

荔枝种质资源矮化相关形态指标的鉴定及综合评价

胡福初^{1,2}, 陈哲¹, 赵杰堂², 冯学杰¹, 吴凤芝¹, 范鸿雁¹, 王祥和¹, 胡桂兵²

(¹ 海南省农业科学院热带果树研究所 / 海南省热带果树生物学重点实验室 / 农业农村部海口热带果树科学观测实验站,

海口 571100; ² 华南农业大学园艺学院, 广州 510642)

摘要: 为建立准确、可靠的荔枝矮化性状鉴定评价方法, 并对部分荔枝种质资源的矮化程度进行综合评价。以 120 份荔枝种质资源为研究材料, 测定了可能与矮化性状相关的枝梢长度、枝梢直径、复叶柄长度、复叶柄直径、节间长度、叶片长度、叶片宽度和叶片厚度等 8 个形态指标, 采用相关性分析、正态分布检验、隶属函数、主成分分析相结合的方法, 对 120 份荔枝矮化相关形态指标进行鉴定、筛选以及矮化程度的综合评价。结果表明: 枝梢长度等 8 个相关形态指标均具有较好的遗传多样性, 符合或近似符合正态分布特点; 除了叶片厚度之外, 其余 7 个指标之间几乎都存在着显著或极显著的相关性, 进一步经主成分分析, 获得 2 个主成分可解释相关指标 72.738% 的原始数据信息量, 初步明确了枝梢长度等 (叶片厚度除外) 7 个相关性状作为荔枝矮化综合评价的主要形态指标, 可用于有效评价荔枝种质的矮化性状; 矮化综合评价结果将 120 份荔枝种质划分为 5 个等级, 其中 I 级 (矮化) 9 份, II 级 (半矮化) 10 份, III 级 (亚乔化) 69 份, IV 级 (乔化) 25 份, V 级 (极乔化) 7 份, 筛选出糯米糍、庙种糯、紫娘喜、鸭姆笼、农美 12 号、KOM 等一批矮化或半矮化的种质资源。以上结果说明采用枝梢长度等 7 个主要形态指标为测定参数, 基于主成分分析的综合评价方法进行荔枝矮化性状的鉴定评价是准确可靠的, 为荔枝矮化资源的深入发掘和开发利用提供了科学依据。

关键词: 荔枝; 矮化性状; 形态指标; 鉴定; 综合评价

Identification and Comprehensive Evaluation of Dwarfing-related Morphological Indicators in Litchi Germplasm Resources

HU Fu-chu^{1,2}, CHEN Zhe¹, ZHAO Jie-tang², FENG Xue-jie¹, WU Feng-zhi¹, FAN Hong-yan¹,
WANG Xiang-he¹, HU Gui-bing²

(¹ Institute of Tropical Fruit Trees, Hainan Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Tropical Fruit Tree Biology of Hainan Province/Investigation Station of Tropical Fruit Trees of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Haikou 571100; ² College of Horticulture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642)

Abstract: In order to establish an accurate and reliable identification method for dwarf-traits of litchi, and comprehensively evaluate the dwarf degree of part of the litchi germplasm resources, 120 litchi germplasm resources were used as materials to investigate and determine eight candidate dwarfing-related morphological indicators of length of new branch (LNB), diameter of new branch (DNB), length of common petiole (LCP), diameter of common petiole (DCP), length of internode (LI), length of single leaf (LSL), width of single leaf (WSL) and thickness of single leaf (TSL) with correlation analysis, normal distribution test, membership function, and principal component analysis. The results showed that all the 8 morphological indicators had good genetic diversity, fitting or approximating the normal distribution characteristic. Except for TSL, the other seven

收稿日期: 2019-09-18 修回日期: 2019-10-11 网络出版日期: 2019-11-01

URL: <http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20190918002>

第一作者研究方向为果树种质资源与遗传育种, E-mail: hufuchu@163.com

通信作者: 王祥和, 研究方向为荔枝栽培与生理, E-mail: wangxh198@126.com

胡桂兵, 研究方向为荔枝种质资源与遗传育种, E-mail: guibing@scau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31701885); 国家荔枝龙眼产业技术体系 (CARS-32)

Foundation project: National Natural Science Foundation of China (31701885), China Litchi and Longan Industry Technology Research System (CARS-32)

indicators had significant or extremely significant correlations. With principal component analysis, two principal components were obtained to explain 72.738% of the original data information, and seven indicators (excluding TSL) were preliminarily identified as the main morphological indicators of the comprehensive evaluation of litchi dwarfing, which could be used to effectively evaluate the dwarf traits of litchi germplasms. After comprehensive evaluation of dwarfing, the 120 litchi germplasms were divided into 5 grades, including 9 germplasms in grade I (dwarf), 10 in grade II (semidwarf), 69 in grade III (subarborescent), 25 in grade IV (arborescent), and 7 in grade V (very arborescent). According to this evaluation approach, we screened out a number of dwarf and semi-dwarf germplasm resources such as 'Nuomici', 'Miaozhongnuo', 'Ziniangxi', 'Yamulong', 'Nongmei 12 Hao', and 'KOM'. The above results indicated that based on the determination and analysis of the seven major morphological indicators, the comprehensive evaluation method of litchi dwarf degree was accurate and reliable, which would provide the scientific basis for more in-depth exploration and development of litchi dwarf resources.

Key words: litchi; dwarf traits; morphological indicators; identification; comprehensive evaluation

荔枝 (*Litchi chinensis* Sonn.) 为无患子科荔枝属常绿性乔木, 是我国华南地区最重要的特色果树之一, 具有 2300 多年的栽培历史, 因其果实色、香、味皆美而驰名中外^[1]。荔枝在我国热带亚热带果树产业中占有很大比重, 种植面积达到 55 万 hm^2 , 年产量超过 220 万 t, 占世界总产量的 60%, 是世界最大的荔枝生产国^[2]。此外, 我国还是荔枝的重要起源中心和多样性分布中心, 具有十分丰富的荔枝种质资源^[3-4]。荔枝属于高大乔木, 自然情况下可长至十几米至几十米高, 给荔枝生产管理造成极大的不便。荔枝矮化密植栽培技术自 20 世纪 90 年代迅速发展, 成为荔枝栽培及低产果园改造的关键技术之一^[5], 实践证明, 通过矮化密植栽培, 具有丰产稳产、管理方便、果实品质好、便于品种更新等优点^[6]。然而, 与苹果^[7]、梨^[8]、樱桃^[9]等果树矮化栽培相比, 荔枝矮化栽培并非通过矮化砧木嫁接或者矮化品种来实现的, 大多是通过修剪降低树高、控制树冠大小以达到矮化目的。尤其是一些长势壮旺的荔枝品种, 每年采后修剪的生物量十分惊人。人工修剪虽然能够达到矮化树体的效果, 但一方面, 每年的重修剪造成树体养分的大量流失, 另一方面, 采后重修剪要求较多的人工投入, 不利于节约生产成本。近年来, 随着果园人工成本的不断攀升以及果园减施化肥农药的要求, 传统的重修剪矮化栽培模式已经不利于现代果园的发展, 矮化荔枝种质资源的发掘与创新利用显得越来越重要。

