

基金课题

国家自然科学基金 (31560214、30872046)

云南财政专项资金 (RF2014-18、RF2015-4-4)

特殊油料树种琴叶风吹楠 遗传多样性及分类学位置

**Taxonomical Position and Population Genetic Diversity
of Peculiar Oil Tree *Horsfieldia pandurifolia* Hu**

吴 裕 段安安 等著

中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

特殊油料树种琴叶风吹楠遗传多样性及分类学位置 / 吴裕等著 . —北京 : 中国农业科学技术出版社, 2019.12

ISBN 978-7-5116-4469-5

I . ①特… II . ①吴… III . ①肉豆蔻科—遗传多样性—研究②肉豆蔻科—植物分类学—研究 IV . ① Q949.747.403 ② Q949.747.409

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 234153 号

责任编辑 张国锋

责任校对 马广洋

出版者 中国农业科学技术出版社

北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081

电 话 (010) 82106636 (编辑室) (010) 82109704 (发行部)

(010) 82109702 (读者服务部)

传 真 (010) 82106631

网 址 <http://www.castp.cn>

经 销 者 各地新华书店

印 刷 者 北京东方宝隆印刷有限公司

开 本 710 毫米 × 1 000 毫米 1/16

印 张 13.5

字 数 260 千字

版 次 2019 年 12 月第 1 版 2019 年 12 月第 1 次印刷

定 价 88.00 元

特殊油料树种琴叶风吹楠遗传多样性及分类学位置

主要著者名单

吴 裕 段安安 毛常丽 张凤良
李小琴 许玉兰 倪书邦

著者研究任务分工

1. 总体策划..... 吴 裕 段安安
2. 资源调查..... 吴 裕 张凤良 胡永华 郭贤明 赵金超 张长寿 曾建生 田耀华
3. 形态变异分析..... 张凤良 吴 裕 倪书邦 李小琴
4. 油脂成分变异分析..... 许玉兰 吴 裕 段安安 蔡年辉
5. 光合生理测定..... 张凤良 李小琴 杨 涵 赵 祺
6. 分子遗传分析..... 毛常丽 柳 觲
7. 繁殖试验..... 张凤良 杨晓玲 毛常丽
8. 分类学研究..... 吴 裕 毛常丽 张凤良

内容简介

肉豆蔻科 (Myristicaceae) 是典型热带分布科，其中琴叶风吹楠 (*Horsfieldia pandurifolia* Hu) 是我国不可多得的特种油料资源植物，在云南西南部沟谷雨林有野生分布，种群数量少。本书是作者 10 年研究的阶段性总结，主要从资源分布、群落特征、叶形变异、种形变异、油脂成分变异、种子萌发习性、光合生理、遗传多样性等几个方面加以研究。在认识种内变异式样的基础上，根据中国野生分布的风吹楠属 (*Horsfieldia*)、肉豆蔻属 (*Myristica*)、红光树属 (*Knema*) 的特征，结合形态分类学、化学分类学和分子系统学的研究数据进行分类学位置处理。

本书可供生物学、生态学、林学、农学、植物分类学、植物资源学等专业的师生和科研工作者及相关专业人员参考。

前言

PREFACE

种内遗传多样性研究的对象是种内遗传变异，其前提是已经确定了种的界线；另外，由于种内变异连续性的认识不足容易将种内变异的极端类型分成不同的种。所以“种内遗传变异和种间界线”貌似“蛋生鸡，鸡生蛋”的关系。

肉豆蔻科（Myristicaceae）是典型的热带分布科，其分布区北缘位于我国海南、广西壮族自治区（全书简称广西）、云南、西藏自治区（全书简称西藏）热带雨林至山地雨林。我国植物学家胡先骕先生于1963年命名发表“琴叶贺得木（*Horsfieldia pandurifolia*）”，在1979年出版的《中国植物志》中更名为“琴叶风吹楠（*H. pandurifolia*）”，此后的国内著作都沿用此名，并记为云南特有。de Wilde于1984年以琴叶风吹楠为模式种发表了*Endocomia*属，可是国内学者又不认同。总之，琴叶风吹楠的分类学位置争论不休。

琴叶风吹楠是云南野生树种，主要分布在云南雨林地段，是我国不可多得的特种油料资源植物，其种子油是制防冷凝剂的重要原料。20世纪70—80年代，前辈们对其种子油脂进行了分析，发现种子含油率高，且脂肪酸成分主要是14碳酸，是重要的工业原料，以种子油为原料合成的聚甲基丙烯酸十四醇酯添加0.5%对-20℃的10#机械油降凝为-42℃，聚甲基丙烯酸C₁₂₋₁₄酯添加0.5%对-25℃的25#变压器油降凝为-50℃。近年来，以肉豆蔻酸为原料合成的肉豆蔻酸酯（MOD）成了新型化妆品的基质原料，无刺激，无异味，化学性质稳定。以肉豆蔻酸和异丙

醇为原料合成的肉豆蔻酸异丙酯（IPM），是一种长链的羧酸酯类化合物，具有低黏度、对皮肤无刺激、互溶性好等优点，因而广泛用于美容化妆、医疗卫生、香料、纺织等方面。

琴叶风吹楠由于自身的特点，只分布在低海拔湿热的沟谷和洼地，在云南的资源量本来就少，又由于种种原因，导致资源量正在不断减少，已作为濒危植物被列入2004年出版的《中国物种红色名录》。因此，研究琴叶风吹楠的种内遗传多样性及其分类学位置可为资源保护利用和学术交流提供理论基础。

在国家自然科学基金“特殊油料树种琴叶风吹楠分类学位置及遗传多样性研究（31560214）”和“高含油野生琴叶风吹楠地理变异及种质资源收集保存研究（30872046）”，以及云南省财政专项“云南省热带作物科技创新体系建设（RF2014-18, RF2015-4-4）”等项目的支持下，本课题组在云南省内开展了野生资源调查，果实和种子形态变异分析，种子油脂成分变异分析，群体遗传结构研究，繁殖试验，光合生理测定等工作，掌握了丰富的第一手资料。书中内容均为本课题组的研究成果，引用他人文献已标注，本课题组已发表的内容一般不标注；书中照片全部由本课题组拍摄，其中人物照片经照片中的当事人确认同意后使用。

本书是琴叶风吹楠研究的一个阶段性总结。本课题组在调查研究过程中发现：部分大树正在被砍伐为木材；分布区片段化，而且正在被农田蚕食；有些沟谷生态退化严重，种子不能自然萌发，失去种群发展的环境基础；文献有记录的部分分布区，本次调查未发现植株。导致物种濒危有其自身因素、环境因素和人为因素。即使物种的种群数量较少，只要能够保持世代繁衍、种群数量不减少，也不认为是濒危。鉴于琴叶风吹楠的现状，人为破坏是导致濒危的重要原因之一，所以通过本书的出版，希望能唤起当地居民的保护意识，同时也为保护和利用琴叶风吹楠提供一些理论基础。另外，为了扩大读者范围，本书在保证自然科学研究著作专业性和学术性的同时，尽可能做到通俗易懂，提高可读性。

在研究过程中，除了课题组成员的团结努力以外，还得到很多单位和个人的帮助（部分人员已列入“著者研究任务分工”名单）。其中，云南西双版纳国家级自然保护区管护局、云南南滚河国家级自然保护区管护局、云南西双版纳纳板河流域国家级自然保护区管护局、铜壁关自然保护区管理局给予资源调查工作的支持。西南林业大学杜凡教授、云南西双版纳国家级自然保护区管护局科研所郭贤明正高级工程师、西双版纳纳板河流域国家级自然保护区管护局普文才高级工程师和刘峰正高级工程师、云南南滚河国家级自然保护区管护局赵金超高级工程师和李春华工程师、中国林业科学研究院热带林业实验中心曾冀高级工程师和陈建全工程师、双江县邦丙乡原人大主席俸云同志、澜沧县人大秘书李春梅同志等协助野生资源调查；中国科学院昆明植物研究所余珍高级工程师，西南林业大学蔡年辉副教授和雷然实验师对油脂成分分析给予支持；硕士研究生张君鸿和张辉，本科生易小泉和张夸云等同学参与部分研究工作；特别是云南省热带作物科学研究所的领导和各位同事自始至终给予很多帮助；还有实际给予了帮助但未述及的人们。在此对所有支持和帮助过本项目研究的单位和个人表示最诚挚的感谢！

如前所述，本书错漏难免，敬请读者批评指正！

云南省热带作物科学研究所 吴 裕

西南林业大学 段安安

2019年7月23日

目录

CONTENTS

第1章 自然地理概况 / 1

1.1 地理位置	1
1.2 地形地貌	1
1.3 气候特征与植被类型	2
参考文献	4

第2章 琴叶风吹楠地理分布调查 / 5

2.1 引言	5
2.2 调查方法	6
2.3 琴叶风吹楠在云南的分布现状	6
2.4 琴叶风吹楠分布的群落类型	10
2.5 琴叶风吹楠地理分布问题的探讨	13
参考文献	15

第3章 琴叶风吹楠生物学特征 / 17

3.1 引言	17
3.2 琴叶风吹楠形态特征	17
3.3 琴叶风吹楠雌雄同株的证据	21
3.4 琴叶风吹楠种子萌发习性	22
3.5 琴叶风吹楠种子的多胚现象	24
3.6 小结	25
参考文献	25

第4章 琴叶风吹楠果实和种子群体变异式样 / 27

4.1 引言	27
4.2 研究方法	27
4.3 琴叶风吹楠果实形态特征变异	28
4.4 琴叶风吹楠种子形态特征变异	30
4.5 小结	34
参考文献	35

第5章 琴叶风吹楠种子脂肪酸成分群体变异式样 / 37

5.1 引言	37
5.2 研究方法	37
5.3 琴叶风吹楠种子种仁率与含油率的测定	39
5.4 琴叶风吹楠种子脂肪酸成分测定	41
5.5 琴叶风吹楠种子脂肪酸成分群体变异式样	44
5.6 小结	49
参考文献	49

第6章 琴叶风吹楠种子主要脂肪酸成分的消长规律 / 51

6.1 引言	51
6.2 研究方法	52
6.3 琴叶风吹楠不同成熟度种子脂肪酸成分的变化	52
6.4 琴叶风吹楠种子脂肪酸成分在不同年份间的变化	55
6.5 琴叶风吹楠干种子在贮藏过程中脂肪酸成分的变化	55
6.6 小结与讨论	58
参考文献	59

第7章 琴叶风吹楠群体遗传结构 / 61

7.1 引言	61
7.2 研究方法	61

7.3 琴叶风吹楠荧光 AFLP 扩增多态性	62
7.4 琴叶风吹楠居群遗传多样性	63
7.5 琴叶风吹楠群体遗传结构	64
7.6 琴叶风吹楠居群间遗传距离	65
7.7 琴叶风吹楠居群聚类分析	65
7.8 小结	66
参考文献	67

第 8 章 琴叶风吹楠繁殖试验 / 69

8.1 引言	69
8.2 研究方法	69
8.3 模拟野生环境下的种子萌发试验	70
8.4 沙床播种与土壤播种的比较	72
8.5 带果皮播种与去果皮播种的比较	73
8.6 不同植株种子的萌发能力比较	74
8.7 不同萌发阶段的幼苗移栽试验	75
8.8 无性繁殖初步试验	76
8.9 小结	77
参考文献	79

第 9 章 琴叶风吹楠苗木生长量性状群体变异 / 81

9.1 引言	81
9.2 研究方法	82
9.3 琴叶风吹楠苗木生长节律	83
9.4 琴叶风吹楠苗木生长量性状变异规律	85
9.5 琴叶风吹楠苗木生长量频率分布	88
9.6 琴叶风吹楠苗木生长量性状相关分析	92
9.7 小结	93
参考文献	94

第 10 章 琴叶风吹楠叶片性状群体变异 / 95

10.1 引言	95
10.2 研究方法	95
10.3 叶片性状家系间及家系内变异	97
10.4 叶片性状变异来源及分化系数	101
10.5 叶片性状相关性分析	102
10.6 小结	105
参考文献	106

第 11 章 琴叶风吹楠叶绿素含量测定 / 109

11.1 前言	109
11.2 研究方法	110
11.3 叶片主脉两侧的质地比较	111
11.4 不同提取液光谱比较	111
11.5 叶面积法与称重法测定结果比较	112
11.6 不同提取液提取叶绿素的结果比较	114
11.7 研磨和不研磨对提取效果的比较	114
11.8 小结	117
参考文献	118

第 12 章 风吹楠研究概述 / 121

12.1 引言	121
12.2 风吹楠资源调查	121
12.3 风吹楠生物学特征	125
12.4 风吹楠种子含油率及脂肪酸成分	127
12.5 风吹楠繁殖试验	131
12.6 风吹楠苗木生长节律	132
12.7 风吹楠叶形变异	133
12.8 小结	137

参考文献	138
------------	-----

第 13 章 大叶风吹楠研究概述 / 139

13.1 引言	139
13.2 大叶风吹楠资源调查	139
13.3 大叶风吹楠生物学特征	143
13.4 大叶风吹楠种子性状及油脂提取	145
13.5 大叶风吹楠种子油脂肪酸成分测定	147
13.6 大叶风吹楠播种繁殖观察	150
13.7 小结	151
参考文献	151

第 14 章 云南肉豆蔻研究概述 / 153

14.1 引言	153
14.2 资源调查	154
14.3 云南肉豆蔻生物学特征	154
14.4 种子表型变异	157
14.5 含油率测定	161
14.6 脂肪酸成分测定	162
14.7 小结	166
参考文献	166

