



吴少东, 郭昌庆, 于宏, 等. 江西南方红豆杉球果表型性状多样性分析[J]. 江西农业大学学报, 2021, 43(6): 1327–1338.
WU S D, GUO C Q, YU H, et al. Phenotypic diversity of *Taxus wallichiana* var. *mairei* cones in Jiangxi, China[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2021, 43(6): 1327–1338.

江西南方红豆杉球果表型性状多样性分析

吴少东¹, 郭昌庆¹, 于宏², 裘利洪^{1*}, 张文根^{1*}

(1. 江西农业大学 野生动植物保护与利用研究中心/林学院, 江西 南昌 330045; 2. 江西省上饶市林业科学研究所, 江西 上饶 334000)

摘要:【目的】通过对南方红豆杉球果的表型多样性分析和综合评价, 为其食用和观赏品种的选育提供理论基础。【方法】以采自江西的 37 份南方红豆杉为材料, 对其球果和种子的长度、宽度和长宽比以及假种皮颜色等 9 个数量性状和 5 个描述性状进行观测, 计算 Shannon-Weaver 指数, 进行相关性、主成分和聚类分析, 并进行综合评价。【结果】江西南方红豆杉球果的表型性状存在着丰富的变异, 5 个描述性状的多样性指数在 0.494~1.876, 其中球果形状的多样性指数最大, 为 1.876; 8 个数量性状的变异系数范围在 7.49%~26.55%, 变异程度由大到小依次为球果百粒质量(26.55%)、假种皮厚度(22.90%)、种子千粒质量(16.51%)、球果长(13.02%)、球果长宽比(12.56%)、种子长宽比(10.57%)、球果宽(10.39%)、种子宽(8.12%)、种子长(7.49%), 其中种子长的变异系数最低, 球果百粒质量的变异系数最高。相关性分析显示: 球果长、球果宽、球果百粒质量、球果长宽比之间都存在极显著的正相关性($P < 0.01$), 种子长和种子宽之间相关性不显著($P > 0.05$)。主成分分析显示: 前 4 个主成分累计贡献率 97.494%, 能较好地反映出南方红豆杉球果的大部分性状。其中主成分 1 反映的是球果的大小, 主成分 2 反映的是种子的宽度, 主成分 3 反映的则是种子的质量。聚类分析结果显示: 在欧式距离为 10 处, 37 份南方红豆杉球果被聚成 4 类。A 类, 包含 11 个单株, 种子的表现较好; B 类, 包含 13 个单株, 各表型表现均为中等; C 类, 包含 6 个单株, 假种皮较厚, 可食率较高; D 类, 包含 7 个单株, 球果性状优良。【结论】江西南方红豆杉球果表型多样性丰富, 具有较高的园林景观价值和极具开发潜力的食用价值。其中, JA-SC-O3 单株综合评分最高, GZ-LN-02 单株评分最低。

关键词: 南方红豆杉; 球果; 种子; 性状; 多样性

中图分类号: S791.49 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-2286(2021)06-1327-12

Phenotypic Diversity of *Taxus wallichiana* var. *mairei* Cones in Jiangxi, China

WU Shaodong¹, GUO Changqing¹, YU Hong², QIU Lihong^{1*}, ZHANG Wengen^{1*}

(1. Research Center for Wildlife Conservation and Utilization, College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. Shangrao City Forestry Research Institute, Shangrao, Jiangxi 334000, China)

收稿日期: 2021-05-08 **修回日期:** 2021-06-26

基金项目: 江西省重点研发计划项目(20202BBFL63019)和江西省林业科技创新专项资金项目([2019]24 号)

Project supported by the Jiangxi Province Key Research and Development Program (20202BBFL63019) and Jiangxi forestry Science and Technology Innovation Project([2019]24)

作者简介: 吴少东, orcid.org/0000-0003-0339-8416, 274903224@qq.com; *通信作者: 裘利洪, 副教授, 主要从事植物分类、资源与利用研究, orcid.org/0000-0002-4840-2047, 519872049@qq.com; 张文根, 副教授, 博士, 主要从事植物分类、资源与利用研究, orcid.org/0000-0003-0946-8614, wgzhang@jxau.edu.cn。

Abstract: [Objective] Phenotypic diversity analysis and comprehensive evaluation of *Taxus wallichiana* var. *mairei* cones were carried out to provide a theoretical basis for the breeding of edible and ornamental varieties. [Method] By collecting cones of *Taxus wallichiana* var. *mairei* from Jiangxi, China, 9 quantitative traits, such as the length, width and their ratios to the cone, the length, width and their ratio of the seed, aril color and thickness, and 5 descriptive characters, were observed and analyzed with the calculation of the Shannon-Weaver index. The correlation analysis and principal component analysis were also performed. [Results] The cone diversity of *Taxus wallichiana* var. *mairei* was rich with the diversity index between 0.494 and 1.876 and the coefficient of variation between 7.49% and 26.55%, the diversity index of cone shape was the largest, which was 1.876. The order of the divers degrees of the characters was 100-seed weight of cones (26.55%), aril thickness (22.90%), 1000-grain weight of seeds (16.51%), cone length (13.02%), cone aspect ratio (12.56%), seed aspect ratio (10.57%), cone width (10.39%), seed width (8.12%), and seed length (7.49%). The CV of seed length was the lowest, and the CV of 100-seed weight of cones was the highest. Moreover, the correlation among cone length, cone width, weight per 100 cones, and cone length-to-width ratio, was significantly positive ($P < 0.01$), while the correlation between seed length and seed width was not notable ($P > 0.05$). The principal component analysis showed that the cumulative contribution rate of the four principal components was 97.794%, which could reflect most characteristics of *Taxus wallichiana* var. *mairei* cones. And principal component 1 reflected the size of the cone, principal component 2 reflected the width of the seed, and principal component 3 reflected the weight of the seed. The cluster analysis showed that 37 samples of *Taxus wallichiana* var. *mairei* cones were clustered into four clusters based on the Euclidean distance of 10. Category A, contained 11 individual plants, and the seed performance was better; category B contained 13 individual plants, each with a moderate phenotypic performance; category C, contained 6 individual plants, which had thicker arils and a higher edible rate; category D contained 7 individual plants with excellent cone traits. [Conclusion] The phenotypic diversity of cones of *Taxus wallichiana* var. *mairei* in Jiangxi is rich and has high garden landscape value and edible value with great development potential. JA-SC-03 has the highest score, and GZ-LN-02 has the lowest score.

