.040	0.044	0.011	0.062	0.076	0.092	−0.106	0.262*	−0.167	−0.152
PKR	0.003	0.173	−0.106	−0.053	−0.013	0.208	0.144	−0.231*	−0.095	−0.162	0.036	0.070	0.287*
NKP	−0.093	0.103	−0.165	−0.265*	0.200	0.223*	0.221*	0.003	0.125	0.128	0.060	0.092	0.181
OC	−0.089	0.060	−0.151	−0.289*	0.188	−0.215*	0.084	0.055	0.010	0.073	−0.062	−0.074	−0.089
PC	−0.265*	0.069	−0.335**	0.166	−0.093	0.220*	0.008	−0.147	−0.156	−0.154	−0.078	0.156	−0.043

性状 Trait	DWSS	SLD	STD	SSI	ST	DWSK	KLD	KTD	KSI	PKR	NKP	OC	PC
LL													
LW													
LSI													
LPL													
IL													
FL													
FN													
FWSF													
FLD													
FTD													
FSI													
FPL													
PSR													
DWSS	1												
SLD	0.719**	1											
STD	0.740**	0.735**	1										
SSI	0.273*	0.692**	0.021	1									
ST	0.497**	0.568**	0.444**	0.367**	1								
DWSK	0.810**	0.527**	0.571**	0.169	0.064	1							
KLD	0.567**	0.643**	0.599**	0.315	0.273*	0.571**	1						
KTD	0.589**	0.595**	0.763**	0.075	0.145	0.650**	0.672**	1					
KSI	−0.016	0.091	−0.173	0.312	0.166	−0.088	0.460**	−0.341**	1				
PKR	−0.118	−0.163	−0.136	−0.097	−0.656**	0.441**	0.125	0.237*	−0.133	1			
NKP	0.237*	0.123	0.134	0.037	−0.281*	0.496**	0.147	0.297*	−0.195	0.510**	1		
OC	0.174	0.082	−0.010	0.148	−0.086	0.218*	0.063	0.039	0.008	0.107	0.399**	1	
PC	−0.231*	−0.151	−0.136	−0.074 2	−0.052	−0.261*	−0.285*	−0.217*	−0.073	−0.188	−0.168	−0.054	1

注：**和*分别表示在 0.01 和 0.05 水平上显著相关。性状代码同表 4。

Note：** and * mean significant difference at 0.01 and 0.05 level, respectively. The character code is shown in Table 4.

表 6 4 个组群澳洲坚果种质资源部分数量性状表现

Table 6 Difference of 4 divisions of the numerical characters

组群 Group	叶片长度 LL/cm	叶片宽度 LW/cm	叶柄长度 LPL/cm	花序长度 IL/cm	小花数 FN	带皮果单粒鲜质量 FWSF/g	果柄长度 FPL/mm	带壳果单粒干质量 DWSS/g	果壳厚度 ST/mm	果仁单粒干质量 DWSK/g	出仁率 PKR/%
Ⅰ	16.4 a	4.5 a	1.2 b	17.5 b	176.7 b	17.20 b	4.69 b	6.56 b	2.3 b	2.19 b	33.7 a
Ⅱ	16.2 a	4.6 a	1.3 b	16.3 a	161.2 a	13.78 a	4.79 b	4.82 a	1.9 a	1.69 a	34.9 a
Ⅲ	16.6 a	4.2 a	0.9 a	21.3 c	214.2 d	18.67 c	5.13 b	6.82 b	2.5 c	2.27 b	34.0 a
Ⅳ	17.8 a	4.3 a	1.2 b	20.6 c	193.7 c	19.76 c	4.75 b	7.00 b	2.5 c	2.35 b	34.2 a

注：同列不同小写字母表示差异显著（$p<0.05$）。

Note：Different small letters in the same column indicated significant difference at $p<0.05$.