第 15 章 红光树属研究概述 / 169

15.1 引言	169
15.2 红光树属分类学简介	169
15.3 红光树属野生分布调查	170
15.4 红光树属生物学特征	173
15.5 红光树属种子油脂成分测定	180
15.6 小结	181

参考文献	182
------------	-----

第 16 章 琴叶风吹楠分类学位置探讨 / 185

16.1 引言	185
16.2 研究材料	186
16.3 研究方法	187
16.4 形态学证据	188
16.5 油脂化学证据	190
16.6 分子遗传学证据	192
16.7 小结与讨论	194
参考文献	195

第 17 章 琴叶风吹楠致危因子与保护建议 / 197

17.1 引言	197
17.2 琴叶风吹楠种群更新状况	198
17.3 我国野生肉豆蔻科植物保护建议	198

第 18 章 有待研究的若干问题 / 201

第1章

自然地理概况

1.1 地理位置

云南地处中国西南部，北邻西藏、四川，东邻贵州、广西，南与越南、老挝接壤，西与缅甸毗邻，大致位于东经 $97^{\circ} 31' \sim 106^{\circ} 21'$ ，北纬 $21^{\circ} 08' \sim 29^{\circ} 15'$ 之间。云南背靠青藏高原，西南与印度洋孟加拉湾相距600 km，东南与太平洋北部湾相距400 km，地理位置特殊，从而形成特殊的地理气候类型。云南南部，特别是哀牢山以西地区，夏季受大洋影响，雨量充沛；冬季，青藏高原、云贵高原和哀牢山阻挡寒流南侵，同时受西部地区沙漠的干暖气流影响，温暖而干燥。

1.2 地形地貌

总体上看，云南的地形是北高南低，大致从西北向东南逐渐下降。滇西北怒江、香格里拉、丽江等地区属于喜马拉雅山脉向东南延伸的部分，海拔一般3 000~4 000 m，许多山峰海拔5 000 m以上；滇中高原海拔2 300~2 600 m，山间盆地海拔1 700~2 000 m，山峰海拔3 000~3 500 m；滇西、滇西南、滇南地区最低，主要包括海拔1 200~1 400 m的中山、低山和丘陵，以及海拔1 000 m以下的盆地和河谷。

云南按江河可分为五大流域：怒江流域、澜沧江流域、红河流域、珠江流域、长江流域，在这五大流域之外还有大盈江、瑞丽江、南定河、南滚河、南卡江、李仙江等多个小流域。

怒江起源于青藏高原，自滇西北入境，从滇西流入缅甸后称为萨尔温江，注

入印度洋；怒江西侧是高黎贡山，即滇西北与缅甸的交界。高黎贡山以西的瑞丽江和大盈江自东向西流入缅甸，然后转向南，下游称伊洛瓦底江，注入印度洋。大盈江出境处海拔约 200 m。

澜沧江起源于青藏高原，从滇西北流入云南，总体自北向南流，从西双版纳州勐腊县出境，流入老挝后称湄公河，注入太平洋。澜沧江下游的主要支流有位于澜沧县与双江县之间的小黑江、景谷县的威远江、勐腊与景洪交界的罗梭江、勐腊县境内的南腊河。南腊河与澜沧江交汇处海拔 475 m，属于西双版纳最低点。

耿马县的南定河、沧源县的南滚河自东向西流入缅甸后汇入萨尔温江。南定河出境处海拔约 450 m；南滚河出境处海拔约 500 m。

起源于大理的把边江，流经景东、镇沅等地，与阿墨江汇合后称李仙江，向东南流入越南后称黑水河，最后注入红河。李仙江出境处海拔 300 多米。元江起源于大理，沿哀牢山东侧自西北向东南流（下游称红河），于红河州河口县流入越南，最后注入太平洋。红河出境处与南溪河交汇，海拔 76 m，是云南海拔最低点。

1.3 气候特征与植被类型

云南气候类型多样，水平差异复杂，垂直变化显著（陈宗瑜，2001）。滇西、滇西南、滇南海拔较低，离海洋较近，热量充足，雨量充沛，适合于热带雨林的发育。但是，云南的热带雨林由于纬度偏北，海拔偏高，水分和热量呈季节变化，典型的热带科、属、种数量远不及东南亚的热带雨林，可以认为云南的热带雨林在水平地理分布上已是北部的极限。

哀牢山是云南东西气候分界线，相比而言，西部地区比东部地区暖和。冬半年，西部地区受北方寒流影响小，同时西部地区受沙漠干暖气流的影响，温暖而干燥，天气晴朗，夜间地表热量向外辐射散失，形成所谓的“辐射型寒害”（江爱良，2003），在河谷地带常形成“逆温现象”，即海拔最低的河谷和洼地冷空气聚集而出现霜害，相反，暖空气上升，半山坡却比较暖和。因而，部分地区的热带雨林分布到较高海拔地段，表现出植被分布的倒置现象。哀牢山以东地区，寒流容易到达，海拔越高，寒害越重，被称为“平流型寒害”（江爱良，2003），所以热带雨林分布在低海拔河谷地带。

滇西瑞丽江和大盈江一带的热带雨林向北延伸到北纬 25° 左右，海拔700 m以下河谷地段，此区年降水量1 400~2 000 mm（中国植被编辑委员会，1980；云南植被编写组，1987；杨宇明，2006）。西双版纳是云南热带雨林分布面积最大且最集中的地区，一般分布在海拔800 m以下，其中勐腊县分布面积较大，海拔可上升到1 150 m；热带雨林沿澜沧江河谷向北延伸到北回归线附近，此区年降水量1 100~1 700 mm；由于受澜沧江河谷“逆温现象”和空气湿度随海拔升高而增加的双重影响，热带山地雨林分布到海拔1 800 m地段，表现为植被分布的倒置现象。位于哀牢山脉以东的河口县一带，海拔400 m以下为北热带湿润气候，年降水量1 600~1 800 mm，湿润雨林和季节雨林在局部地区可上升到海拔800 m地段（图1-1）。

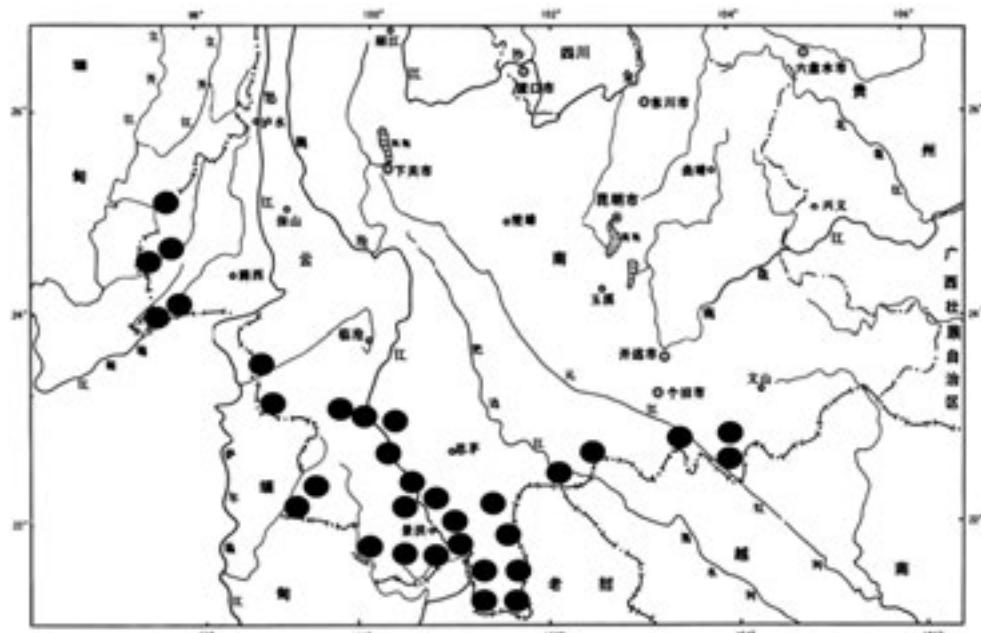


图1-1 云南热带雨林分布区示意



琴叶风吹楠群落景观，2010

参考文献

- 陈宗瑜. 2001. 云南气候总论 [M]. 北京: 气象出版社.
- 江爱良. 2003. 青藏高原对我国热带气候及橡胶树种植的影响 [J]. 热带地理, 23 (3): 199-203.
- 杨宇明, 杜凡. 2006. 云南铜壁关自然保护区科学考察研究 [M]. 昆明: 云南科技出版社.
- 云南植被编写组. 1987. 云南植被 [M]. 北京: 科学出版社.
- 中国植被编辑委员会. 1980. 中国植被 [M]. 北京: 科学出版社.

第 2 章

琴叶风吹楠地理分布调查

2.1 引言

地理分布是指物种在地表分布的区域，是物种进化和自然选择共同作用的结果，是物种分类的重要参考依据之一。一种植物除了形态学或其他特征与近缘植物有“间断”性区别以外，还必须具备一定的种群数量和地理分布范围，然而在分布范围内，一种植物的个体并非布满整个分布区，而是只生长在适宜的生境。所以分布区内适宜生境出现的频率决定了植物的种群数量和分布格局，当然适宜的环境不一定就必须有野生分布。可以通过一种植物分布区的调查，根据气候类型和群落类型等分析，认识该种的分布规律，推测该种的历史分布区或预测潜在分布区。物种起源、演化、现在的分布格局等信息，可以作为地球历史变迁的依据之一。

肉豆蔻科 (Myristicaceae) 是典型的纯热带分布科，认识该科植物在云南的分布现状对研究云南地质变化和气候变迁都有一定辅助作用。有文献记载，滇南风吹楠 (*Horsfieldia tetrapterala*) 在云南的分布面积是 3 431hm² (李玉媛, 2005)，但是种群数量没有记录，课题组调查发现，种群数量极少。风吹楠属 (*Horsfieldia*) 在中国的野生分布种，以前认为是 5 种，包括风吹楠 (*H. amygdalina*)、琴叶风吹楠 (*H. pandurifolia*)、大叶风吹楠 (*H. kingii*)、滇南风吹楠、海南风吹楠 (*H. hainanensis*)，现在将后 3 种合并 (Wu, 2008；吴裕, 2015)，称大叶风吹楠，所以按 3 种记录，此 3 种在云南的分布区基本重复，但适宜生境略有差异。

根据《云南植物志》和《中国植物志》的记录，琴叶风吹楠分布于勐腊、景洪、勐海、澜沧、双江、孟连、耿马、镇康、瑞丽、盈江、江城、河口的低海拔河谷，并定为云南特有物种（云南省植物研究所，1977；中国植物志编辑委员会，1979）。总体上看，琴叶风吹楠的分布区从滇西沿国界到滇西南，再向东到滇南，属于热带雨林的分布北沿。琴叶风吹楠被认定为云南特有物种，这样的分布格局显得非常特殊。本章以实地调查数据为基础，结合文献记录，介绍资源分布现状，探讨琴叶风吹楠地理分布问题。

2.2 调查方法

首先查阅《中国植物志》《云南植物志》《中国植物红皮书》《中国高等植物》（傅立国，1991，2000）等文献，首先认识琴叶风吹楠分布的行政区划，再查阅《云南植被》（云南植被编写组，1987）和《中国植被》（中国植被编辑委员会，1980）以了解云南热带雨林的分布情况，再查阅云南各地的科学考察报告，特别是自然保护区的科学考察报告，掌握琴叶风吹楠在云南的分布范围及森林群落类型。琴叶风吹楠的花极小，不容易引起人们注意，但是果实较大，一般3—5月份成熟，果皮自然开裂，红色假种皮包被种子一同脱落于地面，容易识别，因而在果实成熟季节携带实物标本（果序、枝条）和照片（植株、果实、叶片）走访分布区范围内的各县林业局、自然保护区管理局和当地有经验的农民，了解当地气候和植被现状，大概确定可能的分布位置，然后在他们的协助下进行实地调查。采用手持GPS定位，记录经纬度、海拔、坡向、坡位、坡度等环境条件，调查植株胸径、树形、是否结实、伴生树种等。

2.3 琴叶风吹楠在云南的分布现状

云南的地形总体上北高南低，河流自北向南流出国境，印度洋和太平洋北部湾的暖湿气流沿河谷自南向北影响云南，导致热带雨林分布区沿河谷自南向北、由低到高呈“树枝状”延伸，这种地形和气候特点决定了琴叶风吹楠的分布特点。滇西盈江县的大盈江自东北向西南流入缅甸，出境处海拔200多米，水流量大，原生植被茂密（图2-1），但破坏较大。根据《云南铜壁关自然保护区科学考察研究》的记录，海拔600m左右有琴叶风吹楠分布（杨宇明，2006），但是课题组于2009—2010年两次在位于东经 $97^{\circ}32' \sim 97^{\circ}36'$ 、北纬 $24^{\circ}26' \sim 24^{\circ}27'$

之间的大盈江北岸海拔 650 m 以下进行了调查（南岸属于缅甸，未调查），未见植株。

根据文献记录，瑞丽、镇康、沧源、孟连都有分布，据课题组调查，只在沧源县的南滚河流域森林保护较好（图 2-2），其他地区破坏严重。据科学考察报告《中国南滚河国家级自然保护区》的记录，南滚河下游沟谷有琴叶风吹楠分布（杨宇明，2004），但课题组于 2009—2016 年在保护区管理局的科技人员协助下多次调查，并未发现植株。