Keywords: *Taxus wallichiana* var. *mairei*; aril; seed; character; diversity

【研究意义】南方红豆杉(*Taxus wallichiana* Zucc. var. *mairei* (Lemee & H. Léveillé) L. K. Fu & Nan Li)为裸子植物红豆杉科(Taxaceae)常绿乔木,主要分布于我国秦岭以南各省区,属国家一级重点保护植物^[1]。其树姿优美,树干紫红通直,叶片排列整齐、浓绿,树冠塔形,颇为美观,特别是其假种皮肉质红色,鲜艳美丽,故又称之为“美丽红豆杉”^[2]。同时,假种皮含有较高的可溶性糖、蛋白质、脂肪、维生素C、氨基酸、矿物质元素等成分,无毒^[3],可鲜食,也可晒干制成果脯,具有较高的营养价值和观赏价值,经济开发潜力巨大。【前人研究进展】目前,南方红豆杉的研究大多集中在化学成分^[4-6]、繁殖体系^[7-9]、种群动态^[10-12]等方面。南方红豆杉表型方面的研究主要是针对其枝叶性状。例如,肖遥等^[13]对24个产地的南方红豆杉树高、胸径和冠幅等生长性状进行了研究,结果发现各性状在不同产地之间差异显著,存在着不同程度的变异。罗芊芊等^[14]对18个天然居群的叶子表型进行了多样性分析,发现各性状在居群间和居群内差异极显著。欧建德等^[15]则对不同种源南方红豆杉3年生幼树的抽侧枝密度、侧枝数量等10个枝干性状指标进行了分析,发现单株和家系之间的枝干性状均存在着明显的差异。而对南方红豆杉球果(为叙述方便,将含假种皮的种子称“球果”)鲜有专题报导,一定程度上不利于其优良种源的筛选和育种工作。【本研究切入点】表型观测是研究植物多样性最直观、最基础的方法,通过这一方式可以从整体上了解资源的丰富程度,为基因和细胞的研究提供直观依据。本研究首次对南方红豆杉球果的表型性状进行分析,探讨各表型性状间的相关性以及聚类情况,并对其球果表型进行综合评价,这对南方红豆杉品种的选育工作具有重要的意义。【拟解决的关键问题】为南方红豆杉观果和食用品种选育提供基础数据,弥补南方红豆杉球果表型研究方面的一些空白。

1 材料和方法

1.1 试验材料

根据“江西省第二次国家重点保护野生植物资源调查”的南方红豆杉资源调查结果,并考虑实验材料的代表性,于 2020 年在宜春市、上饶市、抚州市等江西南方红豆杉集中分布地采集 37 份实验材料,详情见表 1。

表 1 37 份南方红豆杉实验样品
Tab.1 37 Samples of *Taxus wallichiana* var. *mairei*

编号 Number	地点 Location	经度(E)/ (°) Longitude	纬度(N)/ (°) Latitude	海拔/m Altitude	编号 Number	地点 Location	经度(E)/ (°) Longitude	纬度(N)/ (°) Latitude	海拔/m Altitude
YC-WZ-01	宜春万载	114°23′	28°22′	583.00	SR-YS-01	上饶玉山	118°3′	28°57′	595.00
YC-WZ-02	宜春万载	114°23′	28°22′	638.77	SR-YS-02	上饶玉山	118°4′	28°57′	556.00
YC-WZ-03	宜春万载	114°23′	28°22′	630.96	SR-GF-01	上饶广丰	118°19′	28°7′	404.00
YC-TG-01	宜春铜鼓	114°12′	28°31′	777.00	SR-GF-02	上饶广丰	118°19′	28°7′	402.00
YC-TG-02	宜春铜鼓	114°13′	28°31′	820.00	FZ-NF-01	抚州南丰	116°21′	27°9′	888.00
YC-TG-03	宜春铜鼓	114°13′	28°31′	829.00	GZ-SC-02	赣州石城	116°35′	26°23′	790.00
YC-TG-04	宜春铜鼓	114°13′	28°31′	797.00	GZ-LN-01	赣州龙南	114°25′	24°32′	515.00
YC-GS-01	宜春宜丰	114°34′	28°33′	400.00	GZ-LN-02	赣州龙南	114°25′	24°32′	519.00
YC-GS-02	宜春宜丰	114°34′	28°33′	340.00	GZ-CY-01	赣州崇义	114°0′	25°27′	848.00
YC-GS-03	宜春宜丰	114°31′	28°32′	498.00	GZ-CY-03	赣州崇义	114°0′	25°28′	793.00
YC-GS-04	宜春宜丰	114°36′	28°32′	579.00	JA-SC-01	吉安遂川	113°57′	26°10′	1 091.00
YC-GS-05	宜春宜丰	114°36′	28°32′	549.00	JA-SC-02	吉安遂川	113°57′	26°10′	1 049.00
NC-ND-01	江西南昌	115°49′	28°45′	35.00	JA-SC-03	吉安遂川	113°57′	26°10′	992.00
FZ-LA-01	抚州乐安	115°53′	26°59′	673.00	JA-SC-04	吉安遂川	113°59′	26°11′	855.00
FZ-LA-02	抚州乐安	115°53′	26°59′	685.00	JA-AF-01	吉安安福	114°17′	27°33′	520.00
SR-DX-01	上饶德兴	117°59′	29°11′	141.00	JJ-RC-01	九江瑞昌	115°12′	29°32′	438.00
SR-DX-02	上饶德兴	117°59′	29°11′	149.00	JJ-RC-03	九江瑞昌	115°25′	29°36′	535.00
SR-WY-01	上饶婺源	117°47′	29°30′	319.00	JJ-RC-04	九江瑞昌	115°25′	29°36′	554.00
SR-WY-02	上饶婺源	117°47′	29°30′	316.00					

1.2 数据采集

选取球果形状、假种皮颜色、开口形状及开口先端翘起情况和种子外露情况 5 个球果描述性状,球果和种子的长度、宽度和长宽比及球果百粒质量、种子千粒质量和假种皮颜色 9 个数量性状来分析南方红豆杉球果的表型多样性^[16]。描述性状采用目测观察法,等级划分如表 2。

表 2 5 个描述性性状的赋值情况
Tab.2 Valuation information of 5 descriptive characters

性状 Character	赋值 Valuation
球果形状 Cone shape	1.长球形;2.圆球形;3.椭球形;4.扁球形
球果颜色 Cone color	1.红色;2.黄色;3.橙黄色;4.橙色
开口先端翘起 Open tip tilted	1.是;2.否
开口形状 Opening shape	1.多边形;2.三角形;3.椭圆形
种子外露 Seed exposed	1.否;2.是