荔枝矮化性状的相关研究起步较晚, 这与荔枝矮化资源缺乏有效的鉴定评价方法有一定关系。现有的几个主要品种的乔矮特性评价, 大多数建立在田间经验判断的基础上, 如乔化品种妃子笑、三月红

等, 矮化品种紫娘喜、糯米糍等。这种评价存在着很大的主观性, 且只能判断出乔矮特性差异十分明显的品种或资源。实际上, 荔枝的矮化性状是一项复杂的数量性状, 很难通过某单一指标鉴定评价其是否具有矮化特性, 以株高为例, 往往会因为树龄、生长环境、管理措施等因素的差异造成评价结果的不准确。本研究根据荔枝矮化相关的形态学表现, 测定不同荔枝种质资源的枝梢长度、枝梢直径、复叶柄长度、复叶柄直径、节间长度、叶片长度、叶片宽度、叶片厚度等形态学指标, 通过相关性分析、主成分分析等方法, 建立荔枝矮化性状的鉴定评价方法, 为荔枝矮化表型的评价及矮化资源的发掘利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验于 2016 年在华南农业大学荔枝品种资源圃进行, 以妃子笑、紫娘喜、白糖罂等 120 份荔枝种质资源为调查对象 (详见 <http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20190918002>, 附表 1), 所有种质的砧木均为怀枝实生苗, 树龄 12 年, 选择嫁接亲和性好、生长正常、枝梢健康且立地条件基本一致的荔枝植株进行测定。为提高测试结果的准确性和可靠性, 在 5 月下旬, 对待测植株进行适度的修剪与复壮, 促使其生长出较为整齐、节奏基本一致的新梢, 并做好新梢的田间管理工作。

1.2 测定内容与方法

至 2016 年 12 月, 所有待测植株新梢中的第二批梢均已经充分老熟, 选择该批梢进行测定。每份种质资源重复测定 3 株树, 每株树选择东、南、西、北、中 5 个方向的枝梢进行测定, 共计 15 条枝梢, 对

待测枝梢进行挂牌标记。分别使用直尺和游标卡尺测定枝梢长度、枝梢直径、复叶柄长度、复叶柄直径、节间长度、叶片长度、叶片宽度、叶片厚度等指标,每个指标至少测定 15 次重复。

1.3 数据处理与分析

利用 Microsoft Excel 进行数据处理和计算,利用 SPSS 20.0 软件进行相关性检验、正态检验、主成分分析及相关图表生成。为避免不同测试指标数量级之间差异的影响,依据隶属函数(公式 1)对原始数据进行归一化处理。

$$U_{xi} = (X_i - X_{imin}) / (X_{imax} - X_{imin}), i=1, 2, 3 \cdots n \quad (1)$$

其中, X_i 表示某份种质第 i 个指标对应的值; X_{imin} 表示所有种质中第 i 个指标的最小值; X_{imax} 表示所有种质中第 i 个指标测定的最大值。

以每个主成分所对应的特征值占所提取主成分总的特征值之和的比例作为权重(公式 2)。

$$\lambda_j = B_j / \sum_{j=1}^m B_j, j=1, 2, 3 \cdots m \quad (2)$$

其中, λ_j 表示主成分的权重, B_j 表示主成分对应的特征值。

$$\text{主成分系数 } k_{ji} = A_{ji} / \sqrt{B_j}, j=1, 2, 3 \cdots m, i=1, 2, 3 \cdots n \quad (3)$$

其中, A_{ji} 为第 j 个主成分中第 i 个指标对应的荷载向量值, B_j 为第 j 个主成分的特征值。

第 j 个主成分得分的函数表达式:

$$F_j = \sum_{i=1}^n (k_{ji} \times U_{xi}), j=1, 2, 3 \cdots m, i=1, 2, 3 \cdots n \quad (4)$$

其中, k_{ji} 为主成分特征向量, U_{xi} 表示某份种质第 i 个指标对应的隶属值。

根据以上各个公式,可得到主成分综合得分模式:

$$F = \sum_{j=1}^m (F_j \times \lambda_j), j=1, 2, 3 \cdots m \quad (5)$$

其中, F_j 为第 j 个主成分得分, λ_j 为第 j 个主成分的权重。

在 F 值的基础上进行数据转换处理,转换后的数据用 D 表示。转换公式如下:

$$D = (F_a - F) / F_a \quad (6)$$

其中, F_a 代表着 F 的极限值, D 值表示由综合

评价指标得到的矮化性状综合评价值,称之为矮化指数(Dwarf Index)。

1.4 矮化性状评价与分级

利用 D 值对荔枝种质资源进行矮化综合评价和分级。 D 值越大,树体的矮化程度越明显; D 值越小,则树体越乔化。根据 D 值正态分布特点,确定矮化程度的分级标准,并参照苹果矮化砧木的分级类型^[10],将 120 份荔枝种质资源分为矮化、半矮化、亚乔化、乔化和极乔化 5 个级别。