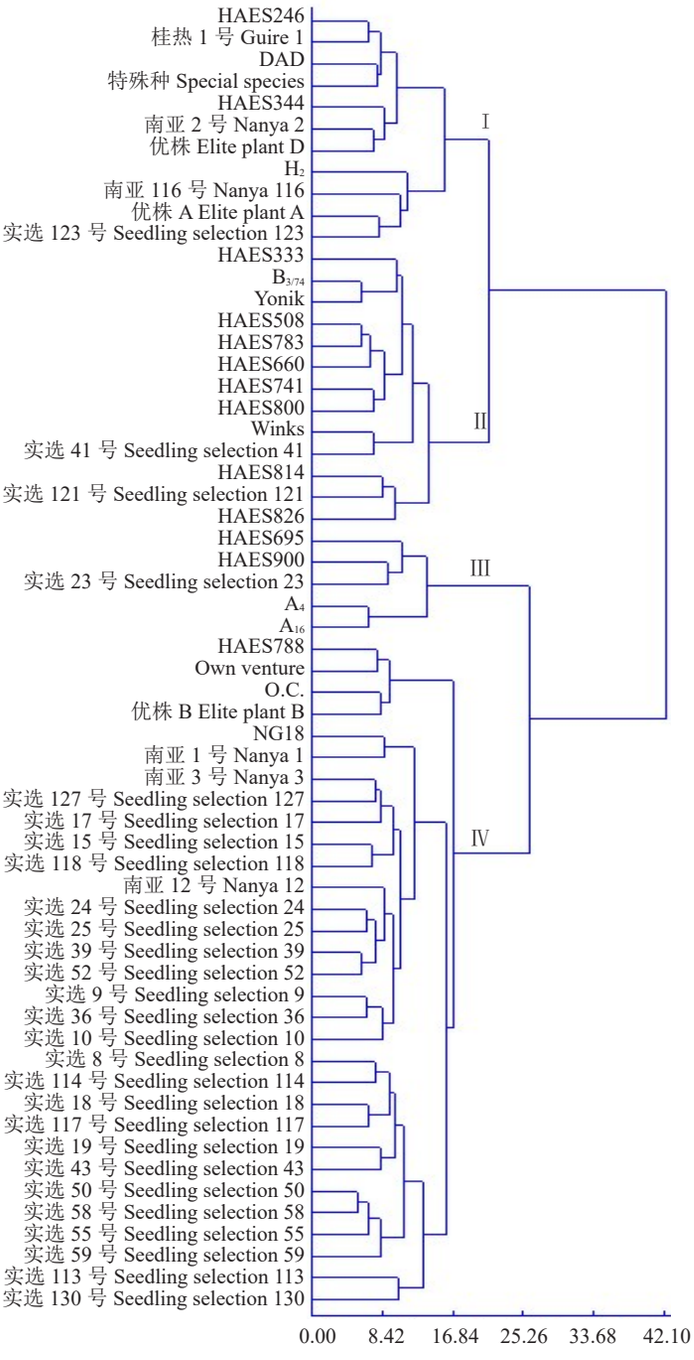

图 1 Q 型聚类分析

Fig. 1 The dendrogram of Q cluster analysis

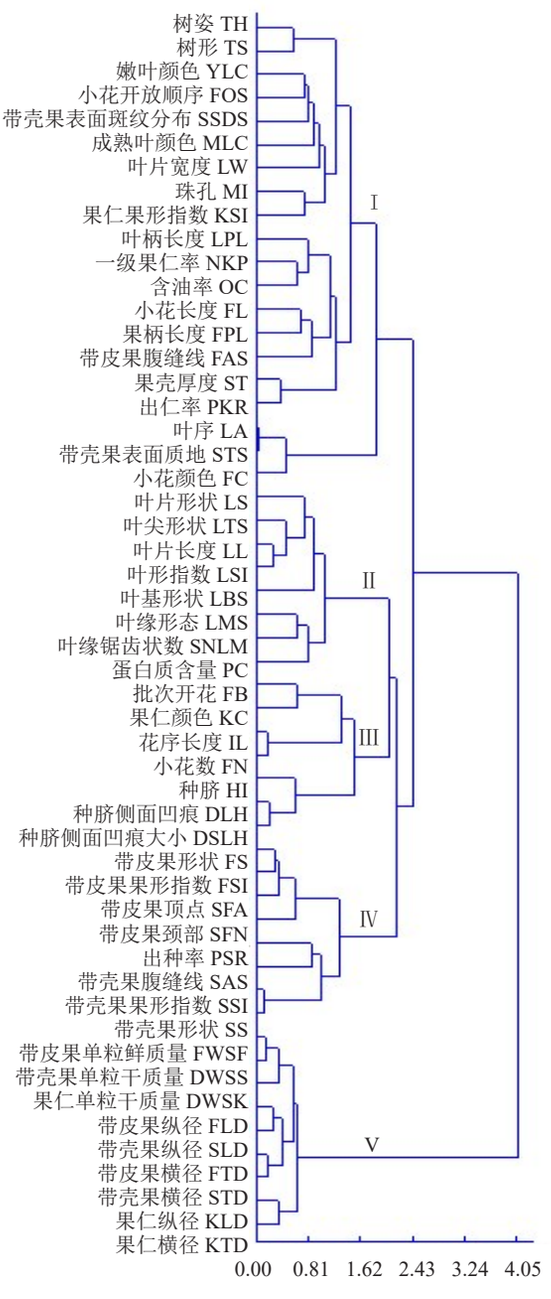

图 2 R 型聚类分析

Fig. 2 The dendrogram of R cluster analysis V

壳果形状与带壳果果形指数（$r=0.898$），带皮果纵径与带壳果纵径（$r=0.782$），带皮果横径与带壳果横径（$r=0.863$），果壳厚度与出仁率（$r=-0.656$）等，说明这些相关性状间存在必然的联系。非逻辑相关的性状有叶片长度与叶尖形状，叶基形状与叶缘形状，叶序与带壳果表面质地，成熟叶颜色与蛋白质含量，珠孔与果仁果形指数，小花长度与果柄长度等，它们反映出不同的遗传信息，但不是必然的依存关系。由此可见，性状的选择基本正确，这为今后观测性状的取舍和育种亲本的选择提供了参考。

2.3　澳洲坚果种质资源表型性状的主成分分析