数量性状测量:每株南方红豆杉随机抽取30粒球果,用精度为0.01 mm的电子游标卡尺测定球果的长度、球果的宽度;之后将球果用刀片切开,将种子和假种皮分离,用游标卡尺测量其假种皮厚度;球果去假种皮后,测量种子长度、种子宽度,3次重复取平均值;之后,每株树随机抽取100粒球果,用精度为0.01 g的电子天平测量球果百粒质量,5次重复取平均值;最后,球果去假种皮,用吸水纸吸净表面水分,再用精度为0.01 g的电子天平测量种子的千粒质量,5次重复取平均值。

1.3 数据处理与分析

采用Excel 2016进行数据整理,计算平均值、标准差、变异系数、分布频率和Shannon-weaver(H')多样性指数^[17];利用SPSS 22.0软件对各表型数据进行聚类分析、主成分分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 南方红豆杉球果表型性状分析

2.1.1 描述性状分析 由表3可知,37份江西南方红豆杉球果的5个描述性状均有不同程度的变异(图1),多样性指数在0.494~1.876,其中球果形状和开口形状多样性指数较大。球果形状有4种表型,以长球形和椭球形为主,共有26份,两者所占频率相同,都为0.351;圆球形和扁球形分布较少。球果颜色4种,以红色为主,橙黄色次之,黄色、橙色最少。开口先端有翘起和不翘起2种表型,以不翘起为主,频率为0.676。种子以不外露的为主,33份,频率为0.892。开口形状3类,以开口为椭圆形为主,频率为0.595。

表3 南方红豆杉描述性状的频率分布及多样性指数

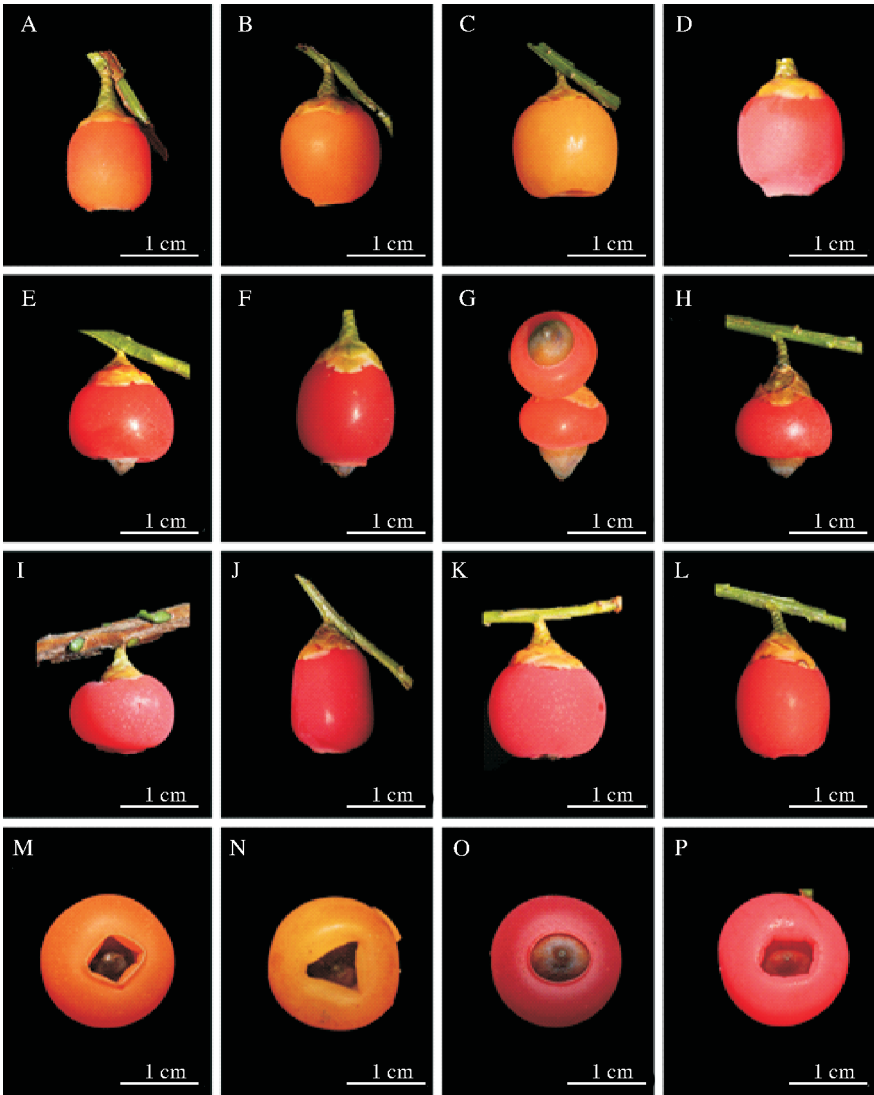
Tab.3 Frequency distribution and diversity index of descriptive traits in *Taxus wallichiana* var. *mairei*

性状 Character	表型级别 Phenotype level				多样性指数 Shannon-Weaver
	1	2	3	4	
球果形状 Cone shape	0.351	0.135	0.351	0.162	1.876
球果颜色 Cone color	0.864	0.027	0.081	0.027	0.757
开口先端翘起 Open tip tilted	0.324	0.676	0.000	0.000	0.909
开口形状 Opening shape	0.243	0.162	0.595	0.000	1.368
种子外露 Seed exposed	0.892	0.108	0.000	0.000	0.494

2.1.2 数量性状分析 从表4可以看出,不同种源南方红豆杉的球果百粒质量之间有较大的差异。球果百粒质量反映的是球果的大小:百粒质量在80.0~102.0 g的有7份,占总数的20%;在60.0~80.0 g的有13份,占总数的35%;60.0 g以下的有17份,所占比例为45%;球果最小的为YC-WZ-03,百粒质量仅为38.95 g。由此可将其划分为3类:(1)小果型,百粒质量在60.0 g以下,如YC-WZ-02、YC-WZ-03、YC-TG-03;(2)中果型,百粒质量在60.0~80.0 g,如YC-TG-02、YC-TG-04、YC-GS-05;(3)大果型,百粒质量在80.0 g以上,如JA-SC-03、JA-SC-04、GZ-CY-03等。球果的长宽比反映的是球果的形状:球果长宽比在0.8以下的仅有5份,如YC-TG-03、GZ-LN-01、GZ-LN-02;大多集中在0.8以上,如YC-WZ-01、YC-WZ-02、YC-TG-01,这说明球果形状以圆球形和椭球形为主,扁球形的较少。假种皮厚度则与南方红豆杉的可食率息息相关:假种皮厚度在3 mm以上的有8份,如JA-SC-03、JA-SC-04、JA-AF-01等,假种皮较厚,可食率较高,可以拿来鲜食或制成蜜饯。