2 结果与分析

2.1 荔枝矮化相关形态指标的测定与分析

对枝梢长度、枝梢直径等 8 个矮化相关形态指标进行测定和分析(表 1)。其中,枝梢长度最大的种质为妃子笑,最小的种质为六月雪,平均大小为 15.97 cm,变异系数 0.21;枝梢直径最大者为褐毛荔,最小者为糯米糍,平均值 4.37 mm,变异系数 0.15。枝梢长度和直径可在一定程度上反映树体的生长量,是体现树体乔矮特性的重要指标,从测试数据可知,妃子笑、三月红等长势壮旺的资源枝梢生长量较大,而糯米糍、紫娘喜等矮生性资源枝梢生长量较小。复叶柄长度最大者为桂早荔,最小者为庙种糯,平均值 67.71 mm,变异系数 0.29;复叶柄直径最大者为三月红,最小者为祥和荔,平均值为 1.92 mm,变异系数 0.19。分析结果进一步显示,生长势比较壮旺的种质,一般情况下其复叶柄长度和直径则越大,反之,则越小。此外,节间长度也是反映树体乔矮程度的重要指标,在 120 份种质中,妃子笑、三月红等乔化种质的枝梢节间普遍大于相对矮化的种质,最大者为永发 18 号,最小者为六月雪,平均值 30.16 mm,变异系数 0.27。叶片大小方面,叶片长度最大者为妃子笑,最小者为南海荔,平均值 109.58 mm,变异系数 0.17;叶片宽度最大者依然是妃子笑,最小者为泰国荔 KOM,平均值 32.25 mm,变异系数 0.17。与其他指标不同的是,叶片厚度与树体长势似乎无明显的规律,其最大者为贡仔,最小者为小金钟,平均值 0.21 mm,变异系数 0.10。综上所述,荔枝乔化种质比矮化种质更为“粗枝大叶”,具有长而粗壮的枝梢和复叶柄,节间较长,叶片宽大,长势壮旺。因此,除了叶片厚度之外,本研究选择枝梢长度、枝梢直径等 7 个矮生相关的形态指标对荔枝种质进行矮化程度鉴定评价是切实可行的。

表 1 荔枝矮化相关形态指标的测定结果分析

Table 1 Measurement analysis of dwarfing-related morphological indicators in litchi germplasm resources

项目 Item	枝梢长度 (cm) LNB	枝梢直径 (mm) DNB	复叶柄长度 (mm) LCP	复叶柄直径 (mm) DCP	节间长度 (mm) LI	叶片长度 (mm) LSL	叶片宽度 (mm) WSL	叶片厚度 (mm) TSL
最大值 Max.	25.94	6.01	128.94	2.94	49.35	156.45	49.09	0.26
最小值 Min.	8.92	2.93	34.65	1.30	13.33	74.05	20.11	0.16
平均值 Mean	15.97	4.37	67.71	1.92	30.16	109.58	35.25	0.21
标准差 SD	3.38	0.67	19.54	0.37	8.29	18.52	6.13	0.02
变异系数 CV	0.21	0.15	0.29	0.19	0.27	0.17	0.17	0.10

LNB: length of new branch, DNB: diameter of new branch, LCP: length of common petiole, DCP: diameter of common petiole, LI: length of internode, LSL: length of single leaf, WSL: width of single leaf, TSL: thickness of single leaf. The same as below

对测定结果进行正态分布检测(表 2,图 1),发现枝梢直径、节间长度和叶片宽度等 3 个性状服从正态分布,枝梢长度、复叶柄长度和叶片长度等 3 个性状近似服从正态分布,而复叶柄直径和叶片厚度不符合正态分布。对数据的分布范围进一步分析结果表明,枝梢长度在 10~20 cm 之间的有 99 份,大于 20 cm 的品种有 17 份,小于 10 cm 的品种有 4 份;枝梢直径在 3.5~5.0 mm 之间的品种有 84 份,大于 5.0 mm 的品种有 24 份,小于 3.5 mm 的品种有 12 份;复叶柄长度在 45~90 mm 之间的品种有 92 份,大于 90 mm 的品种有 18 份,小于 50 mm 的品种有 10 份;复叶柄直径在 1.5~2.5 mm 之间的品种有 98 份,大于 2.5 mm 的品种有 10

份,小于 1.5 mm 的品种有 12 份;节间长度在 20~40 mm 之间的品种有 89 份,大于 40 mm 的品种有 18 份,小于 20 mm 的品种有 13 份;叶片长度在 85~130 mm 之间的品种有 94 份,大于 130 mm 的荔枝品种有 17 份,小于 85 mm 的品种有 9 份;叶片宽度在 28~45 mm 之间的品种有 97 份,大于 45 mm 的品种有 8 份,小于 28 mm 的品种有 15 份;叶片厚度在 0.19~0.24 mm 之间的品种有 91 份,大于 0.23 mm 的品种有 15 份,小于 0.19 mm 的品种有 14 份。根据以上分析结果,并结合荔枝遗传多样性的特点,可初步相对地将大多数荔枝种质评价为长势中庸的资源,乔化或矮化资源较少,大约占比 10%~20%。

表 2 荔枝矮化相关形态指标的正态性检验

Table 2 Normal distribution test of dwarf-related morphological indices in litchi germplasm resources

指标 Index	K-S 检验 ^a Kolmogorov-Smirnov ^a			S-W 检验 Shapiro-Wilk		
	统计量 Statistics	自由度 df	显著性分析 Sig.	统计量 Statistics	自由度 df	显著性分析 Sig.
枝梢长度 LNB	0.089	120	0.022	0.980	120	0.065
枝梢直径 DNB	0.041	120	0.200 [☆]	0.991	120	0.626
复叶柄长度 LCP	0.112	120	0.001	0.943	120	0.000
复叶柄直径 DCP	0.124	120	0.000	0.948	120	0.000
节间长度 LI	0.061	120	0.200 [☆]	0.980	120	0.079
叶片长度 LSL	0.091	120	0.016	0.977	120	0.034
叶片宽度 WSL	0.038	120	0.200 [☆]	0.991	120	0.671
叶片厚度 TSL	0.130	120	0.000	0.971	120	0.010