图 2-1 大盈江河谷景观（盈江县，2009）



图 2-2 南滚河河谷秋晨（沧源县，2016）

西双版纳是琴叶风吹楠分布最集中、资源量最大的地区。西双版纳地处云南的最南端，约位于东经 $99^{\circ} 55' \sim 101^{\circ} 50'$ 、北纬 $21^{\circ} 08' \sim 22^{\circ} 40'$ ，澜沧江自北向南贯穿全境，其主要支流南腊河流域（勐腊境内）和罗梭江（上游称补远江）流域（勐腊和景洪境内）是琴叶风吹楠野生资源较丰富的地域（图 2-3、图 2-4）。

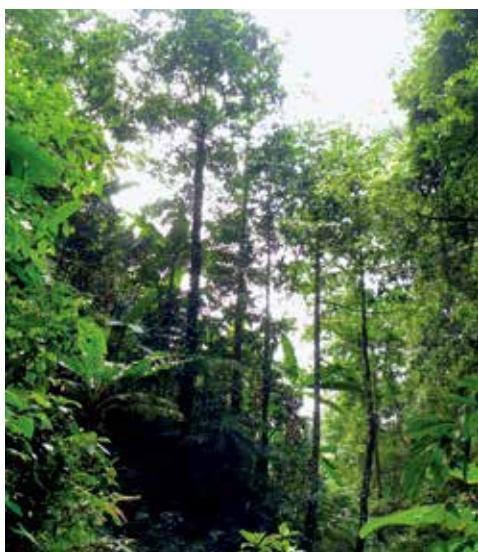


图 2-3 琴叶风吹楠群落
(勐腊县，南腊河流域，2014)

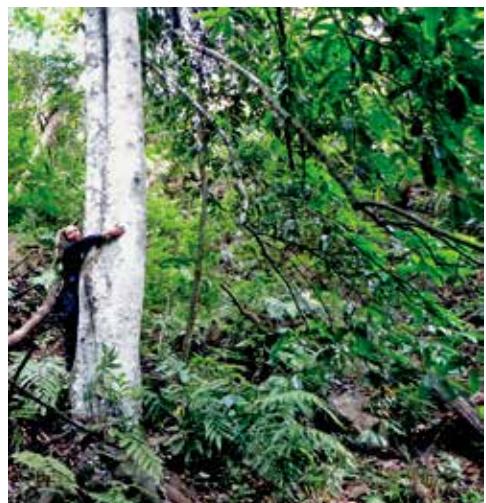


图 2-4 罗梭江河谷景观 (勐腊县, 2017)

图 2-5 澜沧江河谷雨季初
(景谷 - 双江段, 北回归线附近, 2016)

沿澜沧江往北, 两边的箐沟和低湿洼地有少量分布; 双江县与澜沧县交界的小黑江流域 (北回归线附近) 也有少量分布, 是现存资源的分布北界, 此区季节性干旱, 原有植被受破坏严重, 目前只在小箐沟深处偶尔见残存单株, 但周围未见幼树或小苗, 说明自然更新困难 (图 2-5 至图 2-8)。

从垂直分布看, 琴叶风吹楠主要

图 2-6 小黑江河谷旱季
(北回归线附近, 植株位置红箭头示, 2010)图 2-7 琴叶风吹楠残存单株
(双江县, 海拔 1 040 m, 2010)图 2-8 琴叶风吹楠残存单株
(双江县, 海拔 850 m, 2010)

分布于海拔 900 m 以下季节雨林内，很少超过海拔 1 000 m，但在局部地区由于受河谷逆温现象和空气湿度随海拔升高而增加的双重影响导致分布区抬升。调查表明，在勐腊县勐仑镇海拔 1 010 m 的季节雨林中有集中分布，小黑江流域北侧（属双江县）海拔 1 040 m 处有 1 株大树（图 2-7）。琴叶风吹楠原始的“大居群”已被破坏，只在分布区海拔上限地段残存着相互隔离的“小居群”，每个“小居群”内海拔差异仅几米至几十米，林分面积极小，琴叶风吹楠在云南的种群数量已经相当少。

在云南分布区，琴叶风吹楠呈单株散生或小面积集中分布的特点，一般在有水的沟谷或低湿洼地集中分布。有的“小居群”只有 1 株大树，有的“小居群”只有零散几株大树残存于田边地角，而且株间相距较远，周围并未发现小树，自然更新已相当困难。在勐腊县的勐伴、补蚌、回燕龙等部分“小居群”处于极湿润的洼地或沟谷，其间有流水，虽然种群数量极小，但胸径从 5 cm、10 cm、20 cm、30 cm 到 40 cm 的植株都有存在，而且还有 1~2 年生幼苗，这是目前已知保存比较好的林分，如果能在保护原生环境的同时，辅助以人工抚育，有望扩大种群数量。另一方面，大部分“小居群”的下游已被开垦为农田，再也没有扩大种群的地域空间，而且有些“小居群”正在被农田蚕食（图 2-9），如果不及时



图 2-9 森林正受破坏（景洪市，2009）

保护，这些“小居群”会很快消失。例如，课题组于2014年5月对西双版纳地区的一片野生林分进行调查采样，当时有一小片琴叶风吹楠林位于农田上缘，保存比较完整，但是2015年1月调查时，这块林地已经变成农田，只在地中间乱石堆里长出几株小苗，经检查，这些小苗都是2014年5月前后成熟脱落种子的萌发苗（图2-10、图2-11），如果这些小苗再遭到破坏，这个残存的琴叶风吹楠群落也将彻底消失。



图2-10 琴叶风吹楠群落
(景洪市, 未受破坏前, 2014)



图2-11 琴叶风吹楠群落破坏后
萌发的种子苗 (景洪市, 2015)

2.4 琴叶风吹楠分布的群落类型

肉豆蔻科 (Myristicaceae) 是纯热带分布科，其中琴叶风吹楠在云南热带雨林中属于上层树种或第二层树种（表2-1）。西双版纳是云南热带雨林分布面积最大、最集中的地区，琴叶风吹楠分布的群落发育相对完整，同时由于自然保护区的建立，森林保护相对完好（图2-12至图2-15）。琴叶风吹楠是绒毛番龙眼 - 千果榄仁群系的主要组成树种之一，但一般不是最上层树种，主要位居第二层，

也不是优势种，只在西双版纳纳板河流域国家级自然保护区的白颜树—琴叶风吹楠群落林里属于最上层优势种之一，在西双版纳国家级自然保护区勐仑片区的绒毛番龙眼—新乌檀—琴叶风吹楠群落林里属第二层优势种之一。琴叶风吹楠在水热条件相对较差的季节雨林或山地雨林呈单株散生状态，例如在望天树—常绿榆—绒毛番龙眼群落、盆架树—浆果乌柏—山韶子群落林里偶尔能见到单株散生。



图 2-12 西双版纳自然保护区森林景观
(勐腊县, 2017)



图 2-13 西双版纳自然保护区考察
(勐腊县, 2009)



图 2-14 琴叶风吹楠
(树龄 140 年, 景洪市, 2017)



图 2-15 琴叶风吹楠
(林下幼树, 景洪市, 2014)

表 2-1 琴叶风吹楠分布的群落类型

群落	最上层优势种	第二层优势种
绒毛番龙眼 - 千果榄仁 - 仑翅子树群落	绒毛番龙眼 (<i>Pometia tomentosa</i>) 千果榄仁 (<i>Terminalia myriocarpa</i>)	金钩花 (<i>Pseuduvaria indochinensis</i>)、勐仑翅子树 (<i>Pterospermum menglunense</i>)、缅桐 (<i>Sumbaviopsis albicans</i>)、梭果玉蕊 (<i>Barringtonia macrostachya</i>)、白颜树 (<i>Gironniera subaequalis</i>)
千果榄仁 - 云南厚壳桂 - 锥花三宝木群落	千果榄仁 (<i>Terminalia myriocarpa</i>)	云南厚壳桂 (<i>Cryptocarya yunnanensis</i>)、长柄油丹 (<i>Alseodaphne petiolaris</i>)、粗壮琼楠 (<i>Beilschmiedia robusta</i>)、琴叶风吹楠 (<i>Horsfieldia pandurifolia</i>)
绒毛番龙眼 - 长柄油丹 - 红椿群落	绒毛番龙眼 (<i>Pometia tomentosa</i>) 红椿 (<i>Tonna ciliata</i>) 老挝天料木 (<i>Homalium laoticum</i>)	长柄油丹 (<i>Alseodaphne petiolaris</i>)、云南厚壳桂 (<i>Cryptocarya yunnanensis</i>)、琴叶风吹楠 (<i>Horsfieldia pandurifolia</i>)
绒毛番龙眼 - 大蒜果树 - 南山竹子群落	绒毛番龙眼 (<i>Pometia tomentosa</i>) 大蒜果树 (<i>Dysoxylum mollissimum</i>)	曲枝木棯 (<i>Amoora stellato-squamosa</i>)、印度栲 (<i>Castanopsis indica</i>)、网脉肉托果 (<i>Semecarpus reticulata</i>)、厚叶琼楠 (<i>Beilschmiedia percoriacea</i>)、云南山竹子 (<i>Garcinia cowa</i>)
绒毛番龙眼 - 新乌檀 - 琴叶风吹楠群落	绒毛番龙眼 (<i>Pometia tomentosa</i>) 新乌檀 (<i>Neonauclea griffithii</i>) 毗黎勒 (<i>Terminalia bellirica</i>) 龙果 (<i>Pouteria grandifolia</i>)	微毛布荆 (<i>Vitex quinata</i> var. <i>puberula</i>)、琴叶风吹楠 (<i>Horsfieldia pandurifolia</i>)、思茅木姜子 (<i>Litsea pierrei</i> var. <i>szemaois</i>)、樟叶朴 (<i>Celtis cinnamomea</i>)
绒毛番龙眼 - 常绿苦树 - 银钩花群落	绒毛番龙眼 (<i>Pometia tomentosa</i>) 常绿苦树 (<i>Picrasma javanica</i>) 毗黎勒 (<i>Terminalia bellirica</i>)	银钩花 (<i>Mitraphora thorelii</i>)、滇南风吹楠 (<i>Horsfieldia tatepala</i>)、曲枝木棯 (<i>Amoora stellato-squamosa</i>)
望天树 - 常绿榆 - 绒毛番龙眼群落	望天树 (<i>Shorea chinensis</i>) 绒毛番龙眼 (<i>Pometia tomentosa</i>) 龙果 (<i>Pouteria grandifolia</i>)	常绿榆 (<i>Ulmus lanceaefolia</i>)、多花白头树 (<i>Garuga floribunda</i> var. <i>gambrai</i>)、印度栲 (<i>Castanopsis indica</i>)、勐仑翅子树 (<i>Pterospermum menglunense</i>)、云南山竹子 (<i>Garcinia cowa</i>)
白颜树 - 琴叶风吹楠群落	白颜树 (<i>Gironniera subaequalis</i>) 琴叶风吹楠 (<i>Horsfieldia pandurifolia</i>) 八蕊单室茱萸 (<i>Mastixia euonymoides</i>)	泰国黄叶树 (<i>Xanthophyllum siamensis</i>)、圆果杜英 (<i>Elaeocarpus sphaericus</i>)、滇糙叶 (<i>Aphananthe cuspidata</i>)、歪叶榕 (<i>Ficus cyrtophylla</i>)

(续表)

群落	最上层优势种	第二层优势种
盆架树 - 浆果群落	盆架树 (<i>Winchia calophylla</i>)	红光树 (<i>Knema furfuracea</i>)、水团花 (<i>Adinandra pilulifera</i>)、红梗润楠 (<i>Machilus rufipes</i>)、泰国黄叶树 (<i>Xanthophyllum siamensis</i>)、少花琼楠 (<i>Beilschmiedia pauciflora</i>)
乌柏 - 山韶子群落	浆果乌柏 (<i>Sapium baccatum</i>) 山韶子 (<i>Nephelium chryseum</i>)	

在琴叶风吹楠分布的群落里常见树种有绒毛番龙眼 (*Pometia tomentosa*)、千果榄仁 (*Terminalia myriocarpa*)、滇南溪桫 (*Chisocheton siamensis*)、山木患 (*Harpullia cupanioides*)、金钩花 (*Pseuduvaria indochinensis*)、云南山竹子 (*Garcinia cowa*)、木奶果 (*Baccaurea ramiflora*)、曲枝木棟 (*Amoora stellato-squamosa*)、假多瓣蒲桃 (*Syzygium polypetaloideum*)、毗黎勒 (*Terminalia bellirica*)、歪叶榕 (*Ficus cyrtophylla*) 等 (云南植被编写组, 1987; 西双版纳国家级自然保护区管理局, 2006)。在琴叶风吹楠分布的各个生境中, 植物物种组成差异较大, 例如, 伴生树种在罗梭江 (上游称补远江) 流域, 以棒柄花 (*Cleidion brevipetioatum*)、缅桐 (*Sumbaviopsis albicans*) 占多数, 在尚勇则以锥花三宝木 (*Trigonostemon thrysoides*)、大叶木兰 (*Magnolia henryi*)、云南厚壳桂 (*Cryptocarya yunnanensis*)、单序波缘大参 (*Macropanax undulatus* var. *simplex*)、长柄油丹 (*Alseodaphne petiolaris*) 等为多。

在西双版纳分布区, 有些沟谷雨林遭到严重破坏, 沿沟边还零散分布着琴叶风吹楠的单株大树, 但两侧的森林已被彻底砍光, 开垦为农田。从残存单株的分布看, 未破坏以前, 琴叶风吹楠应该是该群落的优势种之一, 但再也不能判断其群落类型了。本次调查在小黑江流域发现琴叶风吹楠大树的伴生植物有藤黄科 (Guttiferae)、芭蕉科 (Musaceae) 等, 看上去还保存了热带雨林的痕迹, 但环境干燥, 明显表现出生境退化趋势。