主成分分析结果（表7）表明，前15个主成分的累积贡献率达到80.725 0%，基本反映了52个表型性状所代表的信息。第1主成分的贡献率为18.553 4%，负荷量绝对值较大的为带皮果单粒鲜质量、带皮果纵径、带皮果横径、带壳果单粒干质量、带壳果纵径、带壳果横径、果仁单粒干质量、果仁纵径、果仁横径，均为R型聚类中的V组性状，主要反映了带皮果、带壳果及果仁的大小特征；第2主成分的贡献率为8.873 8%，负荷量绝对值较大的为叶序、小花颜色、带皮果果形指数、带皮果顶点、带壳果表面质地，主要反映了叶片着生、小花颜色、带皮果及带壳果表面形态特征；第3主成分的贡献率为8.024 9%，负荷量绝对值较大的为叶片形状、叶缘形状、叶片长度、叶形指数、叶柄长度，主要反映了叶片特征；第4主成分的贡献率为7.305 0%，负荷量绝对值较大的为种脐侧面凹痕大小、出仁率、一级果仁率、果壳厚度，主要反映了种脐侧面形态和果仁品质特征；第5主成分的贡献率为5.631 2%，负荷量绝对值较大的为嫩叶颜色、小花数量、花序长度，主要反映了嫩叶和花序特征。其余10个因子负荷量绝对值较大的代表性状见表7。52个表型性状可简化为15个因子，包含带皮果单粒鲜质量等36个性状，对澳洲坚果种质资源表型多样性构成起主要作用，这为今后澳洲坚果种质资源鉴定评价性状的选择提供了参考。