^a: 显著水平修正; ☆: 真实显著水平的下限

^a: Lilliefors significance correction, ☆: Lower bound of true significance

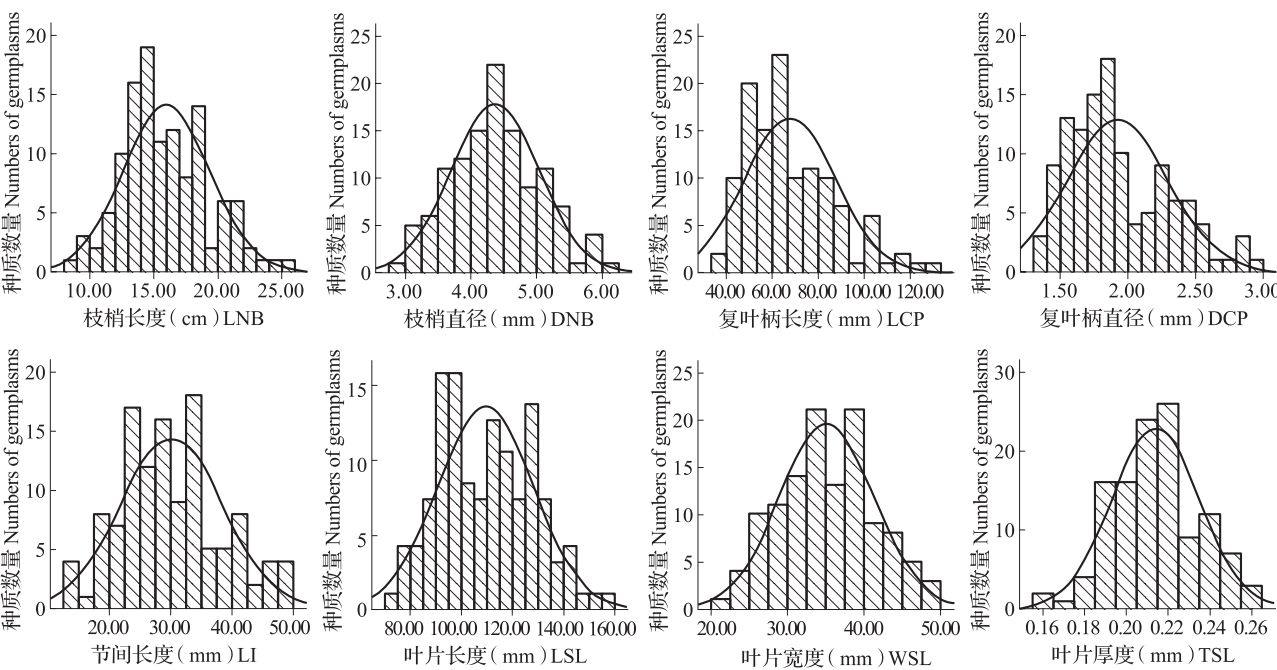


图 1 各个性状在 120 份荔枝种质中的频数分布直方图

Fig. 1 Frequency histogram of each trait in 120 litchi germplasm resources

2.2 相关性分析

由于枝梢长度、枝梢直径等多个指标在反映树体乔矮程度方面具有较好的一致性,为此,对 8 个性状的测定结果进行相关性分析(表 3)。不同性状之间均存在一定程度上的相关性,且大多数性状的相关性达到了极显著水平。其中,叶片长度和叶片宽度相关性最强,相关系数达到了 0.696;其次为复叶柄长度和复叶柄直径,相关系数为 0.651;叶片长度与复叶柄直径、叶片长度与复叶柄长度、枝梢长度与枝梢直径之间的相关系数均达到了 0.60 以上;枝梢直径与其他 7 个性状的相关性均达到了极显著

水平,枝梢长度、复叶柄长度、叶片宽度等 3 个性状分别与叶片厚度之外的所有性状达到极显著相关,而节间长度与复叶柄直径显著性不相关,与叶片长度相关性未达到极显著水平。值得注意的是,叶片厚度除了与枝梢直径和节间长度具有一定的相关性(相关系数分别为 0.312 和 0.185)之外,与其他 5 个性状的相关性均未达到显著水平。根据以上结果,可进一步明确枝梢长度、枝梢直径、复叶柄长度、复叶柄直径、节间长度、叶片长度、叶片宽度等 7 个形态指标相关性好,能够共同反映荔枝的乔化或矮化表型,为荔枝矮化性状的综合评价提供了可能性。

表 3 荔枝矮化性状的相关矩阵分析

Table 3 Correlation matrix analysis of dwarfing-related characters of litchi

指标 Index	枝梢长度 LNB	枝梢直径 DNB	复叶柄长度 LCP	复叶柄直径 DCP	节间长度 LI	叶片长度 LSL	叶片宽度 WSL	叶片厚度 TSL
枝梢长度 LNB	1.000	0.607**	0.582**	0.304**	0.585**	0.268**	0.287**	0.142
枝梢直径 DNB	—	1.000	0.491**	0.301**	0.503**	0.276**	0.232**	0.312**
复叶柄长度 LCP	—	—	1.000	0.651**	0.443**	0.601**	0.466**	0.032
复叶柄直径 DCP	—	—	—	1.000	0.038	0.643**	0.564**	0.093
节间长度 LI	—	—	—	—	1.000	0.159*	0.251**	0.185*
叶片长度 LSL	—	—	—	—	—	1.000	0.696**	0.148
叶片宽度 WSL	—	—	—	—	—	—	1.000	0.032
叶片厚度 TSL	—	—	—	—	—	—	—	1.000

** : $P < 0.01$, * : $P < 0.05$

2.3 主成分分析

选择枝梢长度、枝梢直径等相关性较好的 7 个性状,首先采用隶属函数对原始数据进行归一化转换,然后对转换后的数据进行主成分分析(表 4,表 5)。取特征值大于 1 的主成分,结果显示,得到 2 个主成分的累积方差贡献率为 72.738%,表示能够

解释荔枝树体生长程度大部分的成分信息。其中,第 1 主成分方差贡献率为 51.295%,最具代表的指标包括复叶柄长度、叶片长度、复叶柄直径、枝梢长度等,且第 1 主成分与 7 个指标均呈现正相关;第 2 主成分方差贡献率为 21.443%,代表性指标包括节间长度、枝梢长度和枝梢直径等。

表 4 各成分解释的总方差
Table 4 Total variance explained by each component

成分 Component	初始特征值 Initial eigenvalues			提取平方和载入 Extraction sums of squared loadings		
	合计 Total	方差贡献率(%) Variance contribution	累积方差贡献率(%) Cumulative variance contribution	合计 Total	方差贡献率(%) Variance contribution	累积方差贡献率(%) Cumulative variance contribution
1	3.591	51.295	51.295	3.591	51.295	51.295
2	1.501	21.443	72.738	1.501	21.443	72.738
3	0.633	9.042	81.781			
4	0.445	6.353	88.133			
5	0.359	5.131	93.264			
6	0.287	4.102	97.366			
7	0.184	2.634	100.000			