2.5 琴叶风吹楠地理分布问题的探讨

从琴叶风吹楠在云南地区的垂直分布和水平分布看, 分布区跨度大, 但分布面积并不大。如果只看云南地图, 琴叶风吹楠的分布区组成相当“怪异”, 但如果再看中南半岛, 可能会豁然开朗: 琴叶风吹楠的分布中心可能在中南半岛, 云南分布区只是其北部边缘。再看其他属和种的分布, 肉豆蔻科大多数属的分

布区相当有限，其中肉豆蔻属 (*Myristica*)、风吹楠属 (*Horsfieldia*) 和红光树属 (*Knema*) 分布于中国南部、中南半岛、太平洋诸岛至澳洲一带，中国热区仅是这几个属的分布北缘（王荷生，1992）。据推测，肉豆蔻科可能在各大洲轮廓基本形成后开始早期分化，可能起源于古南大陆北部偏东的今日印度—马来区（吴征镒，2003），云南只是肉豆蔻科向北扩散的边缘。

至今没有查到琴叶风吹楠在缅甸、老挝和越南的分布记录，根据国内文献和调查数据，再结合琴叶风吹楠群落类型综合分析，认为缅甸、老挝和越南应该有野生分布（图 2-16）。理由是：云南的河流向西南、南、东南流入这 3 个国家，它们处在河流的下游，海拔更低，纬度也更低，热量更充足，雨量更充沛，热带雨林发育更完整，更适应琴叶风吹楠生长发育；如果琴叶风吹楠从南部起源，再向北（上游）扩散到云南的边境地区，那么这 3 个国家应有较大的分布面积；在云南分布区，各流域之间受高山阻隔，至少在大陆抬升高山形成之后琴叶风吹楠在省内从一个流域直接传播到另一个流域几乎没有可能，然而与国外的传播路线畅通。

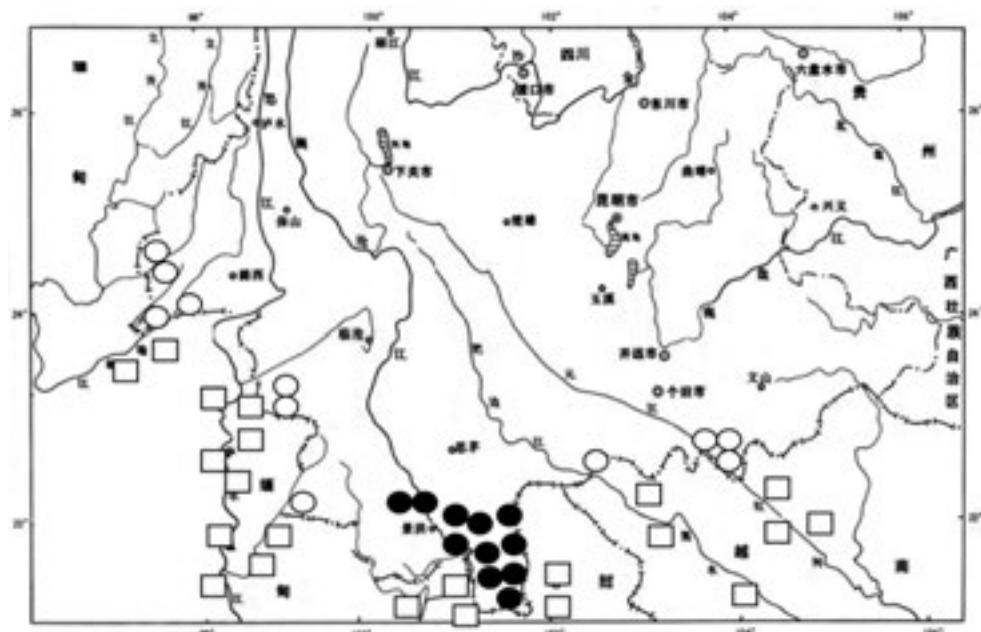


图 2-16 琴叶风吹楠地理分布示意

○文献记录有分布，本次调查未发现；●本次调查有分布，文献也有记录；
□理论上可能有分布的国外区域

李秉滔在《Flora of China》中把琴叶风吹楠归并入 *H. prainii*, 作为独立种, 其分布地点为菲律宾、巴布亚新几内亚、印度尼西亚、印度、泰国、中国云南, 却没有提及缅甸、老挝和越南 (Wu, 2008)。这里不讨论琴叶风吹楠归并入 *H. prainii* 是否合理, 但这种“间断分布”的格局却值得探讨。据调查, 在西双版纳的某些沟谷, 琴叶风吹楠沿沟谷分布绵延数公里, 株间距几十米至几百米, 但植株离溪水仅几米至十几米。琴叶风吹楠果实大而重, 也没有果翅或种翅, 成熟后果皮自然开裂(非炸裂), 种子连同假种皮脱落, 随风远距离传播没有可能, 只能受其他树枝的阻障和弹跳作用近距离传播; 调查中发现种子和假种皮都有啮齿类动物咬坏的痕迹, 树洞或岩石缝隙间偶见贮藏种子, 而且这些动物在树上活动频繁, 可以认为动物传播是重要的途径之一; 种子脱落后被溪水冲到下游萌发, 植株沿溪水分布不仅是生境适应的问题, 溪水的“定向”传播可能是其重要的原因之一。不管哪种方式传播, 琴叶风吹楠沿小溪和河流分布已是不争的事实, 所以在同一条河流的上游和下游有分布, 中游不可能没有分布。

理论上, 琴叶风吹楠在缅甸、老挝和越南应有野生分布, 而且种群数量比较大, 但没有直接证据, 有待进行实地调查。

参考文献

- 傅立国, 陈潭清, 郎楷永, 等. 2000. 中国高等植物(第三卷)[M]. 青岛: 青岛出版社.
- 傅立国. 1991. 中国植物红皮书(第一册)[M]. 北京: 科学出版社.
- 李玉媛. 2005. 云南国家重点保护野生植物[M]. 昆明: 云南科技出版社.
- 王荷生. 1992. 植物区系地理[M]. 北京: 科学出版社.
- 吴裕, 毛常丽, 张凤良, 等. 2015. 琴叶风吹楠(肉豆蔻科)分类学位置再研究[J]. 植物研究, 35(5): 652-659.
- 吴征镒, 路安民, 汤彦承, 等. 2003. 中国被子植物科属综论[M]. 北京: 科学出版社.
- 杨宇明, 杜凡. 2004. 中国南滚河国家级自然保护区[M]. 昆明: 云南科技出版社.
- 杨宇明, 杜凡. 2006. 云南铜壁关自然保护区科学考察研究[M]. 昆明: 云南科技出版社.
- 云南省植物研究所. 1977. 云南植物志(第一卷)[M]. 北京: 科学出版社.

- 云南植被编写组. 1987. 云南植被 [M]. 北京: 科学出版社.
- 中国植被编辑委员会. 1980. 中国植被 [M]. 北京: 科学出版社.
- 中国植物志编辑委员会. 1979. 中国植物志 (第三十卷) [M]. 北京: 科学出版社.
- Wu Z Y, Raven P H, Hong D Y. 2008. Flora of China (Vol. 7) [M]. BeiJing : Science Press.



采集分子样品



第3章

琴叶风吹楠生物学特征

3.1 引言

形态、生理、生化特征是物种固有的属性，形态学和植物地理学一直以来是经典植物分类的基础，所以要确定一个植物种，需要描述其形态特征及其种内变异幅度，记录物候特点和开花结实习性，以及记录地理分布范围。然而，不可能对一个植物种的形态特征及其种内变异都一一研究清楚，特别在发表新种时资料积累更是少之又少，因而常出现资料记录不全或差异较大，甚至错误明显。新植物种的发表，对其今后的研究和资料的积累无疑有着良好的促进作用，这也是人们“提前”发表新种的原因之一。

我国植物学家胡先骕（1963）发表琴叶风吹楠时没有描述花的形态特征，后来的《中国植物志》《云南植物志》《中国植物红皮书》及《中国高等植物》也没有提及雌花的形态特征（中国植物志编辑委员会，1979；云南省植物研究所，1977；傅立国，1991，2000），关于雌雄同株和雌雄异株的问题不同文献记录也不一致。据课题组多年定点观察、野外资源调查和标本分析，发现琴叶风吹楠的形态特征与文献记录差异较大，甚至有些文献的记录存在明显错误。本章主要对琴叶风吹楠的花、果实和种子的形态特征及种子萌发特性进行分析和介绍。

3.2 琴叶风吹楠形态特征

常绿高大乔木，高10~30 m，胸径30~70 cm，主干通直，分枝集生于树干上部（图3-1，图3-2）；分枝平展，稍下垂，整个树冠呈圆锥形或伞形；小枝粗

壮，无毛；单叶互生，坚纸质，全缘，两面无毛，倒卵状长圆形或近提琴形（稀卵圆形），长（10~）16~34（~40）cm，宽6~10cm，先端短渐尖至突尖，基部楔形至宽楔形，稀圆，两面无毛；侧脉（9~）12~22对，以60°~70°角开展，向上弯曲，细脉不明显；叶柄粗壮，稍扁，常暗红色，长2~3cm，宽4~5mm（图3-3，图3-4）。雌雄同株异花，复总状圆锥花序腋生（图3-5，图3-6）。雄花序细长而疏散，长12~20（~30）cm，分枝稀疏，无毛，总梗粗3~4mm，小花梗长2~4mm；雄花序的总花梗和小花梗均为红褐色；花蕾及开花时的花被片均为嫩黄绿色；花径3mm，花被片3~4（~5）枚，呈三角状，长2mm，基部下延；雄蕊10枚，花丝合生成柱，花药外向，排列成圆球形，整个雄蕊群长宽为1~2mm。雌花序粗短而密集，长7~12cm，无毛，总梗粗约5mm，小花梗长不足2mm；一般情况下，雌花序着生于枝条中下部落叶的叶腋或内膛小枝叶腋，少数着生于枝条上部；雌花序总花梗及小花梗均为黑褐色；花蕾及开花时的花被片均为墨绿色，花径3mm，花被片3~4（~5）枚，呈三角状，长2mm，基部下延；子房上位，无柄，1心皮1室1近基生的胚珠，子房明显具腹缝线和背缝线，花柱稍弯曲，贴近子房，花柱几无；子房墨绿色，无毛，整个雌蕊长约1mm。



图3-1 琴叶风吹楠
(在密林中植株树干通直, 2010)



图3-2 琴叶风吹楠
(分枝集生于树干上部, 2009)



图 3-3 琴叶风吹楠 (常见叶形, 2017)



图 3-4 琴叶风吹楠 (倒卵形叶, 2014)



图 3-5 琴叶风吹楠 (雄花枝, 2010)



图 3-6 琴叶风吹楠 (雌花枝, 2010)

个别雌花序会分生出雄花序枝，或者在众多雌花中混入1至几朵雄花。雌花序和雄花序在未开放时就存在明显的区别：雄花序细长，分枝稀疏，花梗红褐色，花蕾嫩黄绿色，几乎呈圆球形；雌花序粗短，分枝密集，花梗黑褐色，花蕾墨绿色，呈卵圆形。如果在雌花序上有个别雄花蕾（序）存在，其形态和颜色的区别依然明显（图3-7、图3-8）。



图 3-7 琴叶风吹楠 (雌雄同枝, 2010)



图 3-8 琴叶风吹楠 (雌雄同序, 2010)

果实成熟时，每果序着生1~10个果实，花被片脱落。果实卵圆形至长椭圆形，果皮绿色略暗红，长4~7cm，宽2~3.5cm，先端圆钝至锐尖，果皮下延成柄状，基部不同程度偏斜，果皮不等厚；每果实1粒种子，果皮自然开裂，肉质假种皮鲜红色，光亮，顶端撕裂状，完全或未完全包被种子（图3-9至图3-12）；种子卵形至长卵形（稀细长或者近锥形），长21~39mm，宽11~21mm，种皮硬革质，光滑，灰白色，具褐色斑块和脉纹，种胚位于种子基部的卵形疤痕处，胚长约1mm，种子先端突尖或具弯头，稀仅具脉纹紧缩的痕迹（图3-13，图3-14）。

花期3—5月，果实于第二年3—5月成熟。



图3-9 琴叶风吹楠
(果枝, 2010)



图3-10 琴叶风吹楠
(果实成熟, 2010)



图3-11 琴叶风吹楠
(假种皮鲜红, 2009)



图3-12 琴叶风吹楠
(假种皮顶端撕裂状, 2009)



图 3-13 琴叶风吹楠
(新鲜种子, 2009)



图 3-14 琴叶风吹楠
(烘干种子, 2010)

3.3 琴叶风吹楠雌雄同株的证据

《中国植物志》没有说明琴叶风吹楠是雌雄同株还是异株;《云南植物志》和《中国肉豆蔻科植物分类研究》(叶脉, 2004)对风吹楠属记为“单性异株”,种的描述未提及性别问题;《中国高等植物》《中国植物红皮书》和《Flora of China》(Wu, 2008)记为雌雄同株。

前面已述及琴叶风吹楠同一株树上雌雄花序并存,同一花序也有雌花和雄花,这是雌雄同株的直接证据。但是许多物种有雌株、雄株和雌雄同株的现象,如番木瓜 (*Carica papaya*),也有些物种虽然是雌雄同株,但也有偏雌或偏雄的分化现象,如思茅松 (*Pinus kesiya* var. *langbianensis*)。琴叶风吹楠植株高大,花极小,且是雌雄异花,要对大量植株进行直接观察并非易事。