从表5可知,南方红豆杉球果的表型性状变异系数为7.49%~26.55%,变异程度由高到低依次为球果百粒质量、假种皮厚度、种子千粒质量、球果长、球果长宽比、种子长宽比、球果宽、种子宽和种子长。球果百粒质量最大值为102.04 g,最小为38.95 g,变异系数为26.55%,说明不同种源间南方红豆杉球果大

小差异较大。球果长、球果宽、球果百粒质量的变异系数大于种长、种宽、种子千粒质量的变异系数,说明南方红豆杉的假种皮变异程度是普遍大于种子的,可能具有重要的适应性意义。



A: YC-WZ-03, 球果橙黄色;B: SR-DX-02, 球果橙色;C: FZ-LA-02, 球果黄色;D: YC-WZ-01, 球果红色,先端翘起;E-H: YC-TG-03, YC-TG-04, YC-TG-03, YC-GS-03, 种子均外露;I: GZ-LN-01, 球果扁球形;J: SR-YS-01, 球果长球形;K: GZ-CY-03, 球果圆球形;L: YC-GS-01, 球果椭球形;M和P: SR-DX-02, JA-SC-03, 开口多边形;N: FZ-LA-01, 开口三角形;O: YC-TG-04, 开口椭圆形。

A: YC-WZ-03, orange yellow; B: SR-DX-02, orange; C: FZ-LA-02, yellow; D: YC-WZ-01, red, apex raised; E-H: YC-TG-03, YC-TG-04, YC-TG-03, YC-GS-03, Seed exposed; I: GZ-LN-01, oblate spheroid; J: SR-YS-01, prolate; K: GZ-CY-03, round spherical; L: YC-GS-01, ellipsoid spherical; M & P: SR-DX-02, JA-SC-03, opening polygon; N: FZ-LA-01, opening triangle; O: YC-TG-04, open oval.

图 1 南方红豆杉球果形态多样性
Fig.1 Cones diversity of *Taxus wallichiana* var. *mairei*

2.2 南方红豆杉球果表型相关性分析

从表 6 可知,南方红豆杉球果 9 个数量性状之间存在着不同的相关性。球果长和球果宽、球果百粒质量、球果长宽比都存在极显著的正相关性,种子长和种子宽之间相关性不显著,种子千粒质量与种子长种子宽呈显著的正相关,种子长宽比和球果长宽比之间存在着显著的正相关。假种皮厚与球果长、球果宽、球果百粒质量存在着极显著正相关。这种性状之间的相关性显示了植物在生长过程中性状之间的协调性。

表 4 南方红豆杉球果性状指标
Tab.4 Cone traits of *Taxus wallichiana* var. *mairei*

编号 Number	球果长/mm Cone length	球果宽/ mm Cone width	种子长/ mm Seed length	种子宽/ mm Seed width	球果百粒 质量/g 100-seed weight of cone	种子千粒 质量/g 1 000-grain weight of seed	球果 长宽比 Cone aspect ratio	种子 长宽比 Seed aspect ratio	假种皮 厚度/mm Aril thickness
YC-WZ-01	10.49	9.98	6.49	6.35	67.19	115.76	1.06	1.02	1.82
YC-WZ-02	8.50	7.99	5.80	5.35	41.30	63.52	1.06	1.08	1.32
YC-WZ-03	8.37	7.94	6.55	4.87	38.95	65.36	1.06	1.35	1.54
YC-TG-01	8.88	9.47	6.94	5.64	50.73	87.44	0.94	1.23	1.92
YC-TG-02	8.84	9.82	6.04	5.50	68.94	72.88	0.90	1.10	2.16
YC-TG-03	7.01	9.27	7.43	5.79	47.74	90.60	0.76	1.29	1.74
YC-TG-04	9.72	8.87	7.19	4.67	62.94	67.80	1.10	1.54	2.10
YC-GS-01	9.48	8.93	6.86	5.00	55.98	71.88	1.07	1.38	1.97
YC-GS-02	9.26	9.84	7.25	6.19	54.93	98.44	0.94	1.17	1.83
YC-GS-03	8.36	9.28	7.31	6.09	49.71	86.40	0.90	1.20	1.60
YC-GS-04	9.38	9.38	6.69	4.87	49.57	79.28	1.00	1.38	2.26
YC-GS-05	9.07	9.59	7.02	5.57	65.63	96.32	0.95	1.26	2.01
NC-ND-01	10.21	9.54	6.89	5.42	65.56	85.32	1.07	1.27	2.06
FZ-LA-01	11.55	11.69	5.69	5.61	94.48	72.20	0.99	1.01	3.04
FZ-LA-02	11.04	11.08	5.57	4.93	76.84	57.20	1.00	1.13	3.08
SR-DX-01	9.51	10.24	6.31	5.74	60.65	93.40	0.93	1.10	2.25
SR-DX-02	11.40	10.61	6.93	4.84	84.84	77.44	1.08	1.43	2.89
SR-WY-01	9.30	10.53	6.47	5.12	67.85	72.12	0.88	1.27	2.71
SR-WY-02	10.97	9.89	7.52	4.97	66.81	81.96	1.11	1.51	2.46
SR-YS-01	10.95	9.26	6.35	5.12	54.04	70.80	1.18	1.24	2.07
SR-YS-02	10.67	10.84	7.11	4.82	68.95	66.28	0.99	1.48	3.01
SR-GF-01	9.18	9.01	6.82	4.80	49.27	66.48	1.02	1.42	2.11
SR-GF-02	7.99	9.01	6.83	5.15	41.74	72.88	0.89	1.33	1.93
FZ-NF-01	9.95	9.94	6.43	5.42	69.26	76.04	1.00	1.19	2.26
GZ-SC-02	9.10	10.10	7.28	5.75	61.41	97.24	0.90	1.27	2.18
GZ-LN-01	7.81	9.83	6.48	5.21	48.31	69.76	0.79	1.25	2.31
GZ-LN-02	7.03	9.75	6.43	5.68	45.22	78.84	0.72	1.13	2.04
GZ-CY-01	10.17	11.55	7.32	5.21	87.07	71.12	0.88	1.41	3.17
GZ-CY-03	11.24	12.01	6.14	5.32	92.82	68.96	0.94	1.15	3.35
JA-SC-01	8.54	9.22	6.23	4.48	43.16	55.04	0.93	1.39	2.37
JA-SC-02	9.35	9.60	7.05	5.18	51.72	79.32	0.97	1.36	2.21
JA-SC-03	11.89	11.41	7.34	5.37	102.04	98.36	1.04	1.37	3.02
JA-SC-04	9.91	11.96	6.77	5.10	94.86	90.36	0.83	1.33	3.43
JA-AF-01	9.10	11.93	6.02	5.56	82.44	84.12	0.76	1.08	3.19
JJ-RC-01	7.62	10.24	6.52	5.54	60.50	84.96	0.74	1.18	2.35
JJ-RC-03	10.62	9.31	6.21	4.76	54.65	62.88	1.14	1.31	2.28
JJ-RC-04	10.94	8.82	6.82	4.95	45.51	72.28	1.24	1.38	1.94