提取方法:主成分分析
Extraction method: principal component analysis (PCA)

表 5 主成分的特征向量与载荷矩阵
Table 5 Eigenvectors and loading matrix of principal components

指标 Index	第 1 主成分 PC1		第 2 主成分 PC2	
	特征向量 Eigenvector	载荷 Loading	特征向量 Eigenvector	载荷 Loading
枝梢长度 LNB	0.375	0.710	0.406	0.497
枝梢直径 DNB	0.352	0.667	0.379	0.464
复叶柄长度 LCP	0.455	0.862	-0.011	-0.014
复叶柄直径 DCP	0.382	0.724	-0.393	-0.481
节间长度 LI	0.295	0.559	0.517	0.633
叶片长度 LSL	0.395	0.748	-0.398	-0.487
叶片宽度 WSL	0.374	0.708	-0.336	-0.412

2.4 荔枝矮化性状的综合评价

根据表 4 和表 5 的结果,以 2 个主成分代表 7 个矮化相关形态指标所表达的信息,建立不同种质资源矮化程度的评价模型,由公式(4)得出 2 个主成分具体的函数表达式,式中 Z1~Z7 分别代表枝梢长度等 7 个测定指标归一化处理后的值,F1 和 F2 表示 2 个主成分的得分值。

$$F1=0.375 \times Z1+0.352 \times Z2+0.455 \times Z3+0.382 \times Z4+0.295 \times Z5+0.395 \times Z6+0.374 \times Z7$$
$$F2=0.406 \times Z1+0.379 \times Z2-0.011 \times Z3-0.393 \times Z4+0.517 \times Z5-0.398 \times Z6-0.336 \times Z7$$
根据公式(5)得到主成分的综合得分 F,分别计算出 120 份种质资源的 F 值。
$$F=0.705 \times F1+0.295 \times F2$$
$$=0.3838 \times Z1+0.3599 \times Z2+0.3173 \times Z3+0.1535 \times Z4+0.3604 \times Z5+0.1610 \times Z6+0.1642 \times Z7$$
F 值反映了树体长势程度,F 值越大,对应树体的乔化特性越明显;反之,F 值越小,对应树体的矮化特性越明显。理论上,当归一化处理后的数据 Z1~Z7 同时达到最大值 1 时,F 值达到了极限值,此时得到的 F 值为 1.90,因此,根据公式(6)得到 D 值的计算公式如下:

$$D=(1.90-F)/1.90$$

通过转换处理后,D 值始终处于 0~1 之间,与 F 值呈线性负相关,能够更加直观地评价荔枝种质的相对矮化程度。通过计算得到 120 份荔枝种质资源的 D 值,最大值为 0.869(糯米糍),最小值为 0.089(妃子笑),平均值 0.588,变异系数 0.253。

2.5 矮化分级评价

对 120 份荔枝种质资源的 D 值进行正态检测,发现 D 值近似服从正态分布特点(图 2)。根据 D 值的计算结果及分布频数分析,本研究确定矮化评价的分级标准为:Ⅰ级:矮化, $D \geq 0.80$;Ⅱ级:半矮化, $0.70 \leq D < 0.80$;Ⅲ级:亚乔化, $0.50 \leq D < 0.70$;Ⅳ级:乔化, $0.30 \leq D < 0.50$;Ⅴ级:极乔化, $D < 0.30$ 。根据以上分级标准,120 份荔枝种质资源矮化分级评价结果如表 6 所示。其中,矮化种质有 9 份,占比 7.50%,代表性种质包括糯米糍、紫娘喜等;半矮化种质有 10 份,占比 8.33%,代表性种质包括农美 12 号(俗称矮荔)、KOM 等;亚乔化种质数量最多,共有 69 份,占比 57.50%,代表性种质包括桂味、白糖罂等;乔化种质有 25 份,占比 20.83%,包括黑叶、无核荔等;极乔化品种有 7 份,占比 5.83%,包括三月红、妃子笑等。由此可见,以上结果基于枝梢长度等形态指标的测定,通过主成分分析对荔枝矮化程度进行综合评价和分级,建立了比较客观准确的

鉴定方法,探索出荔枝矮化性状的量化评价标准,为荔枝矮化资源的发掘和筛选提供了有效的参考依据。

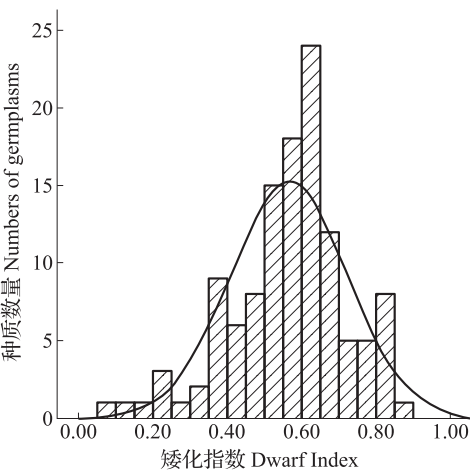


图 2 D 值在 120 份荔枝种质中的频数分布直方图
Fig. 2 Frequency histogram of D value in 120 litchi germplasm resources

表 6 基于 D 值对 120 份荔枝品种矮化程度分级评价情况
Table 6 Evaluation of dwarf-degree of 120 litchi varieties based on D value