至今没有发现关于琴叶风吹楠传粉媒介的报道,课题组也没有发现传粉昆虫。传粉机制的完善是花部演化的主要方面之一,花的颜色和香味是影响昆虫来访的主要性状之一(金则新, 2010)。琴叶风吹楠花极小,花被片绿色,极不显眼;花也没有蜜腺,也未发现明显气味;虽然每朵雄花具 10 枚雄蕊,但花药特小,花粉量也很少。所以,通过风力远距离传粉的可能性不大,即使能传粉,结实率也不会很高。然而,调查中发现,森林破坏后残存的单株(共调查 7 株),每株都是硕果累累(图 3-15),但其周围数公里内并无其他植株,如果雌雄不同株,花粉从哪里来呢,而且结实量还很大,这是琴叶风吹楠雌雄同株的间接证据。

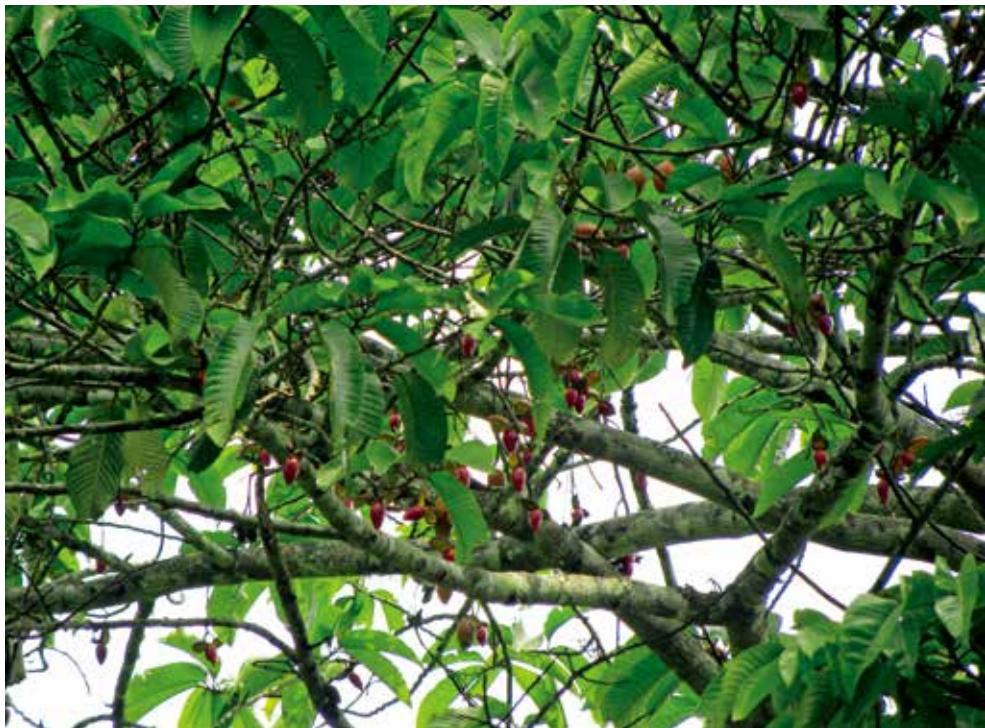


图 3-15 琴叶风吹楠（森林破坏后的残存单株，硕果累累，2009）

但是，本研究没有观察花粉管萌发和受精的过程，不排除无融合生殖的可能，其繁育系统尚需进一步研究。

3.4 琴叶风吹楠种子萌发习性

种子的萌发习性是决定播种繁殖技术的内在因素，也是最重要的因素。这里只介绍种子萌发习性，关于播种繁殖试验的结果将在本书以后章节介绍。

胚 (embryo) 是包在种子中的幼小植物体，种子萌发实际上就是胚生长和形成幼苗的过程。琴叶风吹楠种子属于顽拗型种子 (recalcitrant seed)，应即采即播，不宜失水。幼苗属于子叶留土类型，萌发时胚根先从种子基部的发芽孔伸出，并向下生长形成主根，上胚轴的活动相对滞后 (胚根生长期)。主根伸长到 1~2 cm 时，上胚轴迅速进行伸长生长；主根伸长到 5~6 cm 时，开始分生侧根，上胚轴形成的主茎长 1~2 cm，但胚芽依然为两片子叶柄所“挟持”，因而弯曲的主茎形成 Q 字形 (上胚轴生长期)；随着根和上胚轴的不断伸长，胚芽挣脱

子叶柄的“挟持”而形成弯曲的主茎伸出地面，长3~4 cm，顶端可见微小的真叶，尔后迅速伸直（出土期）；主茎高5~7 cm时，真叶初展，主根长约10 cm（展叶期）；主茎高10~12 cm时，真叶长2~3 cm，此时已形成完整的根系，但是主根发达而侧根纤细（图3-16）。茎基光滑，不具鳞叶，然而风吹楠（*H. amygdalina*）和大叶风吹楠（*H. kingii*）的茎基具4~5枚鳞叶。

胚乳的功能是为种子萌发提供营养物质，琴叶风吹楠种子的主要成分是胚乳，营养富足，在种子萌发过程中，两片子叶也不断生长向胚乳组织延伸（折皱，淡黄色）。种子萌发露白时，子叶较小；胚根长2 cm时，子叶长约1 cm，抵达种子中下部；当真叶展开时，子叶长约2 cm，抵达种子中上部（图3-17）。随着幼苗根系逐渐发育健全，胚乳的营养也随之耗尽，种子开始腐烂。在幼苗移植过程中如果损坏了子叶柄，幼苗失去了胚乳的营养供应，则幼苗生长瘦弱，甚至死亡。



图3-16 琴叶风吹楠
(种子萌发动态过程, 2009)



图3-17 琴叶风吹楠种子萌发过程
(中子叶延伸到胚乳的中上部, 2009)

琴叶风吹楠果实成熟时，果皮自然开裂，种子连同假种皮脱落，果皮在树上保留一段时间将近干枯时才脱落，这种脱落方式对种族繁衍有什么意义吗？据课题组第一次试验（2009年）：采摘4株树的果实，每株的随机分一半手工剥去果皮和假种皮后土壤播种，另一半整个果实土壤播种，进行对比试验。结果表明，果实播种的萌发率为9.09%~33.33%，且苗木生长不良；种子播种的萌发率为80.00%~86.27%，苗木生长良好。第二次试验（2011年）：采摘3株树的果实，各分成3组，其中第1组是纯种子播种；第2组果实播种；第3组手工剥皮后，

播种时将果皮和假种皮放在种子的旁边。试验设计3次重复，随机区组。结果表明，种子播种萌发率高，果实播种萌发率低，与第一次试验基本一致，放在种子旁边的果皮对种子萌发有一定的抑制作用。至于果皮抑制种子萌发的程度和机理尚需进一步研究。

3.5 琴叶风吹楠种子的多胚现象

琴叶风吹楠种子具有多胚现象，少数种子发育成双生苗（图3-18，图3-19），个别种子发育成3生苗，通过解剖发现每株幼苗都有2片独立的子叶。种子萌发的初期，双生苗的高度相差不大，随着幼苗进一步生长，差距日趋明显，到播种第4个月时，地上部分的生物量达到（10~30）:1的差异（图3-20），以后差异越来越大，“大”苗正常生长，“小”苗死亡。一般情况通过正常受精获得1个胚，其余胚可能有几种来源：一种可能是 $2n$ 的受精卵经过有丝分裂形成双胚，萌发成同卵双生苗，2株苗都具有父母的核遗传物质，可以认为



图3-18 琴叶风吹楠
(双生苗, 2009)



图3-19 琴叶风吹楠
(双生苗解剖, 2009)



图3-20 琴叶风吹楠
(双生苗差异, 2009)

是相同的基因型；另一种是母体生殖细胞单性发育而成单倍体（ $1n$ ）或自然加倍成2倍体（ $2n$ ），或者是母体非减数分裂的细胞形成 $2n$ 的胚子，这3种胚都只含有母本的遗传物质；第三种是雄核发育成 $1n$ 的胚，由父本的细胞核和母本的细胞质组成，这种现象很少见。多胚种子有不同的胚胎学成因，既受遗传控制也受环境影响。琴叶风吹楠多胚种子的成因还有待进一步研究。

3.6 小结

琴叶风吹楠雄蕊10枚，花丝合生，保存了部分原始性状（Hervé, 2003）。肉豆蔻科是一个比较原始的科，其花萼和花瓣不分化，科的范围稳定，虽然科的位置各家观点不一，但公认与番荔枝科（Annonaceae）和马兜铃科（Aristolochiaceae）等近缘（吴征镒, 2003）。至于琴叶风吹楠在肉豆蔻科内部的分类位置争议颇大，可能形态特征不清楚是导致观点不一的主要原因之一。

首先确定琴叶风吹楠为雌雄同株，这有直接和间接的证据，然而是否存在纯粹的雄株或雌株尚需开展更多的调查，野外调查发现，有少数单株连续几年跟踪调查都未见结实，传粉与受精过程也尚需观察。琴叶风吹楠果实形态总体特征表现从卵圆形至长椭圆形的变异，与文献记录基本一致。但是有的文献记录果实基部不偏斜，而课题组所调查到的植株为全部偏斜，只是存在不同程度的变异；《Flora of China》记录假种皮橙色（aril orange），实际调查均为鲜红色，只有假种皮干燥后才表现为橙色；果实大小和形态在株内变异小，株间变异大，发现果长4~7 cm，《中国植物志》和《云南植物志》以果长作为分种检索的依据，即果长4~4.5 cm为琴叶风吹楠，4.5~5 cm的为大叶风吹楠，这显然不可靠。

琴叶风吹楠种子形态和大小都存在不同程度的变异，但是种皮灰白色具淡褐色斑块，种胚位于种子基部，种子先端具突尖是稳定的特征，相比而言，风吹楠和大叶风吹楠的种皮为褐色而不具斑块，种胚位于种子近中部，种子先端圆（无突尖），这些特征是分种或分属的重要依据。另外，琴叶风吹楠幼苗无初生不育叶（鳞叶），而风吹楠和大叶风吹楠具初生不育叶，这也可作为分种或分属的依据。

参考文献

傅立国. 1991. 中国植物红皮书（第一册）[M]. 北京：科学出版社，468-469.

- 傅立国, 陈潭清, 郎楷永, 等. 2000. 中国高等植物(第三卷)[M]. 青岛: 青岛出版社.
- 胡先骕. 1963. 森林植物小志 [J]. 植物分类学报, 8(3): 197.
- 金则新. 2010. 夏蜡梅保护生物学 [M]. 北京: 科学出版社.
- 吴征镒, 路安民, 汤彦承, 等. 2003. 中国被子植物科属综论 [M]. 北京: 科学出版社, 76-79.
- 叶脉. 2004. 中国肉豆蔻科植物分类研究 [D]. 广州: 华南农业大学(硕士论文).
- 云南省植物研究所. 1977. 云南植物志(第一卷)[M]. 北京: 科学出版社, 8-13.
- 中国植物志编辑委员会. 1979. 中国植物志(第三十卷)[M]. 北京: 科学出版社, 194-205.
- Hervé Sauquet. 2003. Androecium Diversity and Evolution in Myristicaeae (Magnoliales), with a Description of a new Malagasy genus, Doyleanthus Gen. Nov. [J]. American Journal of Botany, 90 (9): 1 293-1 305.
- Wu Z Y, Raven P H, Hong D Y. 2008. Flora of China (Vol. 7) [M]. BeiJing : Science Press.