表 5 南方红豆杉球果数量性状多样性分析
Tab.5 Diversity analysis of quantitative traits of *Taxus wallichiana* var. *mairei* cone

性状 Character	平均值 Mean	最大值 Max	最小值 Min	极差 Ri	标准差 SD	变异系数/% CV
球果长/mm Cone length	9.55	11.89	7.01	4.88	1.24	13.02
球果宽/mm Cone width	9.94	12.01	7.94	4.07	1.03	10.39
种子长/mm Seed length	6.68	7.52	5.57	1.95	0.50	7.49
种子宽/mm Seed width	5.30	6.35	4.48	1.88	0.43	8.12
球果百粒质量/g 100-seed weight of cone	62.80	102.04	38.95	63.09	16.68	26.55
种子千粒质量/g 1 000-grain weight of seed	78.41	115.76	55.04	60.72	12.95	16.51
球果长宽比 Cone aspect ratio	0.97	1.24	0.72	0.52	0.12	12.56
种子长宽比 Seed aspect ratio	1.27	1.54	1.01	0.53	0.13	10.57
假种皮厚度/mm Arl thickness	2.32	3.43	1.32	1.11	0.53	22.90

2.3 南方红豆杉球果表型数量性状主成分分析

主成分分析结果(表 7)表明:前 4 个主成分的累计贡献率达 97.494%,说明前 4 个主成分可基本反映南方红豆杉球果表型的大部分信息。第 1 主成分的贡献率为 35.85%,其中,球果宽、球果长、球果百粒质量、假种皮厚度特征向量的绝对值均大于 0.6,说明该主成分主要反映球果的大小。第 2 主成分的贡献率为 29.216%,其中,种子宽、种子长宽比的特征向量的绝对值较大,均在 0.7 以上,说明该主成分主要反映的是种子的宽度。第 3 主成分贡献率为 18.503%,其中种子千粒质量、种子长特征向量绝对值较大,均在 0.6 以上,说明该成分主要反映种子的质量。第 4 主成分的贡献率为 13.925%,其中球果长宽比特征向量绝对值最大,说明该主成分反映的是球果的形状。

根据特征向量矩阵及标准化的 9 个表型性状值,代入上述 4 各主成分中,由此可以得到 4 个主成分得分公式,公式如下:

$$\begin{aligned} F1 &= 0.38X_1 + 0.53X_2 - 0.11X_3 - 0.00X_4 + 0.53X_5 + 0.05X_6 - 0.04X_7 - 0.08X_8 + 0.52X_9 \\ F2 &= 0.29X_1 - 0.13X_2 + 0.04X_3 - 0.57X_4 - 0.02X_5 - 0.42X_6 + 0.42X_7 + 0.46X_8 + 0.10X_9 \\ F3 &= 0.14X_1 - 0.02X_2 + 0.72X_3 - 0.16X_4 + 0.11X_5 + 0.49X_6 + 0.12X_7 + 0.40X_8 - 0.05X_9 \\ F4 &= 0.47X_1 - 0.17X_2 - 0.22X_3 + 0.26X_4 + 0.04X_5 + 0.21X_6 + 0.63X_7 - 0.48X_8 - 0.27X_9 \end{aligned}$$

将 9 个数量性状数值进行标准化处理,代入公式,得到 $F1$ 、 $F2$ 、 $F3$ 和 $F4$ 。根据 $F1$ 、 $F2$ 、 $F3$ 和 $F4$ 数值以及各主成分的贡献率,计算出每个球果表型的综合得分,综合得分公式为 $F = 0.358 5F_1 + 0.292 16F_2 + 0.185 03F_3 + 0.139 25F_4$ 。基于 F 值对 37 个球果表型数量性状进行综合评价(表 8), F 值越大,表型综合性越好。综合得分第 1 的是 JA-SC-03,球果百粒质量最大,假种皮厚,具有良好的食用价值和观赏价值。第 2 为 SR-DX-02,假种皮橙色,球果较大,观赏价值极高。综合得分最低的是 GZ-LN-02,表现最差。其余得分情况见表 8。

表 6 南方红豆杉球果表型相关性分析
Tab.6 Correlation of traits among the cone phenotypes of *Taxus wallichiana* var. *mairei*

性状 Character	球果长/ mm Cone length	球果宽/ mm Cone width	种子长/ mm Seed length	种子宽/ mm Seed width	球果 百粒质量/g 100-seed weight of cone	种子 千粒质量/g 1 000-grain weight of seed	球果 长宽比 Cone aspect ratio	种子 长宽比 Seed aspectx ratio	假种皮 厚度/mm Thick aril
球果长/mm Cone length	1								
球果宽/mm Cone width	0.456**	1							
种子长/mm Seed length	-0.062	-0.133	1						
种子宽/mm Seed width	-0.238	0.150	0.085	1					
球果百粒质量/g 100-seed weight of cone	0.661**	0.890**	-0.068	0.063	1				
种子千粒质量/g 1 000-grain weight of seed	-0.035	0.190	0.433**	0.769**	0.197	1			
球果长宽比 Cone aspect ratio	0.666**	-0.355*	0.027	-0.393*	-0.049	-0.209	1		
种子长宽比 Seed aspect ratio	0.141	-0.219	0.649**	-0.699**	-0.103	-0.267	0.331*	1	
假种皮厚度/mm Aril thickness	0.542**	0.916**	-0.164	-0.258	0.844**	-0.125	-0.188	0.069	1

*表示在 0.05 水平上显著,**表示在 0.01 水平上显著。
* significant at 0.05 level,** significant at 0.01 level.