评价级别 Evaluation grade	评定品种 (D 值) Varieties evaluated (D value)	份数 Number of varieties	占比 (%) Percentage
矮化 Dwarf	糯米糍 (0.862)、尖叶 (0.847)、怀枝 (0.846)、庙种糯 (0.843)、紫娘喜 (0.836)、海星 20 号 (0.825)、沙坑种 (0.816)、小金钟 (0.815)、鸭姆笼 (0.806)	9	7.50
半矮化 Semidwarf	六月雪 (0.791)、农美 12 号 (0.790)、南海荔 (0.788)、KOM (0.780)、祥和荔 (0.753)、丰产 A (0.749)、海星 11 号 (0.741)、及第 (0.717)、琼山 (0.716)、凤花 (0.709)	10	8.33
亚乔化 Subarboreous	临高 01 号 (0.683)、岭丰糯 (0.679)、禾下串 (0.676)、十月荔 (0.676)、农美 09 号 (0.676)、白荔 (0.676)、候臣 (0.676)、水蜜 (0.664)、早熟 (0.663)、新球蜜荔 (0.657)、澄迈 (0.655)、青皮 (0.651)、东刘 1 号 (0.648)、灵山香荔 (0.648)、蜜味 (0.647)、永发 13 号 (0.647)、雪怀子 (0.642)、观音绿 (0.642)、海星 07 号 (0.637)、农美 07 号 (0.634)、屯昌 (0.630)、岭南 15 号 (0.627)、永发 05 号 (0.626)、桂味 (0.624)、海星 10 号 (0.620)、鸡嘴荔 (0.619)、海星 08 号 (0.618)、大锦钟 (0.615)、海星 04 号 (0.614)、海星 14 号 (0.614)、四两果 (0.611)、下番枝 (0.611)、犀角子 (0.609)、丛星 (0.608)、岭南 45 号 (0.608)、金银宝 (0.601)、马贵荔 (0.599)、海星 17 号 (0.597)、晚埔 (0.593)、农美 03 号 (0.593)、临高 02 号 (0.592)、海星 26 号 (0.591)、尚书怀 (0.590)、兰竹 (0.590)、荷花大红荔 (0.583)、宋家香 (0.583)、永发 25 号 (0.581)、海星 12 号 (0.576)、早埔 (0.576)、海星 19 号 (0.569)、农美 05 号 (0.563)、海星 01 号 (0.562)、大红袍 (0.553)、桶仔 (0.552)、库林 (0.549)、海星 02 号 (0.538)、直奉 (0.536)、春 04 号 (0.534)、海星 06 号 (0.533)、蔡坑肉丸 (0.529)、永发 08 号 (0.528)、霞浦荔 (0.527)、金钟 (0.527)、白糖罂 (0.525)、状元红 (0.519)、海星 21 号 (0.516)、乌叶舅 (0.516)、海星 18 号 (0.511)、水林 (0.503)	69	57.50
乔化 Arboreous	软枝早红 (0.498)、林 40 号 (0.496)、永 06 号 (0.482)、春 25 号 (0.470)、海星 24 号 (0.469)、海星 22 号 (0.468)、双肩玉荷包 (0.466)、泉州早红 (0.460)、岭南 34 号 (0.431)、临高 03 号 (0.431)、海星 15 号 (0.413)、大早 1 号 (0.406)、海星 05 号 (0.404)、黑叶 (0.400)、贡仔 (0.393)、陈紫 (0.392)、无核荔 (0.391)、桂林 (0.376)、永发 07 号 (0.375)、龙眼本 (0.361)、白驳早红 (0.357)、猪母乳 (0.352)、岭南 39 号 (0.352)、硬枝早红 (0.339)、海星 16 号 (0.326)	25	20.83
极乔化 Very arboreous	大丁香 (0.253)、三月红 (0.235)、褐毛荔 (0.213)、永发 18 号 (0.205)、海星 25 号 (0.179)、桂早荔 (0.130)、妃子笑 (0.089)	7	5.83

3 讨论

3.1 荔枝矮化资源的发掘与利用

由于木本果树大多为高大乔木,生长势强,造成果园栽培管理困难,因此,在现代果树栽培和生产中,矮化和密植是非常重要的目标,并成为未来果树栽培的发展趋势^[11]。早在 20 世纪初,英国东茂林实验站便开始利用 M 系苹果和各种砧木杂交,选育出一批矮化极好的优良砧木^[12],有效推动了世界苹果矮化栽培模式的应用进程。我国具有十分丰富的果树种质资源^[13],近年来,通过鉴定评价相继发掘出大量的矮化果树资源,并利用矮化种质资源培育出许多在生产中应用的优良矮化砧木,如苹果矮化砧‘SH1’^[14]、梨矮化砧‘中矮 4 号’^[15]等。由此可见,矮化种质资源的发掘与利用,对于培育矮化果树品种或砧木具有十分重要的意义。

荔枝矮化种质资源的研究起步较晚,目前仅有少量报道。苗平生等^[16]调查发现,海南优稀荔枝品种农美 12 号具有显著的矮化特性,7 年树龄的植株平均株高仅为 248.3 cm,因而被命名为矮荔。张永福等^[17]通过资源调查获得了矮化品种 Ya1,证实 Ya1 具有一定矮化性,同时还发现紫娘喜也表现出较强的矮化性,并利用 Ya1 和紫娘喜进行矮化相关机制的研究。以上报道说明,虽然荔枝属于高大乔木,但同样存在着一定程度的矮化资源,由于相关研究较少,大多数矮化资源可能尚处于未发现状态,这些资源的搜集、鉴定评价和进一步发掘利用,将为荔枝矮化品种的培育打下必要的工作基础。

3.2 矮化资源的鉴定与评价

国内外学者针对果树矮化砧木预选指标开展过大量的研究,主要集中在根茎组织解剖法、叶结构测定法、生物物理学测定法、生理生化分析法等方面的研究,如苹果^[18]、梨^[19]、柑橘^[20]、核桃^[21]、樱桃^[22]、山楂^[23]、荔枝^[16]等相关研究表明,枝皮率、木质部导管密度、叶片上下表皮占叶片厚度的百分率、叶片的栅/海比、气孔密度、根皮率等均不同程度地与果树的生长势有一定的相关性,能够作为矮化性状的预选指标。实际上,植株矮化性状首先表现在其形态学方面的差异,在果树矮化育种中选择矮化材料的常规方法,大多是以植株的外观性状特征,如枝条节间短、树体矮小、树形紧凑、叶片大小等作为初选依据^[24]。贾敬贤等^[25]对梨树矮化实生苗及嫁接品种矮化形态指标进行了相关性分析,发现具有培育成矮化品种或砧木潜力的实生苗,普遍具

备新梢生长量少、新梢节间短、枝干比较粗壮等形态特点。Weibel 等^[26]研究发现桃树的节间短、一年生枝条粗壮、新梢生长量低等特征越明显,矮化特性则越强。曹敏格等^[27]比较了乔化苹果植株与矮化苹果植株的新梢生长量,发现矮化植株的新梢生长总量显著低于乔化和半矮化植株。王彩虹等^[28]对梨的主要形态学特性的比较发现,梨的矮化性状表现为一年生枝条粗壮、节间较短等特点。侯玉珏等^[29]研究发现,普通型、短枝型和柱型等 3 种苹果的叶片特征有很大差异,随着矮化程度的加深,叶面积减小,叶片厚度增加,证明叶片形态与矮化性状具有一定的相关性。苏怡^[30]比较了 7 个枇杷株系的新梢生长曲线变化,表明矮化株系的新梢生长量始终低于其他供试植株,且显著低于乔化品种。由此可见,通过枝梢长度、枝梢直径、节间长度、叶片大小等形态学指标的测定,对于鉴定评价果树的矮化特性具有一定的可行性。