琴叶风吹楠(老树, 雄花枝, 2009)

第4章

琴叶风吹楠果实和种子群体变异式样

4.1 引言

种内变异是物种形成和种群发展的物质基础，一个物种的种内遗传变异大小是长期进化的产物，分布区环境差异越大，立地条件越复杂，则种内遗传变异越丰富；反过来，种内遗传变异越丰富，对环境变化的适应能力就越强，种群扩散和种群发展的潜力就越大。花、果实和种子的形态是植物分类鉴定的重要依据。虽然果实和种子性状具有稳定性和保守性，但是由于物种分布区环境条件多样，选择压力使果实和种子的形态特征表现出适应性分化，再加上被子植物双受精作用使得种内遗传变异更加丰富，所以被子植物果实和种子的形态多态性普遍存在（曹慧娟，1992）。

研究物种的变异式样对分类鉴定有重要的作用，只有掌握性状的变异程度才不至于把变异的两个极端分成不同的物种，且能处理特殊变异类型和变异个体。胡先骕（1963）同时发表的 *Horsfieldia pandurifolia* 和 *H. longipedunculata* 在《云南植物志》和《中国植物志》中合并为 *H. pandurifolia*。*H. pandurifolia* 先后被归并入 *H. macrocoma* 和 *H. prainii*（云南省植物研究所，1977；中国植物志编辑委员会，1979；叶脉，2004；Wu, 2008）。这些都说明琴叶风吹楠的表型变异导致分类学观点不统一。本章主要介绍琴叶风吹楠果实和种子形态特征的变异式样。

4.2 研究方法

从 2009—2010 年在琴叶风吹楠的分布地进行野外调查，于 3—6 月的果实成

熟季节从勐腊县、景洪市、双江县、澜沧县采集果实和种子，以植株为单位记录和保存。用人工采摘 16 株树的果实，记录果序长度、每果序果实个数、果实形态、果长、果宽、假种皮颜色，再将果实带回试验室剥出种子；对 23 株直接从地上拾取自然脱落种子。种子经鼓风干燥烘干箱 36℃ 恒温干燥后保存，以植株为单位每株随机抓取 30 粒种子测量种子长、种子宽、记录种子形态特征（少数植株不足 30 粒，全部测）。调查时，用望远镜检视树冠上的果序形态和果实数量等性状，在数据分析时作参考。2011—2013 年，野外调查时也进行了观察记录，作为补充。

测量数据用 Excel 2003 软件处理，计算种子长、种子宽和长宽比率的平均数、方差、标准差、变异系数、长与宽相关系数，并进行显著性检验。

4.3 琴叶风吹楠果实形态特征变异

本研究记录了 16 株树的果实特征，记录了 13 株树果序的果实个数，记录了 12 株树果序长度（表 4-1）。对野外调查时记录的果序长、每果序最多成熟果实数，以及望远镜检视的果序结构特征记录和照片记录等进行综合分析。结果表明，琴叶风吹楠的果序长短和每果序成熟果实数差异较大。有的植株果序长而疏散，有些较短，在所调查的 13 株树中，果序长达 30 cm 的有 4 株，25 cm 的 4 株，20 cm 的 3 株，15 cm 的 1 株；在 13 株树中，每果序成熟果实数多达 10 个的 2 株，8~9 个的 2 株，4~6 个的 9 株。望远镜检视结果表明，每果序的果实一般都超过 3 个，大部分为 4~6 个（图 4-1、图 4-2）。调查数据与文献中果序长 10~18 cm，通常成熟果

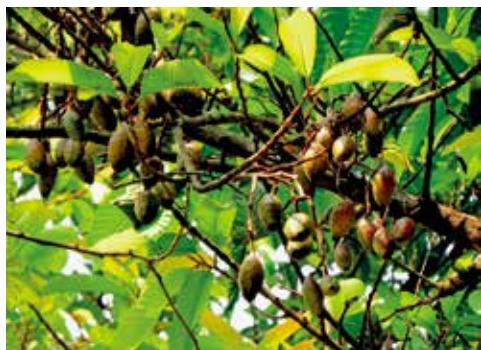


图 4-1 琴叶风吹楠
(果序, 果实较多, 2009)



图 4-2 琴叶风吹楠
(果序, 果实较少, 2009)

实1~3个的记录差异较大(中国植物志编辑委员会, 1979; 云南省植物研究所, 1977; 郑万钧, 1983; 傅立国, 1991, 2000)。

大部分植株的平均果长为4~5 cm, 果宽为2.5~3.5 cm, 少数植株的果长为5~7 cm, 宽为2~3 cm, 表现出果实从卵圆形至长椭圆形的变异(图4-3、图4-4)。果实基部下延, 大部分植株的表现为轻微偏斜, 少数植株明显偏斜; 果实先端表现为从圆钝、钝尖、急尖到锐尖的变异。所调查的16株树中, 有14株树的果实为卵圆形, 先端圆钝至急尖, 基部轻微偏斜, 有2株树的果实为长椭圆形, 先端锐尖, 基部明显偏斜。果实总体形态与文献记录基本一致, 但果实大小、先端和基部特征与文献记录差异较大, 文献中以果实长短作为分种检索依据显得不合理(中国植物志编辑委员会, 1979; 云南省植物研究所, 1977; 郑万钧, 1983; 傅立国, 1991, 2000)。

表4-1 琴叶风吹楠果实形态株间变异

植株编号	果序长	果实数/个	果实形态	果实先端	果实基部
20090303	25	5	卵圆形	圆钝	轻微偏斜
20090304	—	—	卵圆形	钝尖	轻微偏斜
20090305	30	8	卵圆形	钝尖	轻微偏斜
20090308	30	9	卵圆形	圆钝	轻微偏斜
20090309	25	5	卵圆形	突尖	轻微偏斜
20090402	25	5	长椭圆形	锐尖	明显偏斜
20090403	25	10	长椭圆形	锐尖	明显偏斜
20090404	—	—	卵圆形	圆钝	轻微偏斜
20090405	—	—	卵圆形	圆钝	轻微偏斜
20090406	—	4	卵圆形	圆钝	轻微偏斜
20090407	30	6	卵圆形	钝尖	轻微偏斜
20090409	15	4	卵圆形	急尖	轻微偏斜
20090413	20	6	卵圆形	急尖	轻微偏斜
20090414	30	5	卵圆形	钝尖	轻微偏斜
20100401	20	6	卵圆形	急尖	轻微偏斜
20100404	20	10	卵圆形	圆钝	轻微偏斜

注: 数据按植株编号排列。



图 4-3 琴叶风吹楠
(卵圆形果实, 2009)



图 4-4 琴叶风吹楠
(长椭圆形果实, 2009)

根据调查结果, 琴叶风吹楠成熟果实的果皮基部或多或少下延成短柄状, 花被片早落, 假种皮为鲜红色(未成熟时为白色)。但是在《Flora of China》中记载假种皮为橙色(aril orange), 这是记录错误。

4.4 琴叶风吹楠种子形态特征变异

对39株树种子测量数据进行分析的结果表明(表4-2), 种子长总平均为29.94 mm, 单株平均种长最大值(35.66 mm)是最小值(25.05 mm)的1.42倍, 单因素方差分析表明种长株间变异极显著($P < 0.01$); 株内变幅最小为28.50~31.10 mm, 相差2.6 mm, 最大为28.00~38.30 mm, 相差10.3 mm; 可以用变异系数来衡量种长的整齐度, 变异系数最小为2.37%, 最大为18.29%, 只有2株树的种长变异系数大于10%, 16株位于5%~10%之间, 其余21株的小于5%, 表明野生琴叶风吹楠种子长度在株内保持较好的一致性。39株树922粒种子中, 种子最短为21.10 mm, 最长为38.80 mm, 其变幅明显大于文献记载种子长25~32 mm的变幅(中国植物志编辑委员会, 1979; 云南省植物研究所, 1977; 郑万钧, 1983)。

39株树种宽总平均为16.71 mm, 单株平均种宽最大值(19.62 mm)是最小值(13.30 mm)的1.48倍, 单因素方差分析表明种宽株间变异极显著($P < 0.01$); 株内变幅最小为16.20~17.50 mm, 相差1.5 mm, 极差一般在4~6 mm; 变异系数最小为2.46%, 最大为9.12%, 小于5%的有24株, 占总株数的60%, 表明种子宽度在株内也保持较好的一致性。39株树922粒种子中, 种宽最小为11.50 mm,

最大为 20.80 mm，其变幅明显大于文献记载种子宽 16~18 mm 的变幅（中国植物志编辑委员会，1979；云南省植物研究所，1977；郑万钧，1983）。

表 4-2 琴叶风吹楠种子长和宽的株间变异

植株	种子长度 /mm		种子宽度 /mm		长宽比	
	平均值 ± 标准差	变异幅度	平均值 ± 标准差	变异幅度	平均值 ± 标准差	变异幅度
20090303	29.44 ± 1.63	26.50~32.00	18.81 ± 0.78	16.70~20.00	1.57 ± 0.07	1.43~1.73
20090304	27.40 ± 1.68	24.60~32.80	18.53 ± 0.69	16.80~19.90	1.48 ± 0.07	1.34~1.65
20090305	30.61 ± 0.88	28.90~32.00	16.22 ± 0.61	15.30~17.90	1.89 ± 0.08	1.75~2.01
20090308	29.57 ± 1.16	26.10~31.50	16.13 ± 0.64	14.90~17.90	1.84 ± 0.09	1.63~1.97
20090309	29.52 ± 0.81	28.50~31.10	18.05 ± 0.72	16.50~19.00	1.64 ± 0.08	1.54~1.82
20090310	31.99 ± 1.24	28.50~33.90	17.55 ± 0.53	16.50~18.80	1.82 ± 0.07	1.68~1.95
20090402	34.20 ± 3.03	24.80~39.60	16.17 ± 0.84	14.30~18.10	2.12 ± 0.20	1.63~2.59
20090403	35.66 ± 2.17	30.80~38.80	15.45 ± 1.19	12.00~17.10	2.32 ± 0.18	1.93~2.71
20090404	28.33 ± 1.29	25.70~31.60	18.71 ± 0.76	16.30~19.90	1.52 ± 0.08	1.38~1.70
20090405	32.18 ± 1.97	26.50~34.20	17.93 ± 0.70	16.50~19.00	1.80 ± 0.11	1.58~2.00
20090406	32.77 ± 1.65	29.10~36.10	16.40 ± 0.62	15.10~17.50	2.00 ± 0.15	1.71~2.31
20090407	32.17 ± 0.83	30.50~34.10	15.74 ± 0.61	14.50~16.80	2.05 ± 0.09	1.85~2.24
20090408	30.64 ± 1.43	27.00~33.00	15.95 ± 1.46	11.80~21.70	1.94 ± 0.19	1.45~2.66
20090409	31.76 ± 1.38	28.00~34.10	17.05 ± 0.65	15.50~18.30	1.87 ± 0.10	1.61~2.11
20090413	30.04 ± 2.40	18.40~33.40	16.30 ± 0.48	15.20~17.00	1.84 ± 0.16	1.10~1.99
20090414	30.52 ± 0.92	29.10~32.80	16.33 ± 0.49	15.50~17.40	1.87 ± 0.08	1.74~2.05
20090415	26.24 ± 2.01	20.10~29.90	13.30 ± 0.70	11.50~14.90	1.97 ± 0.11	1.75~2.15
20090502	26.82 ± 1.41	24.80~29.40	15.21 ± 0.48	14.50~15.90	1.76 ± 0.09	1.59~1.88
20090503	27.96 ± 1.45	24.10~30.10	16.98 ± 0.85	15.10~18.50	1.65 ± 0.10	1.47~1.92
20090504	28.16 ± 1.40	25.10~32.30	17.01 ± 1.17	14.80~18.90	1.66 ± 0.15	1.35~1.94
20090505	28.24 ± 1.15	25.30~30.10	17.14 ± 0.50	16.30~18.10	1.65 ± 0.06	1.55~1.78
20090506	27.83 ± 0.93	25.10~29.50	17.03 ± 0.96	14.80~19.30	1.64 ± 0.10	1.41~1.89
20090507	28.33 ± 1.29	25.00~30.70	17.37 ± 1.10	14.90~19.50	1.64 ± 0.13	1.40~1.85
20090508	28.38 ± 0.69	27.50~30.00	17.45 ± 0.51	16.70~18.20	1.63 ± 0.06	1.53~1.76

(续表)

植株	种子长度 /mm		种子宽度 /mm		长宽比	
	平均值 ± 标准差	变异幅度	平均值 ± 标准差	变异幅度	平均值 ± 标准差	变异幅度
20090509	25.05 ± 0.97	22.30~26.90	16.02 ± 0.64	14.70~17.10	1.56 ± 0.06	1.45~1.68
20090510	26.59 ± 0.78	24.90~28.10	17.14 ± 0.55	16.00~18.10	1.55 ± 0.07	1.45~1.69
20090511	28.21 ± 2.35	22.60~37.20	18.48 ± 0.46	17.10~19.40	1.53 ± 0.13	1.23~2.03
20090512	28.74 ± 2.76	21.10~32.50	17.49 ± 0.99	15.70~18.80	1.64 ± 0.13	1.20~1.77
20090513	31.18 ± 1.03	28.80~33.30	17.00 ± 0.47	16.00~17.90	1.83 ± 0.08	1.66~1.98
20090601	27.26 ± 1.72	25.20~30.80	15.43 ± 1.04	13.20~16.80	1.77 ± 0.11	1.59~2.00
20090602	32.25 ± 3.76	28.00~38.30	16.13 ± 0.89	14.20~17.10	2.01 ± 0.31	1.64~2.61
20090603	28.89 ± 5.28	19.10~36.00	15.53 ± 0.69	14.50~17.10	1.86 ± 0.32	1.32~2.25
20090604	32.14 ± 2.41	28.00~37.50	15.31 ± 0.71	14.20~17.00	2.10 ± 0.19	1.75~2.47
20090605	32.29 ± 1.71	27.00~35.00	15.30 ± 0.51	14.20~16.10	2.11 ± 0.08	1.90~2.22
20100401	32.63 ± 0.77	31.70~33.70	17.03 ± 0.50	16.20~17.50	1.92 ± 0.05	1.86~2.02
20100402	32.78 ± 1.55	30.60~35.50	15.69 ± 0.98	14.30~17.40	2.10 ± 0.14	1.85~2.31
20100403	32.04 ± 1.03	30.60~33.90	16.60 ± 0.85	15.20~17.90	1.93 ± 0.10	1.71~2.06
20100404	30.06 ± 1.45	26.90~31.70	16.03 ± 0.82	14.70~16.90	1.88 ± 0.11	1.76~2.07
20100501	28.76 ± 1.97	25.40~30.30	19.62 ± 1.09	18.00~20.80	1.47 ± 0.04	1.41~1.51
平均	29.94 ± 2.39	25.05~35.66	16.71 ± 1.23	13.30~19.62	1.81 ± 0.21	1.47~2.32

注：数据按编号排列。

种子长宽比可以作为评价种子特征的指标之一。种子长宽比总平均为 1.81，最大值（2.32）是最小值（1.47）的 1.58 倍，在株间存在极显著差异 ($P < 0.01$)。单株平均种长与平均种宽的相关性分析结果表明长与宽呈弱负相关，其中 20090403 号平均种长 35.66 mm，排名第 1，而平均种宽 15.45 mm，排名第 34；20090501 号平均种宽 19.62 mm，排名第 1，平均种长 28.76 mm，排名第 24。相关性分析结果表明，种子长与宽显著正相关 ($P < 0.05$) 的有 11 株树，占 27.5%；相关系数位于 -0.2~0.2 之间的有 15 株，占 37.5%，这 15 株的种长和种宽变异系数都较小，通过检视，种子形态和大小具有良好一致性；20090406 号和 20090602 号树的种子长与宽呈负相关，但没有达到显著水平 ($P > 0.05$)，通过检视，种子形态特征差异明显。