表 7 南方红豆杉球果表型主成分分析
Tab.7 Principal component analysis of the fruit phenotype of *Taxus wallichiana* var. *mairei*

性状 Character	主成分 Principal component			
	PC1	PC2	PC3	PC4
球果长/mm Cone length	0.678	0.468	0.175	0.528
球果宽/mm Cone width	0.951	-0.217	0.021	-0.190
种子长/mm Seed length	-0.201	0.068	0.933	-0.245
种子宽/mm Seed width	-0.008	-0.918	0.201	0.287
球果百粒质量/g 100-seed weight of cone	0.957	-0.035	0.145	0.041
种子千粒质量/g 1 000-grain weight of seed	0.086	-0.678	0.637	0.235
球果长宽比 Cone aspect ratio	-0.08	0.683	0.149	0.709
种子长宽比 Seed aspect ratio	-0.144	0.750	0.519	-0.380
假种皮厚度/mm Aril thickness	0.933	0.159	-0.061	-0.302
特征值 Eigenvalue	3.227	2.629	1.665	1.253
贡献率/% Contribution rate	35.850	29.216	18.503	13.925
累计贡献率/% Cumulative contribution rate	35.85	65.066	83.569	97.494

表 8 南方红豆杉球果表型性状综合评价
Tab.8 Comprehensive score of cone phenotypic in *Taxus wallichiana* var. *mairei*

编号 Number	综合得分 Score	排名 Rank	编号 Number	综合得分 Score	排名 Rank	单株编号 Number	综合得分 Score	排名 Rank
JA-SC-03	1.80	1	NC-ND-01	0.26	14	YC-GS-02	-0.58	27
SR-DX-02	1.49	2	FZ-NF-01	0.07	15	YC-TG-02	-0.60	28
SR-WY-02	1.13	3	SR-WY-01	0.04	16	YC-TG-01	-0.62	29
GZ-CY-03	1.11	4	YC-GS-01	0.03	17	YC-WZ-03	-0.78	30
SR-YS-02	1.09	5	YC-GS-04	-0.03	18	SR-GF-02	-0.92	31
GZ-CY-01	1.01	6	JA-AF-01	-0.05	19	GZ-LN-01	-0.98	32
JA-SC-04	0.98	7	SR-GF-01	-0.08	20	JJ-RC-01	-1.02	33
FZ-LA-01	0.90	8	JA-SC-02	-0.09	21	YC-GS-03	-1.04	34
FZ-LA-02	0.75	9	YC-WZ-01	-0.17	22	YC-WZ-02	-1.27	35
JJ-RC-04	0.55	10	YC-GS-05	-0.26	23	YC-TG-03	-1.42	36
YC-TG-04	0.54	11	GZ-SC-02	-0.27	24	GZ-LN-02	-1.65	37
JJ-RC-03	0.45	12	SR-DX-01	-0.39	25			
SR-YS-01	0.40	13	JA-SC-01	-0.42	26			

2.4 南方红豆杉球果表型聚类分析

从图 2 可知,以欧氏距离 10 为阈值,37 份南方红豆杉球果被分为 4 类:A 类,包含 YC-WZ-01、YC-GS-03、YC-TG-03 等 11 份,种子的表现较好,主要反映的是种子的优良性状;B 类,包含 YC-WZ-02、YC-WZ-03、JA-SC-01 等 13 份,表现均为中等;C 类,包含 YC-TG-02、SR-WY-01、FZ-NF-01 等 6 份,假种皮较厚,可食率较高。D 类,包括 JA-SC-04、FZ-LA-01、GZ-CY-03 等 7 份,球果表现较其他 3 组较好,球果性状优良。并且,37 个南方红豆杉球果并没有按照地理上的分布聚集在一起,其球果表型在地理上没有特异性。