以主成分分析为基础，以第1主成分得分为横坐标，第2主成分得分为纵坐标，构建60份澳洲坚果种质资源的二维平面散点图（图3）。Ⅰ、Ⅱ和Ⅳ类群为光壳种，种质集中分布在原点四周，叶片3叶轮生，叶柄较长，小花乳白色，带壳果表面光滑；Ⅱ类群多数种质位于X轴的最左侧，主要体现了花序最短，小花数量最少，单粒带皮果鲜质量、带壳果单粒干质量及果仁单粒干质量均最小；Ⅳ类群多数种质位于X轴的右侧，主要体现了花序较长，小花数较多，单粒带皮果鲜质量、带壳果单粒干质量及果仁单粒干质量均最大；Ⅰ类群多数种质分布在Ⅱ和Ⅳ类群间，表型并不突出；Ⅲ类群为光壳种与粗壳种的杂交种，种质位于X轴的右上方，其叶片既有3叶轮生又有4

表7　主成分的特征值、贡献率和累积贡献率

Table 7　The eigenvalue, contribution ratio and cumulative contribution ratio of the principal component

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution ratio/%	累积贡献率 Cumulative contribution ratio/%	代表性状 Representative character
1	9.647 8	18.553 4	18.553 4	带皮果单粒鲜质量、带皮果纵径、带皮果横径、带壳果单粒干质量、带壳果纵径、带壳果横径、果仁单粒干质量、果仁纵径、果仁横径 FWSF, FLD, FTD, DWSS, SLD, STD, DWSK, KLD, KTD
2	4.614 4	8.873 8	27.427 3	叶序、小花颜色、带皮果果形指数、带皮果顶点、带壳果表面质地 LA, FC, FSI, SFA, STS
3	4.173 0	8.024 9	35.452 2	叶片形状、叶缘形状、叶片长度、叶形指数、叶柄长度 LS, LMS, LL, LSI, LPL
4	3.798 6	7.305 0	42.757 2	种脐侧面凹痕大小、出仁率、一级果仁率、果壳厚度 DSLH, PKR, NKP, ST
5	2.928 2	5.631 2	48.388 4	嫩叶颜色、小花数量、花序长度 YLC, FRN, IL
6	2.581 9	4.965 2	53.353 6	叶尖形状 LTS
7	2.348 5	4.516 4	57.870 0	果柄长度 FPL
8	2.057 5	3.956 8	61.826 8	带皮果腹缝线 FAS
9	1.742 9	3.351 7	65.178 6	珠孔 MI
10	1.573 6	3.026 1	68.204 6	带壳果表面斑纹分布 SSDS
11	1.462 0	2.811 5	71.016 2	种脐 HI
12	1.389 8	2.672 6	73.688 8	种脐侧面凹痕 DLH
13	1.303 7	2.507 1	76.195 9	带壳果腹缝线 SAS
14	1.226 3	2.358 3	78.554 2	含油率 OC
15	1.128 8	2.170 8	80.725 0	果仁颜色 KC