大部分(94.87%)植株的种子形态和大小在株内保持高度一致性,而株间表现明显的差异性,有从宽短向细长变异的趋势。但是20090406号和20090602号长与宽呈负相关,种子形态和大小变异大的原因还有待深入研究。

对39株树种子的种皮、种脐、先端、总体形态4个性状进行观察和分析,结果表明:种皮灰白色,具脉纹及淡褐色斑块,这是所有种子共同的性状。种脐位于种子基部,呈椭圆形,稍偏斜,在39株树中,有3株的种脐极小,其余36株的种脐大小和形态都表现不同程度的变异。种脐和胚位于种子基部,这是琴叶风吹楠稳定的性状。琴叶风吹楠种子先端具突尖或短喙,一般较长种子具突尖,短圆种子具短喙,其大小和形态都存在明显的株间变异。通过39株树的种子比较,突尖明显伸长(1~2 mm)的有4株,占10.26%,突尖或短喙明显可见的有21株,占53.85%;短喙较小的12株,占30.77%;有1株的不具短喙,只见脉纹紧缩的痕迹,另1株的变异较大。从种子总体形态看,种子基部较宽,先端较窄,呈卵形的22株,占56.41%,长卵形的11株,占28.21%,近圆锥形的3株,细长的2株,变异特别大的1株(图4-5至图4-7)。琴叶风吹楠种子主要是卵形(56.41%)和长卵形(28.21%),但是种子先端较尖这一性状与风吹楠和大叶风吹楠的典型卵形和椭圆形种子存在明显区别。



图4-5 琴叶风吹楠(种子形态的株间变异,2009)



图 4-6 琴叶风吹楠 (种子, 先端圆钝, 2009)



图 4-7 琴叶风吹楠 (种子, 近锥形, 2009)

4.5 小结

云南地型复杂，山高谷深，形成不同的地方小气候，多样的环境给琴叶风吹楠种群形成不同的选择压力，导致果实和种子表现出适应性分化，同时由于高山阻断了基因的交流，所以形态变异较大。通过 8 个分布点 39 株树的果实和种子的形态特征变异研究表明，琴叶风吹楠果实和种子的大小和总体形态存在不同程度的变异，表现为株间变异大，株内变异小；成熟果实花被脱落，假种皮鲜红色，灰白色种皮具褐色斑块，种脐和胚位于种子基部，种子先端具突尖或短喙是较稳定的性状，具有重要的分类学价值。

琴叶风吹楠的果序长度、果实个数、果实长度、果实先端特征和基部偏斜程度皆表现出明显的株间变异，与文献记录差异较大。果实总体特征表现出从卵圆

形至长椭圆形的变异，与文献记载一致。果实基部偏斜和果皮下延成柄状是变异的性状，而且其他种也有类似特征，对于分类作用不大。

琴叶风吹楠种子长、种子宽和长宽比的株间差异达到极显著水平 ($P < 0.01$)，种子的总体形态也表现出从卵形 (56.41%)、长卵形 (28.21%) 至细长形或近锥形的株间变异，但是同一植株种子的大小和总体形态保持高度一致性。

建议将琴叶风吹楠的果实和种子描述进行修订：果实卵圆形至长椭圆形，长4~7 cm，宽2~3.5 cm，先端圆钝至锐尖，果皮下延成柄状，基部不同程度偏斜；成熟果实花被片脱落，果皮自然开裂，假种皮鲜红色；种子卵形至长卵形（稀细长或近锥形），长21~39 mm，宽11~21 mm，种皮灰白色具褐色斑块，种脐和胚位于种子基部，种子先端突尖或具短喙。

参考文献

- 曹慧娟. 1992. 植物学 [M]. 北京: 中国林业出版社.
- 傅立国, 陈潭清, 郎楷永, 等. 2000. 中国高等植物 (第三卷) [M]. 青岛: 青岛出版社.
- 傅立国, 金鉴明. 1991. 中国植物红皮书 (第一册) [M]. 北京: 科学出版社.
- 胡先骕. 1963. 中国森林树木小志 (一) [J]. 植物分类学报, 8 (3): 197-198.
- 叶脉. 2004. 中国肉豆蔻科植物分类研究 [D]. 广州: 华南农业大学.
- 云南省植物研究所. 1977. 云南植物志 (第一卷) [M]. 北京: 科学出版社.
- 郑万钧. 1983. 中国树木志 (第一卷) [M]. 北京: 中国林业出版社.
- 中国植物志编辑委员会. 1979. 中国植物志 (第三十卷) [M]. 北京: 科学出版社.
- Wu Z Y, Raven P H, Hong D Y. 2008. Flora of China (Vol. 7) [M]. Beijing: Science Press.



琴叶风吹楠, 2009

第 5 章

琴叶风吹楠种子脂肪酸成分群体变异式样

5.1 引言

经典的植物分类学过去一直以植物形态学和植物地理学为基础，但是同一植物种在不同的时间和空间上都表现出高度的种内多样性，甚至同一无性系各分株间也会存在一定差异，形态学与区系学对一些群体的分类处理显得无能为力。一直以来，科学家们力求建立一个植物的自然分类系统，虽然取得了很大成绩，但是还远远不够，需要多学科配合、多方面寻找证据，相继建立了数量分类学、化学分类学、分子系统学等分枝学科。

现有理论认为亲缘关系相近的植物类群具有相似的化学成分，这个理论对新植物资源的寻找和开发提供了有效的指导，反过来也为植物分类系统的建立提供了部分依据。但是，植物的系统发育与其化学成分的关系极为复杂，它们之间没有绝对的相关性，具有相同化学成分的两个种很可能亲缘关系极遥远，亲缘关系极近的两个种化学成分也可能千差万别。亲缘关系与化学成分相关与否都可以在中草药中找到良好的例证。

本章从澜沧江流域天然林内采集琴叶风吹楠成熟种子，提取油脂，进行脂肪酸成分测定，分析各脂肪酸的相对含量及其群体变异式样。

5.2 研究方法

2009—2010 年 4—6 月的果实成熟季节从勐腊县、景洪市、双江县、澜沧县天然林内采集成熟果实剥出种子或者从地上拾取自然脱落的种子，新鲜种子在

36℃恒温条件下鼓风干燥后保存，分别于2009年7月和2010年8月提取油脂并进行脂肪酸成分测定。

种子种仁率测定：随机抓取完好的种子，用分析天平测量（精确到0.001g）种子重，然后手工去除种皮，测定种仁重。种仁率（%）=种仁重/种子重×100%。

种仁含油率测定：种仁含油率测定采用索氏提取法，参照GB 5512—1985粮食、油料检验粗脂肪测定法。以乙醚为溶剂，用电热恒温水浴加热回流（40℃），提取8小时，获得粗脂肪（许玉兰，2011）。种仁含油率（%）=粗脂肪重量/种仁重量×100%。

油脂甲酯化反应：种仁油脂甲酯化参照GB/T 17376—1998《动植物油脂 脂肪酸甲酯制备》中第5章“四碳或四碳以上脂肪酸甲酯的特殊制备方法”进行。取约20mg油样置于10mL玻璃离心管内，加入2mL正己烷浸泡约20min，再加入浓度为2mol/L的氢氧化钾甲醇溶液0.3mL，充分震荡2min，离心1min分层，取上层溶液直接进样进行GC/MS及GC分析。

脂肪酸成分测定：仪器采用美国Agilent Technologies公司HP6890GC/5973MS气相色谱-质谱联用仪；美国Agilent Technologies公司HP5890气相色谱仪。

气相色谱-质谱(GC/MS)条件：GC条件，HP-5MS石英毛细管柱（30mm×0.25mm×0.25μm），柱温120~240℃，程序升温3℃/min，柱流量为1.0mL/min，进样口温度250℃，柱前压100kPa，进样量0.20μL，分流比为10:1，载气为高纯氮气；MS条件，电离方式EI，电子能量70，传输线温度250℃，离子源温度230℃，四极杆温度150℃，质量范围35~450amu，采用wiley7n.l标准谱库，计算机检索定性（许玉兰，2010）。

气相色谱(GC)分析条件：HP-5石英毛细管柱（30mm×0.32mm×0.25μm）；柱温150~280℃，程序升温3℃/min；柱流量为1.5mL/min；进样口温度250℃；氢火焰检测器温度250℃；进样量1.0μL；分流比50:1；载气为高纯氮气。采用气相色谱峰面积归一化法计算各成分的相对含量（许玉兰，2010）。

种子处理工作在云南省热带作物科学研究所种质资源研究实验室完成，油脂提取在西南林业大学植物化学与西部植物资源持续利用国家重点实验室完成，脂肪酸成分测定委托中国科学院昆明植物研究所测试中心完成。

5.3 琴叶风吹楠种子种仁率与含油率的测定

测定了琴叶风吹楠 38 株树的种子种仁率（表 5-1），种仁率的变幅为 74.30%~86.78%，极差为 12.48%，平均种仁率为 84.11%；种仁率低于 80% 的有 4 株树，占 10.53%；种仁率 80% 以上的有 34 株树，占 89.47%。总体上看，琴叶风吹楠种子发育良好，种子饱满，具有较高的种仁率，株间差异不大。

测定了 39 株树的种仁含油率（图 5-1、图 5-2、表 5-1），含油率变幅为 52.48%~71.09%，平均含油率为 62.58%。其中大部分植株的种仁含油率在 60%~70% 之间，有 29 株，占 74.36%；低于 60% 的有 9 株，占 23.08%；高



图 5-1 琴叶风吹楠液体油脂（乙醚刚挥发完成，2009）



图 5-2 琴叶风吹楠固体油脂（静置于室温条件下，2009）

于 70% 的 1 株，占 2.6%。从总体上看，琴叶风吹楠种仁含油率比较高，但株间差异极显著 ($P < 0.01$)。将本研究中平均种仁含油率换算成平均种子含油率为 61.06%，结果与《中国植物志》(中国植物志编辑委员会, 1979) 记录的种子含油率 57.39%、《中国植物红皮书》的 56.18% (傅立国, 1991)、《中国油脂植物》的 56.2% (中国油脂植物编写委员会, 1987) 基本一致。

表 5-1 琴叶风吹楠种子种仁率及种仁含油率

植株编号	种仁率 /%	种仁含油率 /%	植株编号	种仁率 /%	种仁含油率 /%
20090301	83.55	57.53	20090505	86.44	60.86
20090303	81.50	58.93	20090506	86.52	62.15
20090304	83.45	52.48	20090507	86.30	63.61
20090308	83.08	58.97	20090508	86.46	65.93
20090309	83.52	55.48	20090509	85.09	64.32
20090310	86.72	61.84	20090510	86.62	63.06
20090402	76.18	63.19	20090511	86.75	62.15
20090403	78.23	56.39	20090512	86.44	62.61
20090404	85.29	65.24	20090513	85.07	66.31
20090405	82.50	67.41	20090601	85.63	63.55
20090406	84.20	65.72	20090602	85.45	65.50
20090407	84.01	65.05	20090603	86.09	65.87
20090408	85.97	64.53	20090604	85.49	67.69
20090409	83.54	60.09	20090605	86.35	71.09
20090413	79.84	66.09	20100401	85.29	59.00
20090414	79.59	61.72	20100402	74.30	59.92
20090415	85.65	67.60	20100403	83.28	61.94
20090502	84.03	61.93	20100404	85.69	57.05
20090503	85.14	61.23	20100501	/	61.66
20090504	86.78	64.97	平 均	84.11	62.58

5.4 琴叶风吹楠种子脂肪酸成分测定

GC/MS 检测到琴叶风吹楠所有单株的种子都含有的 18 种脂肪酸（图 5-3、图 5-4）。分别为：癸酸（10 : 0）、十二碳烯酸（12 : 1）、十二烷酸（12 : 0）、