3.3 荔枝矮化性状的综合评价

曹敏格等^[27]提出,在苹果矮化砧木预选研究中,只靠某 1~2 个指标来决定砧木的矮化程度是不全面的,采用多个指标综合评价可以提高预测的准确性。由于矮化植株往往树势偏弱,并主要表现为枝梢生长量小、节间短、叶片小等特点,为此,本研究选择了枝梢长度、枝梢直径、复叶柄长度、复叶柄直径、节间长度、叶片长度、叶片宽度、叶片厚度等 8 个形态指标进行测定和分析。经相关性和主成分分析,发现叶片厚度性状与其他性状相关性较差,因而将该指标剔除;枝梢长度等其余 7 个指标之间几乎都存在显著或极显著的相关性,结合主成分分析,结果表明了这些形态指标在树势强弱指向方面具有相似的代表性,可以作为荔枝矮化性状的评价指标。

荔枝矮化性状综合评价的最终结果是建立相应的评价标准,对供试种质资源矮化程度进行等级划分,以此来判定其矮化类型。本研究参考英国东茂林试验站对矮化苹果砧木的分级类型^[10],并根据 D 值的大小范围及近似正态分布特点,将 120 份荔枝种质资源划分为矮化、半矮化、亚乔化、乔化和极乔化 5 个等级,并确定了每个等级的典型代表品种;依据该分级方法,明确了紫娘喜为矮化品种,农美 12 号为半矮化品种,桂味、白糖罂等为亚乔化品种,黑叶、无核荔为乔化品种,妃子笑、三月红等为极乔化品种,这些评价结果与田间观测结论基本一致,说明该评价方法具有较好的可靠性,为荔枝矮化资源的搜集发掘、鉴定评价及矮化品种的培育等提供了可行的技术方案和参考依据。

参考文献

- [1] 李建国.荔枝学.北京:中国农业出版社,2008:5
Li J G. Litchi science. Beijing: China Agriculture Press, 2008: 5
- [2] 齐文娥,陈厚彬,李伟文,张浩军.中国荔枝产业发展现状、趋势与建议.广东农业科学,2016,43(6):173-179
Qi W E, Chen H B, Li W W, Zhang H J. Development status, trends and suggestions of Chinese litchi industry. Guangdong Agricultural Sciences, 2016, 43(6): 173-179
- [3] 吴元立,易干军,周碧容,曾继吾,黄永红.荔枝与龙眼种质资源研究进展.植物遗传资源学报,2007,8(4):498-502
Wu Y L, Yi G J, Zhou B R, Zeng J W, Huang Y H. Advances on the research of litchi and longan germplasm resources. Journal of Plant Genetic Resources, 2007, 8(4): 498-502
- [4] 曾淇,李明芳,郑学勤.基于SSR标记的荔枝种质遗传多样性分析.植物遗传资源学报,2010,11(3):298-304
Zeng Q, Li M F, Zheng X Q. Analysis of genetic diversity within litchi varieties based on SSR markers. Journal of Plant Genetic Resources, 2010, 11(3): 298-304
- [5] 王建春,陈存璧.妃子笑荔枝矮化密植栽培模式示范试验.亚热带植物科学,2001(2):24-26
Wang J C, Chen C B. Dwarf culture and compact planting of Feizixiao litchi. Subtropical Plant Science, 2001(2): 24-26
- [6] 欧春青,姜淑蓉,王斐,宣利利,王西成,马力.果树矮化机理的研究进展.浙江农业科学,2010(3):487-491
Ou C Q, Jiang S L, Wang F, Xuan L L, Wang X C, Ma L. Research progress on the dwarfing mechanism of fruit trees. Zhejiang Agricultural Sciences, 2010(3): 487-491
- [7] Weber M S. Optimizing the tree density in apple orchards on dwarf rootstocks. Acta Horticulturae, 2001, 557(557): 229-234
- [8] Botelho R V, Schneider E, Machado D, Piva R, Verlindo A. Quince 'CPP': new dwarf rootstock for pear trees on organic and high density planting. Revista Brasileira de Fruticultura, 2012, 34(2): 589-596
- [9] Prassinis C, Ko J H, Lang G, Iezzoni A F, Han K H. Rootstock-induced dwarfing in cherries is caused by differential cessation of terminal meristem growth and is triggered by rootstock-specific gene regulation. Tree Physiology, 2009, 29(7): 927-936.
- [10] 韩振海.苹果矮化密植栽培-理论与实践.北京:科学出版社,2011:15
Han Z H. Theory and practice of apple dwarfing and close planting. Beijing: Science Press, 2011: 15
- [11] 姜志昂,孙建设,彭建营,邵建柱.苹果砧木 SH40 *MdNCED1* 基因克隆与表达分析.植物遗传资源学报,2014,15(1):153-159
Jiang Z A, Sun J S, Peng J Y, Shao J Z. Isolation and expression of *MdNCED1* gene from apple rootstock SH40. Journal of Plant Genetic Resources, 2014, 15(1): 153-159
- [12] 李丙智,张林森,韩明玉,冯焕德.世界苹果矮化砧木应用现状.果农之友,2007(7):4-6
Li B Z, Zhang L S, Han M Y, Feng H D. Application status of world apple dwarf rootstocks. Friends of Fruit Farmers, 2007(7): 4-6
- [13] 王力荣.我国果树种质资源科技基础性工作30年回顾与发展建议.植物遗传资源学报,2012,13(3):343-349
Wang L R. Review for the past three decades and developmental suggestions for fruit germplasm resource in China. Journal of Plant Genetic Resources, 2012, 13(3): 343-349
- [14] 杨廷桢,田建保,高敬东,李登科,牛自勉,邵嘉鸣,王骞,郝晓梦,蔡华成,邵开基,张忠仁.新型苹果矮化砧木——SH1的选育.果树学报,2012,29(2):308-309,156
Yang T Z, Tian J B, Gao J D, Li D K, Niu Z M, Shao J M, Wang Q, Gao X M, Cai H C, Shao K J, Zhang Z R. Breeding of a new apple dwarfing rootstock-SH1. Journal of Fruit Science, 2012, 29(2): 308-309, 156
- [15] 姜淑蓉,欧春青,王斐,马力,李连文,郝宁宁,贾敬贤.梨矮化中间砧新品种‘中矮4号’的选育.果树学报,2016,33(5):633-636
Jiang S L, Ou C Q, Wang F, Ma L, Li L W, Hao N N, Jia J X. A new interstock cultivar for pear dwarf cultivation, 'Zhong'ai 4'. Journal of Fruit Science, 2016, 33(5): 633-636
- [16] 苗平生,黄业前,张德亭,李晓秋.海南部分稀优荔枝品种简介.中国南方果树,1997(5):30-31
Miao P S, Huang Y Q, Zhang D T, Li X Q. A brief introduction of some rare and excellent litchi varieties in Hainan. South China Fruits, 1997(5): 30-31
- [17] 张永福,卢博彬,潘丽佳,王英,胡桂兵,胡又厘,王惠聪,刘成明.荔枝矮化品种的相关机制研究.果树学报,2011,28(4):624-629,741-742
Zhang Y F, Lu B B, Pan L J, Wang Y, Hu G B, Hu Y L, Wang H C, Liu C M. Study on the related mechanism of litchi dwarf varieties. Journal of Fruit Science, 2011, 28(4): 624-629, 741-742
- [18] 史宝胜,徐继忠,马宝焜,王立英,李明哲.几种苹果矮化砧木枝条与叶片的解剖结构研究.河北林果研究,2000,15(4):334-338
Shi B S, Xu J Z, Ma B K, Wang L Y, Li M Z. Study on the anatomical structure of branches and leaves of several apple dwarf rootstocks. Hebei Journal of Forestry and Orchard Research, 2000, 15(4): 334-338
- [19] 刘延杰.秋子梨不同类型生长势与枝叶解剖构造的研究.北方园艺,2000(5):29-30
Liu Y J. Study on different growth potentials and anatomical structure of branches and leaves of qiuzi pear. Northern Horticulture, 2000(5): 29-30
- [20] 赵大中,陈民,罗先实.柑桔矮化砧木的生理生化预选指标研究.西北植物学报,1997,17(1):28-33
Zhao D Z, Chen M, Luo X S. Physiological and biochemical studies on pre-selected indices for dwarfism in citrus rootstocks. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 1997, 17(1): 28-33
- [21] 张志华,刘新彩,高仪,王红霞,赵悦平.核桃根部解剖结构与生长势的关系.河北农业大学学报,2006,29(1):6-8
Zhang Z H, Liu X C, Gao Y, Wang H X, Zhao Y P. Study on the relationship between the anatomical structure of roots and the growing of *Juglans regia*. Journal of Agricultural University of Hebei, 2006(1): 6-8
- [22] 王宏伟,张连忠,王嘉艳.甜樱桃矮化砧木矮化机理解剖学研究.山东农业大学学报,2004,35(2):298-300
Wang H W, Zhang L Z, Wang J Y. Anatomic study on dwarf mechanism of sweet cherry dwarf rootstocks. Journal of Shandong Agricultural University, 2004, 35(2): 298-300
- [23] 张玉兰,杨焕芝.枝、叶解剖构造、过氧化物酶活性与山楂属