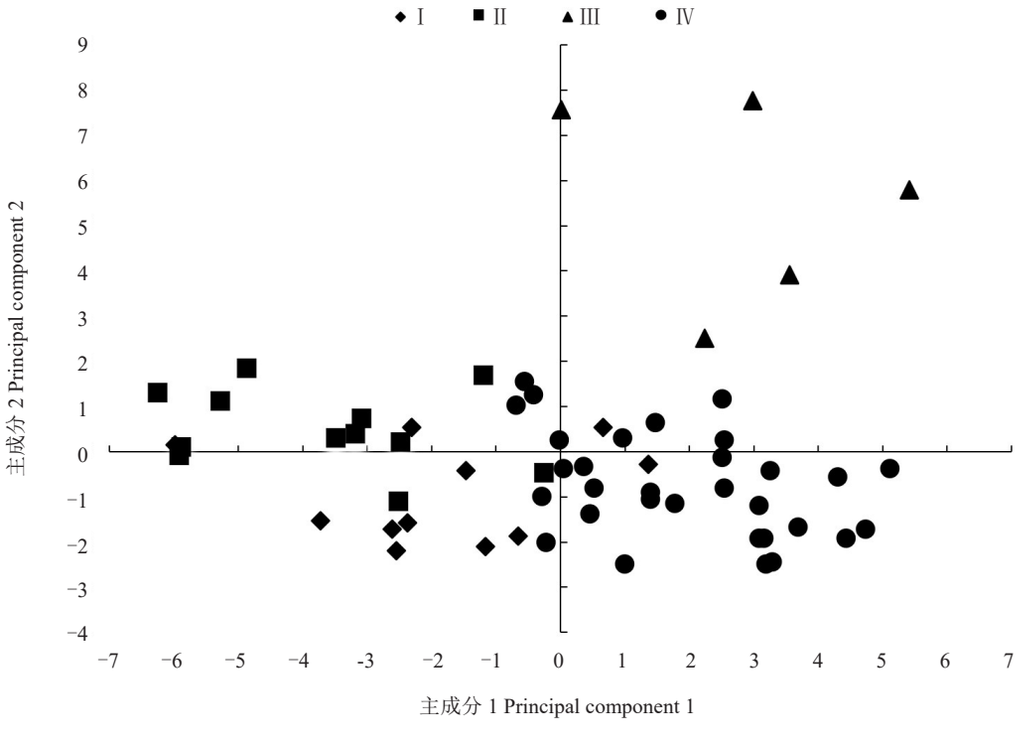

图 3 60 份澳洲坚果种质表型性状主成分二维坐标分布

Fig. 3 Distribution of principal components in 2-dimension coordinate of phenotypic characters of 60 macadamia germplasm resources

叶轮生，叶柄较短，花序最长，小花数最多，小花为淡粉色至粉红色，带皮果单粒鲜质量、带壳果单粒干质量及果仁单粒干质量均较大，带壳果表面较粗糙。

3 讨 论

种质资源是作物育种的重要材料，作物新品种选育的成功与优异种质资源的发掘与利用密切相关[16]。表型性状是澳洲坚果选育种最常用的性状，开展澳洲坚果种质资源表型性状多样性研究，掌握其遗传特点，发掘优异资源，对澳洲坚果选育种意义重大。本研究中，60份参试的澳洲坚果种质资源数量性状变异系数为1.68%~21.54%，其中含油率变异系数最小，花序长度变异系数最大；叶片长度、叶片宽度、叶形指数、叶柄长度、花序长度、小花数、带皮果单粒鲜质量、果柄长度、带壳果单粒干质量、果壳厚度、果仁单粒干质量、出仁率的变异系数较大，为12.53%~21.54%，表明其供选择和利用的潜力较大；描述性状各类型分布频率差异较大，一共12种描述类型居多（≥60%），分别为叶序3叶轮生、成熟叶浓绿色、叶片倒披针形、小花乳白色、无批次开花、带皮果卵圆形、带皮果腹缝线明显、带壳果表面光滑、中珠孔、小种脐、种脐侧面无凹痕及凹痕大小为零，其中叶序3叶轮生、小花乳白色、带壳果表面光滑最多（≥90%）；5种描述类型稀少（<5%），分别是叶尖截形、小花粉红色、珠孔特大、种脐侧面凹痕大或特大、果仁白色。以上结果表明，澳洲坚果种质资源表型性状差异较大，多样性丰富，为育种材料筛选和种质创制提供了可能性，因为表型变异越丰富，存在的遗传变异可能越丰富[17]。

果实性状是澳洲坚果最重要的育种性状和经济性状，通过相关性分析，明确澳洲坚果果实各数量性状间的相关性，为澳洲坚果良种选育效率的提高提供了依据。在本研究中，带皮果单粒鲜质量、带皮果纵径、带皮果横径、带壳果单粒干质量、带壳果纵径、带壳果横径、果仁单粒干质量、果仁纵径、果仁横径间两两呈极显著正相关，这说明这些性状存在着明显的促进关系，在选育大果资源的同时也增加了带壳果和果仁大小；果仁单粒干质量与一级果仁率、出仁率、含油率呈极显著或显著正相关，一级果仁率与出仁率、含油率呈极显著正相关，表明带皮果、带壳果、果仁的质量与出仁率、一级果仁率、含油率密切相关；而果壳厚度与出仁率、一级果仁率呈极显著或显著负相关，这与杨为海等[18]的研究结果一致。笔者在本研究中发现，带皮果、带壳果和果仁单粒质量