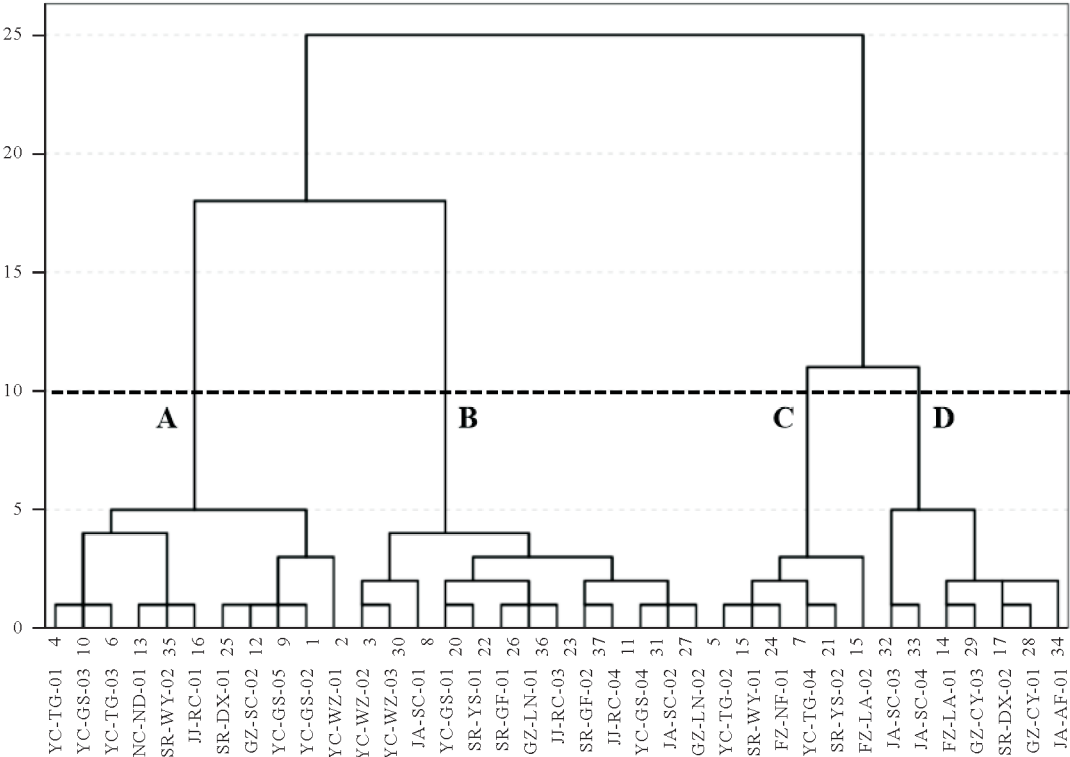


图 2 南方红豆杉球果表型聚类分析

Fig.2 Cluster analysis of cone traits in *Taxus wallichiana* var. *mairei*

3 结论与讨论

本研究以37份南方红豆杉球果为材料,对其球果表型的5个质量性状、8个数量性状进行了分析,其中5个质量性状的多样性指数在0.494~1.876,8个数量性状的变异系数在7.49%~26.55%。据前人研究^[17]结果表明多样性指数大于1.0,则此性状多样性较高;而变异系数大于10%,则变异程度较为丰富。南方红豆杉开口形状和球果形状的多样性指数均大于1.0;除种子长、种子宽之外,其余数量性状的变异系数均大于10%,这说明南方红豆杉表型变异比较丰富。南方红豆杉的植被区跨越了亚热带常绿阔叶林和暖温带针叶林,分布范围较广,可生长于山坡、湿地、林缘等多种生境之中,其较强的适应性为球果多样性提供了基础。种子成熟后,假种皮变红色且味甘甜,常常吸引鸟类和小型哺乳动物取食^[18],因此其种子常会随着动物以及鸟类的迁徙散落在不同的空间中,由于环境和其自身遗传作用下可能会导致其发生一定的变异,这可能也是南方红豆杉球果多样性形成的原因之一,具体的作用机制则需要进一步研究。

南方红豆杉球果是鸟类越冬的重要食材,其大小、颜色和形状可能与鸟类演化密切相关。已有研究表明,不同体型的鸟类对南方红豆杉球果取食方式是不同的,体型较大的鸟类,喙大,如红嘴蓝鹊(*Urocissa erythrorhyncha*)、绿翅短脚鸭(*Hypsipetes mcclllandii*)、灰树雀(*Dendrocitta formosae*)等采取的是整吞的方式,之后通过粪便排出传播其种。而体型较小的鸟类,喙亦小些,如红胁蓝尾鸲(*Tarsiger cyanurus*)、棕脸鹟莺(*Seicercus albogularis*)和灰眶雀鹛(*Alcippe morrisonia*)等则采取啄食的方式,即直接在空中悬停啄食假种皮或将果实衔至附近再撕食假种皮^[18-20]。因此推断,南方红豆杉球果大小、形状与鸟类喙的演化可能存在较为密切的关系,其协同演化式样有待进一步验证。

南方红豆杉球果是一种具有巨大潜在开发价值的新型果实。目前,人们对南方红豆杉的认识和研究主要还是在于树皮中紫杉醇的药用开发或作为常绿乔木的园林绿化利用,而对其假种皮资源尚没有得到足够的重视和有效的开发。南方红豆杉假种皮中可溶性糖、蛋白质、脂肪、粗纤维、VC含量、人体生长发育所必需的8种氨基酸,均高于许多果蔬。而且,不管是野外调查取食,还是鸟类摄食事实,以及食品级毒性研究^[3],均表明南方红豆杉假种皮无急性毒性,是安全的果实食品。因此,水果级品种选育,球果大、种子小、肉质多、味甘美的果用型南方红豆杉选育,将是今后南方红豆杉良种选育、苗木繁殖和定向培育的重点方向之一。本研究发现,JA-SC-03、SR-DX-02、GZ-CY-03、FZ-LA-01和SR-WY-02等具备部分上述优良特质,蕴藏着较大的开发潜力,可作为第二代品种选育的母本,建议加大引种驯化,扩大栽培规模。

南方红豆杉是价值较高的园林树种。目前,人们对其园林开发价值的关注和研究主要在于树形和枝叶方面。例如,欧建德等^[21]对来自江西、福建、贵州等地的35个南方红豆杉单株的枝干表型进行了筛选和综合评价,获得了一批具有较高园林开发价值的单株。而对其球果的观赏特性关注不够,对其相关品种选育更是空白。本文研究发现,南方红豆杉球果在大小、形状、颜色等方面都存在着丰富的变异,其中FZ-LA-01和SR-DX-02假种皮颜色特异,呈黄色系,JA-SC-03的果实大小显著不同于普通的南方红豆杉,是其观果品种选育的优良株系。因此,建议对南方红豆杉野生资源加大关注力度,并对其优良株系进行扦插和嫁接等无性繁殖试验。

总之,南方红豆杉球果表型多样性较为丰富,具有较高的园林景观价值和极具开发潜力的食用价值。本文首次针对南方红豆杉的球果进行了表型多样性分析和综合评价,获得了一批球果表型综合表现较好的优良株系,为其观果和食用品种选育提供了参考依据和理论基础。

参考文献 References:

[1] 包维楷. 中国的红豆杉资源及其开发研究现状与发展对策[J]. 自然资源学报, 1998, 13(4): 88-93.

BAO W K. Growth variation and present status, problems, and further development strategies on natural *Taxus* resource and their exploitation in China[J]. Journal of natural resources, 1998, 13(4): 88-93.

[2] 廖文波, 张志权, 苏志尧. 抗癌植物南方红豆杉保护生物学价值的评价[J]. 生态科学, 1996, 15(2): 19-22.