- 种、株型生长势的关系. 内蒙古农牧学院学报, 1999, 20(1): 46-51
- Zhang Y L, Yang H Z. Relations of and anatomic structure of shoot and leaf and peroxidase activity to growth potential of *Crateagus* species and growth-type. Journal of Inner Mongolia Institute of Agriculture and Animal Husbandry, 1999, 20(1): 46-51
- [24] 曹加光, 陈少雄, 罗建中. 植物矮化和桉树矮化育种研究进展. 桉树科技, 2007(2): 28-30
- Cao J G, Chen S X, Luo J Z. Progress in research on dwarf plant and eucalypt dwarf breeding. Eucalypt Science and Technology, 2007(2): 28-30
- [25] 贾敬贤, 姜敏, 纪宝生. 梨砧木育种矮化潜力鉴定研究初报. 中国果树, 1983(2): 40-43
- Jia J X, Jiang M, Ji B S. Preliminary report on identification of dwarf potential of pear rootstock breeding. China Fruits, 1983, (2): 40-43
- [26] Weibel A, Johnson R S, DeJong T M. Comparative vegetative growth responses of two peach cultivars grown on size-controlling versus standard rootstocks. Journal of American Society for Horticultural Science, 2003, 128(4): 463-471
- [27] 曹敏格, 杨海玲, 张文, 张治东, 孙杨吾, 朱元娣. 苹果砧木矮化性评价指标的研究. 中国农业大学学报, 2008, 13(5): 11-18
- Cao M G, Yang H L, Zhang W, Zhang Z D, Sun Y W, Zhu Y D. Parameters for evaluating dwarfing ability in apple rootstocks. Journal of China Agricultural University, 2008, 13(5): 11-18
- [28] 王彩虹, 田义轲, 戴洪义, 代庆海, 殷召学, 杨晓芹. 西洋梨矮化资源的生物学特性研究. 莱阳农学院学报, 2006(2): 119-121
- Wang C H, Tian Y K, Dai H Y, Dai Q H, Yin Z X, Yang X Q. Study of the biological characters of a dwarf pear resource from *P. communis*. Journal of Laiyang Agricultural College, 2006(2): 119-121
- [29] 侯玉珏, 张晓云, 赵彩平, 韩明玉, 刘小媛, 邢利博. 矮化型、短枝型和柱型苹果苗枝芽特性和叶片特征比较. 西北农业学报, 2012, 21(7): 134-137
- Hou Y J, Zhang X Y, Zhao C P, Han M Y, Liu X Y, Xing L B. Comparison of branch, bud and leaf characteristics of the dwarf-type, spur-type and columnar young apple trees. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2012, 21(7): 134-137
- [30] 苏怡. 枇杷不同矮化性株系(品种)的形态、生理和生化指标的研究. 雅安: 四川农业大学, 2014
- Su Y. Studies on the morphological, physiological and biochemical indexes of the lines(cultivar) with varying dwarfness in loquat. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2014