的变异系数均比其纵横径的大，这与杨为海等[18]、杜丽清等[19]和谭秋锦等[20]的研究结果一致，表明用单粒质量作为澳洲坚果果实大小的指标比纵横径更合理。在澳洲坚果品种选育过程中，既要关注果实单粒质量，也要关注果壳厚度、一级果仁率、出仁率、含油率等性状，从而选育出具有果大、果壳薄及出仁率、一级果仁率和含油率高等特点的优良品种。在本研究中，南亚1号、南亚3号、南亚12号、实选10号、实选114号、O.C.、A_4、A_{16}等澳洲坚果种质的带皮果单粒鲜质量、带壳果单粒干质量、果仁单粒干质量、出仁率、一级果仁率、含油率均较高，可作为优异种质。

澳洲坚果商业栽培品种按传统的方法将叶序、叶柄、小花颜色、带壳果表面质地等形态特征划分为光壳种、粗壳种及其杂交种[4]。Allan[21]采用12个典型的叶片和果实形态性状，建立了澳洲坚果品种的形态标记图谱，能够很好地识别南非种植的品种。笔者在本研究中综合分析了52个澳洲坚果植株、叶片、花、果实描述性状和数量性状的基础上，对60份澳洲坚果种质资源进行聚类分析，减少了单一或某几个性状对分类结果的影响，比传统分类更具客观性和准确性。Q型聚类分析表明，在欧氏距离20.83处，60份澳洲坚果种质资源按单果质量、叶序、叶柄长度、嫩叶颜色、小花颜色、带壳果表面质地分为小粒果光壳种、中粒果光壳种、大粒果光壳种以及光壳种与粗壳种的杂交种4大类群，比传统分类性状增加了单果质量和嫩叶颜色，从而进一步验证了以形态性状为基础的澳洲坚果栽培品种传统分类的相对正确性。主成分分析结果也表明，上述4大类群在由第1主成分和第2主成分得分构建的二维平面散点图中具有明显差别，进一步验证了Q型聚类分析结果的可靠性。R型聚类分析显示，在相关系数2.16处，52个澳洲坚果表型性状分为5组，很好地揭示了性状间的相关性，多数性状表现两两相关，性状选择基本正确。而非逻辑相关的性状聚为一起，可能原因是表型描述性状的赋值标准与数量性状不同，如何统一赋值标准还有待进一步的研究。

4　结　论

澳洲坚果种质资源植株、叶片、花、果实表型性状存在丰富的多样性，叶序、嫩叶颜色、叶柄长度、花序长度、小花数、小花颜色、带皮果单粒鲜质量、带皮果腹缝线、带壳果单粒干质量、带壳果表面质地、带壳果表面斑纹分布、带壳果腹缝线、珠孔、种脐、果壳厚度、果仁单粒干质量、出仁率、一级果仁率等主要性状对澳洲坚果种质资源表型多样性构成起主要作用，60份参试种质资源按单果质量、叶序、叶柄长度、嫩叶颜色、小花颜色、带壳果表面质地聚类，基于表型性状的数量分类对构建澳洲坚果种质分类体系具有参考价值。

参考文献 References：

[1] JOHNSON L A S，BRIGGS B G. On the Proteaceae-the evolution and classification of a southern family[J]. Botanical Journal of the Linnean Society，1975，70(2)：83-182.

[2] STEPHENSON R. Macadamia：Domestication and commercialization[J]. Chronica Horticultura，2005，45(2)：11-15.

[3] 万继锋，曾辉，邹明宏，陈菁，罗炼芳，陆超忠．湛江地区澳洲坚果成年树抽梢生物学特性的观测分析[J]. 中国南方果树，2021，50(5)：65-70.
WAN Jifeng，ZENG Hui，ZOU Minghong，CHEN Jing，LUO Lianfang，LU Chaozhong. Observational analysis of shooting biology characteristics of macadamia mature trees in Zhanjiang[J]. China South Fruit，2021，50(5)：65-70.