- LIAO W B, ZHANG Z Q, SU Z Y. Importance and exigency on study of protection biology of anticancer plant *Taxus chinensis* var. *mairei* [J]. Ecological science, 1996, 15(2): 19-22.
- [3] 刘世彪, 唐克华, 彭秀建, 等. 南方红豆杉种子的营养成分及假种皮的急性毒性分析[J]. 食品科学, 2012, 33(19): 298-301.
- LIU S B, TANG H, PENG X J, et al. Nutritional components of *Taxus chinensis* var. *mairei* seeds and acute toxicity of its aril [J]. Food science, 2012, 33(19): 298-301.
- [4] 叶冰, 华成坤, 梁淑妍, 等. 南方红豆杉不同部位紫杉烷类含量累积规律分析[J]. 陕西中医, 2020, 41(8): 1162-1164.
- YE B, HUA C K, LIANG S Y, et al. Accumulation of taxane content in different parts of *Taxus chinensis* var. *mairei* [J]. Shaanxi journal of traditional Chinese medicine, 2020, 41(8): 1162-1164.
- [5] 于少帅, 孙启武, 张小平, 等. 南方红豆杉人工引种及野生植株活性成分含量与分布[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2641-2647.
- YU S S, SUN Q W, ZHANG X P, et al. Artificial introduction of *Taxus chinensis* var. *mairei* and content and distribution of active ingredients in wild plants [J]. Chinese journal of applied ecology, 2012, 23(10): 2641-2647.
- [6] 杨星星, 王仁才, 张家银, 等. 南方红豆杉枝叶与球果中6种紫杉烷类化合物含量分析[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2016, 42(5): 549-553.
- YANG X X, WANG R C, ZHANG J Y, et al. Content analysis on 6 kinds of taxanes in branches, leaves and fruits of *Taxus chinensis* var. *mairei* [J]. Journal of Hunan agricultural university (natural science edition), 2016, 42(5): 549-553.
- [7] 林秀凤, 王友生, 简丽华, 等. 果用型南方红豆杉嫁接技术[J]. 广西林业科学, 2021, 50(1): 35-38.
- LING X F, WANG Y S, JIAN L H, et al. Grafting technique of fruit cultivars *Taxus wallichiana* var. *mairei* [J]. Guangxi forestry science, 2021, 50(1): 35-38.
- [8] 刘长林, 方益柱, 陈彬, 等. 南方红豆杉种子繁育方法[J]. 特种经济动植物, 2010, 13(2): 36.
- LIU C L, FANG Y Z, CHENG B, et al. Seed propagation method of *Taxus chinensis* var. *mairei* [J]. Special economic animals and plants, 2010, 13(2): 36.
- [9] 朱念德, 刘蔚秋, 伍建军, 等. 影响南方红豆杉种子萌发因素的研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1999, 38(2): 76-80.
- ZHU N D, LIU W Q, WU J J, et al. Research on the factors affecting the seed germination of *Taxus chinensis* var. *mairei* [J]. Journal of Sun Yat-sen university (natural science edition), 1999, 38(2): 76-80.
- [10] 王敏求, 武星彤, 王利宝, 等. 南方红豆杉群体基因流比较分析[J]. 分子植物育种, 2019, 17(19): 6269-6275.
- WANG M Q, WU X T, WANG L B, et al. Comparison of gene flow for *Taxus chinensis* var. *mairei* [J]. Molecular plant breeding, 2019, 17(19): 6269-6275.
- [11] 王霞, 铁军, 李燕芬, 等. 山西陵川南方红豆杉群落优势种种间关联性分析[J]. 生态学杂志, 2016, 35(10): 2575-2582.
- WANG X, TIE J, LI Y F, et al. Interspecific association of dominant species in *Taxus chinensis* var. *mairei* community of Lingchuan in Shanxi [J]. Chinese journal of ecology, 2016, 35(10): 2575-2582.
- [12] 高润梅, 石晓东, 樊兰英, 等. 山西省南方红豆杉自然分布与群落生态学特征[J]. 应用生态学报, 2016, 27(6): 1820-1828.
- GAO R M, SHI X D, FAN L Y, et al. Natural distribution and community ecological characteristics of *Taxus chinensis* var. *mairei* in Shanxi Province, China [J]. Chinese journal of applied ecology, 2016, 27(6): 1820-1828.
- [13] 肖遥, 张蕊, 楚秀丽, 等. 24个产地南方红豆杉在两试验点的生长差异及其选择[J]. 林业科学研究, 2017, 30(2): 342-348.
- XIAO Y, ZHANG R, CHU X L, et al. Growth variation and selection of *Taxus wallichiana* var. *mairei* from 24 locations in two trial plots [J]. Forestry science research, 2017, 30(2): 342-348.
- [14] 罗芊芊, 周志春, 邓宗付, 等. 南方红豆杉天然居群叶片的表型性状和氮磷化学计量特征的变异规律[J]. 植物资源与环境学报, 2021, 30(1): 27-35.
- LUO Q Q, ZHOU Z C, DENG Z F, et al. Variation law of phenotypic traits and nitrogen and phosphorus stoichiometric char-

- acteristics of leaf of natural populations of *Taxus wallichiana* var. *mairei* [J]. Journal of plant resources and environment, 2021, 30(1): 27-35.
- [15] 欧建德, 罗宁, 吴志庄. 幼龄期南方红豆杉生长和形质性状的优树家系遗传变异[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(2): 117-122.
- OU J D, LUO N, WU Z Z. Variation of the family genetics of the plus trees *Taxus wallichiana* var. *mairei* at young stage [J]. Journal of Northwest forestry university, 2017, 32(2): 117-122.
- [16] 王德源, 朱亚艳, 戴晓勇, 等. 余甘子天然居群球果的表型多样性分析及综合评价[J]. 贵州农业科学, 2020, 48(4): 20-26.
- WANG D Y, ZHU Y Y, DAI X Y, et al. Fruit phenotypic diversity analysis and comprehensive evaluation of *Phyllanthus emblicain* natural population [J]. Guizhou agricultural sciences, 2020, 48(4): 20-26.
- [17] 尹世华, 王康, 黄晓霞, 等. 47 份月季品种表型多样性分析及综合评价[J]. 江西农业大学学报, 2021, 43(1): 94-105.
- YIN S H, WANG K, HUANG X X, et al. Phenotypic diversity analysis and comprehensive evaluation of 47 rose resources [J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2021, 43(1): 94-105.
- [18] 邓青珊, 陈思静, 鲁长虎. 鸟类对南方红豆杉种子的取食与搬运[J]. 林业科学, 2010, 46(2): 157-161.
- DENG Q S, CHENG S J, LU C H. Foraging and transporting of Chinese Yew seed by frugivorous birds [J]. Forestry science, 2010, 46(2): 157-161.
- [19] 邓青珊, 朱琼琼, 鲁长虎. 南方红豆杉的天然更新格局及食果鸟类对其种子的传播[J]. 生态学杂志, 2008, 27(5): 712-717.
- DENG Q S, ZHU Q Q, LU C H. Natural regeneration of *Taxus chinensis* var. *mairei* and its seed dispersal by frugivorous birds [J]. Journal of ecology, 2008, 27(5): 712-717.
- [20] 鲁长虎, 常家传. 食肉质果鸟对种子的传播作用[J]. 生态学杂志, 1998, 17(1): 62-65.
- LU C H, CHANG J C. The effect of carnivorous fruit birds on seed dispersal [J]. Chinese journal of ecology, 1998, 17(1): 62-65.
- [21] 欧建德, 吴志庄. 景观型南方红豆杉家系和单株选择[J]. 浙江农林大学学报, 2016, 33(1): 102-108.
- OU J D, WU Z Z. Excellent families and plus trees of *Taxus wallichiana* var. *mairei* for landscaping [J]. Journal of Zhejiang agriculture and forestry university, 2016, 33(1): 102-108