[4] WALLACE H M，WALTON D A. Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits[M]. Woodhead Publishing Series in Food Science，Technology and Nutrition，2011：450-474.

[5] 陈秀萍，黄爱萍，蒋际谋，郑少泉，邓朝军，魏秀清，胡文舜，姜帆．枇杷种质资源数量分类研究[J]. 园艺学报，2011，38(4)：644-656.
CHEN Xiuping，HUANG Aiping，JIANG Jimou，ZHENG Shaoquan，DENG Chaojun，WEI Xiuqing，HU Wenshun，JIANG Fan. Numerical classification of the loquat germplasm[J]. Acta Horticulturae Sinica，2011，38(4)：644-656.

[6] 陆育生，林志雄，邱继水，常晓晓，潘建平．黄皮种质资源果实性状多样性分析及其数量分类研究[J]. 园艺学报，2016，43(10)：1903-1915.
LU Yusheng，LIN Zhixiong，QIU Jishui，CHANG Xiaoxiao，PAN Jianping. Fruit character diversity analysis and numerical taxonomy of the wampee germplasm[J]. Acta Horticulturae Sinica，2016，43(10)：1903-1915.

[7] 刘勇，孙中海，刘德春，吴波，江东．部分柚类品种数值分类研究[J]. 果树学报，2006，23(1)：35-40.
LIU Yong，SUN Zhonghai，LIU Dechun，WU Bo，JIANG Dong. Study on numerical taxonomy of pomelo cultivars[J]. Journal of Fruit Science，2006，23(1)：35-40.

[8] 王明明，王建华，宋振巧，李圣波，曲燕，刘静．木瓜属品种资源的数量分类研究[J]. 园艺学报，2009，36(5)：701-710.
WANG Mingming，WANG Jianhua，SONG Zhenqiao，LI Shengbo，QU Yan，LIU Jing. Studies on numerical classification of Chaenomeles cultivars[J]. Acta Horticulturae Sinica，2009，36

(5)：701-710.

[9] 汪小飞，周耘峰，黄埔，向其柏，尤传楷，孙龙 . 石榴品种数量分类研究[J]. 中国农业科学，2010，43(5)：1093-1098.
WANG Xiaofei，ZHOU Yunfeng，HUANG Pu，XIANG Qibai，YOU Chuankai，SUN Long. Study on the classification on pomegranate cultivars[J]. Scientia Agricultura Sinica，2010，43(5)：1093-1098.

[10] 黄爱萍，陈秀萍，胡文舜，姜帆，郑姗，章希娟，魏秀清，邓朝军，郑少泉 . 龙眼种质资源果实性状多样性分析及其数量分类研究[J]. 果树学报，2010，27(6)：938-945.
HUANG Aiping，CHEN Xiuping，HU Wenshun，JIANG Fan，ZHENG Shan，ZHANG Xijuan，WEI Xiuqing，DENG Chaojun，ZHENG Shaoquan. Fruit character diversity analysis and numerical classification of longan (*Dimocarpus*) germplasm resources[J]. Journal of Fruit Science，2010，27(6)：938-945.

[11] 吴如健，万继锋，韦晓霞，陈瑾，胡菡青，潘少霖 . 橄榄种质资源果实表型性状多样性分析及其数量分类研究[J]. 果树学报，2015，32(5)：797-805.
WU Rujian，WAN Jifeng，WEI Xiaoxia，CHEN Jin，HU Hanqing，PAN Shaolin. Fruit character diversity analysis and numerical classification of Chinese olive germplasm resources[J]. Journal of Fruit Science，2015，32(5)：797-805.

[12] 曾少敏，陈小明，黄新忠 . 福建地方梨资源果实性状多样性分析及其数量分类研究[J]. 园艺学报，2019，46(2)：237-251.
ZENG Shaomin，CHEN Xiaoming，HUANG Xinzhong. Fruit character diversity analysis and numerical classification of local pear germplasm resources in Fujian[J]. Acta Horticulturae Sinica，2019，46(2)：237-251.

[13] 万继锋，杨为海，曾辉，邹明宏，张汉周，陆超忠 . 澳洲坚果种质资源叶片表型多样性分析及其数量分类研究[J]. 热带作物学报，2017，38(6)：990-997.
WAN Jifeng，YANG Weihai，ZENG Hui，ZOU Minghong，ZHANG Hanzhou，LU Chaozhong. Leaf character diversity analysis and numerical classification of *Macademia* spp. germplasm resources[J]. Chinese Journal of Tropical Crop，2017，38(6)：990-997.

[14] 陆超忠，杜丽清 . 澳洲坚果种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京：中国农业出版社，2008.
LU Chaozhong，DU Liqing. Description specification and data standard for macadamia germplasm resources[M]. Beijing：China Agricultural Press，2008.

[15] 邹明宏，陆超忠，梁李宏，杜丽清，曾辉，黄伟坚，罗炼芳，张汉周 . NY/T 1687—2009 澳洲坚果种质资源鉴定技术规范[M]. 北京：中国农业出版社，2009.
ZOU Minghong，LU Chaozhong，LIANG Lihong，DU Liqing，ZENG Hui，HUANG Weijian，LUO Lianfang，ZHANG Hanzhou. Technical specification of identification for macadamia germplasm resources(NY/T 1687—2009) [M]. Beijing：China Agricultural Press，2009.

[16] 苏玉环，王静华，李文芹，张晓芳，徐婧，段会军 . 西瓜种质资源果实性状及聚类分析[J]. 河北农业大学学报，2008，31(6)：21-26.
SU Yuhuan，WANG Jinghua，LI Wenqin，ZHANG Xiaofang，XU Jing，DUAN Huijun. Main fruit traits and cluster analysis of watermelon germplasm[J]. Journal of Agricultural University of Hebei，2008，31(6)：21-26.

[17] ZENELI G，KOLA H，DIDA M. Phenotypic variation in native walnut populations of Northern Albania[J]. Scientia Horticulturae，2005，105(1)：91-100.

[18] 杨为海，王维，曾辉，邹明宏，罗炼芳，张汉周，陆超忠 . 澳洲坚果不同种质果实数量性状的研究[J]. 热带作物学报，2011，32(8)：1434-1438.
YANG Weihai，WANG Wei，ZENG Hui，ZOU Minghong，LUO Lianfang，ZHANG Hanzhou，LU Chaozhong. Fruit quantitative characters of various macadamia germplasms[J]. Chinese Journal of Tropical Crop，2011，32(8)：1434-1438.

[19] 杜丽清，曾辉，邹明宏，陆超忠，罗炼芳 . 澳洲坚果种质资源果实性状的评价指标[J]. 热带作物学报，2006，27(4)：14-28.
DU Liqing，ZENG Hui，ZOU Minghong，LU Chaozhong，LUO Lianfang. Evaluation criteria for some fruit quantitative characters of *Macadamia* (*Macadamia integrifolia*) germplasm[J]. Chinese Journal of Tropical Crop，2006，27(4)：14-28.

[20] 谭秋锦，韦媛荣，黄锡云，张涛，许鹏，宋海云，王文林，郑树芳 .10 份澳洲坚果种质果实性状与营养成分分析[J]. 果树学报，2021，38(5)：672-680.
TAN Qiujin，WEI Yuanrong，HUANG Xiyun，ZHANG Tao，XU Peng，SONG Haiyun，WANG Wenlin，ZHENG Shufang. Analysis of fruit characteristics and nutrients of 10 accessions of *Macadamia integrifolia*[J]. Journal of Fruit Science，2021，38(5)：672-680.

[21] ALLAN P. Evaluation and identification of old and new macadamia cultivars and selections at Pietermaritzburg[J]. South African Journal of Plant and Soil，2007，24(2)：124-129.