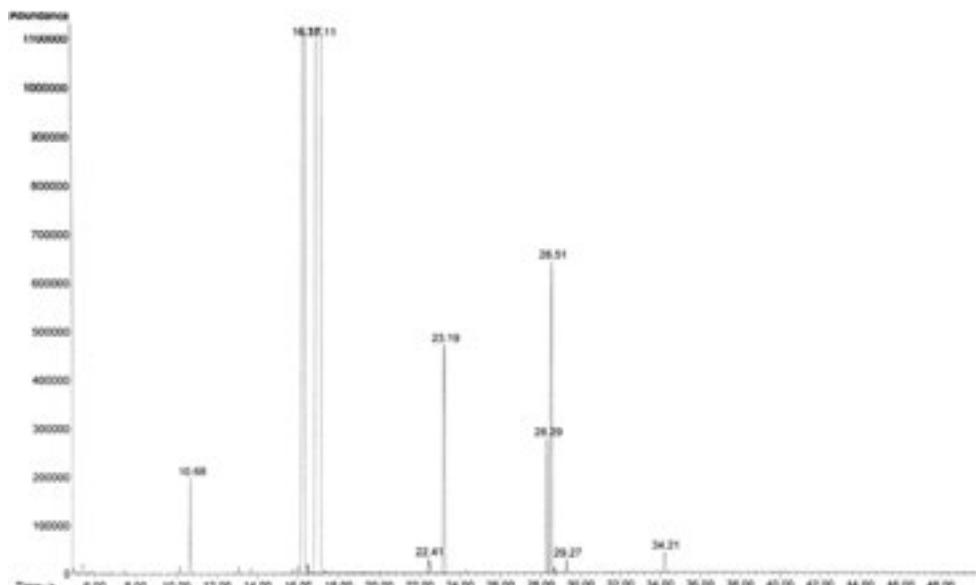


图 5-3 琴叶风吹楠种子脂肪酸测定之总离子流

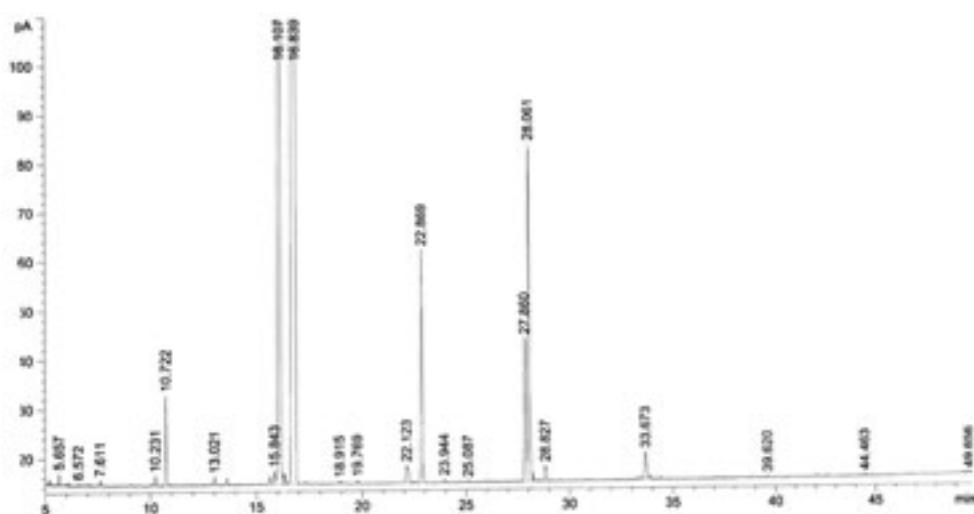
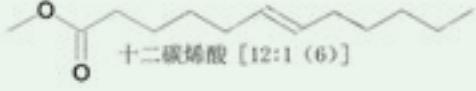
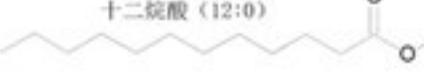
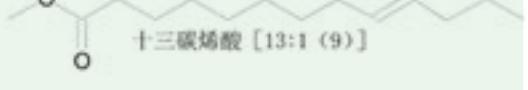
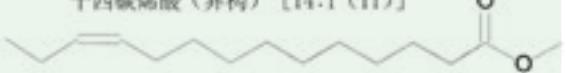


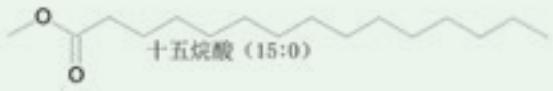
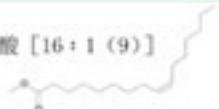
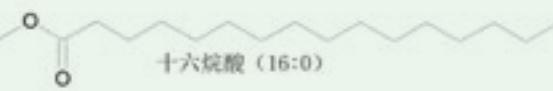
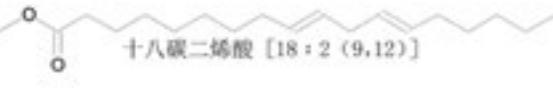
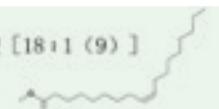
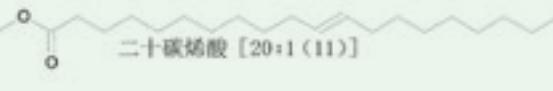
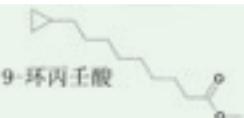
图 5-4 琴叶风吹楠种子脂肪酸测定之气相色谱

十三碳烯酸 (13 : 1)、十三烷酸 (13 : 0)、十四碳烯酸 (14 : 1)、十四烷酸 (14 : 0)、十五烷酸 (15 : 0)、十六碳烯酸 (16 : 1)、十六烷酸 (16 : 0)、十八碳二烯酸 (18 : 2)、十八碳烯酸 (18 : 1)、十八烷酸 (18 : 0)、二十碳烯酸 (20 : 1)、二十烷酸 (20 : 0)、二十二烷酸 (22 : 0)、二十四烷酸 (24 : 0)。测定过程中发现：十四碳烯酸 (14 : 1)、十八碳烯酸 (18 : 1) 存在异构体；另外，还发现 9- 环丙壬酸，但含量极低。各脂肪酸成分结构见表 5-2。

表 5-2 琴叶风吹楠脂肪酸成分及其结构式

序号	脂肪酸名称	结 构 式
1	癸酸, 10 : 0	
2	十二碳烯酸, 12 : 1 (6)	
3	十二烷酸, 12 : 0 (月桂酸)	
4	十三碳烯酸, 13 : 1 (9)	
5	十三烷酸, 13 : 0	
6	十四碳烯酸, 14 : 1 (9) 十四碳烯酸, 14 : 1 (11) (异构)	
7	十四烷酸, 14 : 0 (肉豆蔻酸)	

(续表)

序号	脂肪酸名称	结 构 式
8	十五烷酸, 15:0 (棕榈酸)	 十五烷酸 (15:0)
9	十六碳烯酸, 16:1 (9) (棕榈油酸)	 十六碳烯酸 [16:1 (9)]
10	十六烷酸, 16:0 (棕榈酸)	 十六烷酸 (16:0)
11	十八碳二烯酸, 18:2 (9, 12) (亚油酸)	 十八碳二烯酸 [18:2 (9, 12)]
12	十八碳烯酸, 18:1 (9) 十八碳烯酸, 18:1 (8) (异构体)	 十八碳烯酸 [18:1 (9)]
13	十八烷酸, 18:0 (硬脂酸)	 十八烷酸 (18:0)
14	二十碳烯酸, 20:1 (11)	 二十碳烯酸 [20:1 (11)]
15	二十烷酸, 20:0 (花生酸)	 二十烷酸 (20:0)
16	二十二烷酸, 22:0 (山嵛酸)	 二十二烷酸 (22:0)
17	二十四烷酸, 24:0 (木焦油酸)	 二十四烷酸 (24:0)
18	9-环丙壬酸	

5.5 琴叶风吹楠种子脂肪酸成分群体变异式样

将 39 株树的完全成熟种子脂肪酸测定值列于表 5-3，其中，十四碳烯酸含量变幅为 15.60%~27.21%，平均值为 20.15%；十四烷酸含量变幅为 60.93%~76.58%，平均值为 70.45%；十四碳酸总含量变幅为 88.14%~92.82%，平均值为 90.60%；十六烷酸含量变幅为 1.95%~2.83%，平均值为 2.31%；十八碳二烯酸含量变幅为 0.83%~1.78%，平均值为 1.20%；十八碳烯酸含量变幅为 2.51%~5.55%，平均值为 3.95%；其余 12 种脂肪酸含量均不足 1%，9-环丙壬酸含量极低，未测定相对含量。

十四碳烯酸和十四烷酸的含量呈此消彼长的态势，且消长量相当，以 39 株树的数据进行相关性分析，这两组数据呈极显著负相关 ($P < 0.001$)，相关系数为 -0.981 04 (图 5-5)。总十八碳酸含量株间变幅为 3.59%~7.28%，平均值为 5.34%，变异较大。十八碳烯酸与十八烷酸的含量呈显著正相关 ($P < 0.05$)，相关系数为 0.640 19；十八烷酸、十八碳烯酸、十八碳二烯酸三者的含量表现为不同程度的正相关。总十四碳酸与总十六碳酸呈负相关，但不显著；总十六碳酸与总十八碳酸呈正相关，但不显著。总十四碳酸与总十八碳酸之和的株间变幅为 95.32%~96.76%，平均值为 95.94%，基本无差异；两者的变化此消彼长，呈极显著负相关 ($P < 0.001$)，相关系数为 -0.984 53。

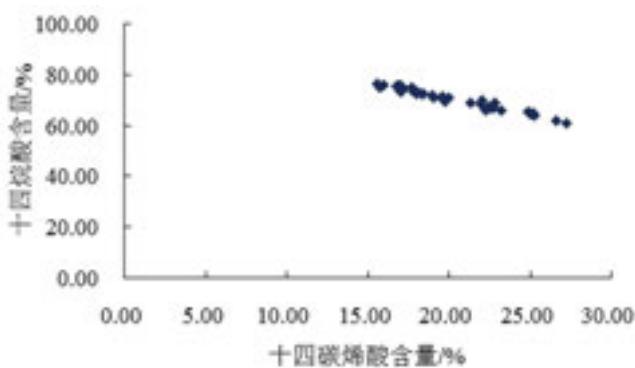


图 5-5 十四烷酸与十四碳烯酸含量的变化相关性

%

表 5-3 琴叶风吹楠种子油脂肪酸成分相对含量

植株编号	20090301	20090303	20090304	20090308	20090309	20090310	20090402	20090403	20090404	20090405	20090406
癸酸	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
十二碳烯酸	0.07	0.03	0.05	0.05	0.06	0.05	0.04	0.04	0.04	0.06	0.01
十二烷酸(月桂酸)	0.60	0.46	0.49	0.55	0.64	0.87	0.53	0.49	0.62	0.66	0.52
十三碳烯酸	0.06	0.06	0.06	0.08	0.07	0.07	0.07	0.05	0.06	0.08	0.06
十三烷酸	0.05	0.06	0.05	0.05	0.04	0.11	0.04	0.04	0.06	0.04	0.04
十四碳烯酸	21.93	23.20	21.37	27.21	26.64	16.83	22.30	22.77	19.99	25.26	22.42
十四烷酸(肉豆蔻酸)	68.57	65.97	68.87	60.93	61.66	75.48	65.99	66.60	70.86	63.94	67.17
十四碳酸总量(上2类)	90.50	89.17	90.24	88.14	88.30	92.31	88.29	89.37	90.85	89.20	89.59
十五烷酸	0.03	0.04	0.04	0.02	0.02	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03
十六碳烯酸	0.24	0.29	0.30	0.29	0.31	0.20	0.28	0.30	0.23	0.27	0.26
十六烷酸(棕榈酸)	2.37	2.64	2.70	2.08	2.30	1.95	2.26	2.59	2.22	2.24	2.22
十八碳二烯酸(亚油酸)	1.62	1.50	1.48	1.78	1.44	0.98	1.02	1.04	1.31	1.75	1.12
十八碳烯酸	3.36	4.77	3.51	5.24	5.55	2.71	5.51	4.95	3.60	4.63	5.14
十八烷酸(硬脂酸)	0.18	0.30	0.20	0.19	0.29	0.17	0.50	0.26	0.21	0.17	0.22
二十碳烯酸	0.34	0.41	0.36	0.81	0.68	0.33	0.59	0.53	0.42	0.57	0.59
二十烷酸	0.01	0.03	0.01	0.02	0.07	0.03	0.14	0.05	0.04	0.03	0.04
二十二烷酸	0.03	0.04	0.04	0.02	0.03	0.02	0.06	0.03	0.02	0.03	0.02
二十四烷酸	0.04	0.04	0.06	0.01	0.03	0.03	0.05	0.03	0.02	0.02	0.03

(续表)

植株编号	20090407	20090408	20090409	20090413	20090414	20090415	20090502	20090503	20090504	20090505	20090506
癸酸	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02
十二碳烯酸	0.07	0.06	0.04	0.07	0.07	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03
十二烷酸(月桂酸)	0.93	0.65	0.59	0.60	0.54	0.63	0.68	0.67	0.56	0.69	0.75
十三碳烯酸	0.06	0.06	0.07	0.07	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.08	0.06
十三烷酸	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.07	0.06	0.07	0.06	0.10	0.07
十四碳烯酸	19.80	22.08	25.00	25.18	24.91	16.98	17.10	17.12	17.78	17.10	16.90
十四烷酸(肉豆蔻酸)	69.45	69.90	64.44	64.82	65.08	73.45	73.58	74.81	73.48	75.44	75.92
十四碳酸总量(上2类)	89.25	91.98	89.44	90.00	89.99	90.43	90.68	91.93	91.26	92.54	92.82
十五烷酸	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03
十六碳烯酸	0.22	0.26	0.25	0.28	0.29	0.23	0.20	0.21	0.21	0.19	0.18
十六烷酸(棕榈酸)	2.29	2.19	2.19	2.32	2.37	2.39	2.36	2.30	2.40	2.19	2.12
十八碳二烯酸(亚油酸)	1.56	0.91	1.38	1.13	1.15	1.20	1.43	0.99	1.09	1.10	0.98
十八碳烯酸	4.34	3.28	4.73	4.70	4.60	3.88	3.61	3.09	3.60	2.54	2.51
十八烷酸(硬脂酸)	0.22	0.14	0.24	0.15	0.15	0.20	0.21	0.14	0.15	0.10	0.10
二十碳烯酸	0.66	0.25	0.64	0.46	0.42	0.46	0.38	0.23	0.28	0.15	0.18
二十烷酸	0.06	0.02	0.07	0.03	0.02	0.04	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01
二十二烷酸	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
二十四烷酸	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02

(续表)

植株编号	20090507	20090508	20090509	20090510	20090511	20090512	20090513	20090601	20090602	20090603	20090604
癸酸	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
十二碳烯酸	0.02	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.04	0.02	0.02
十二烷酸(月桂酸)	0.60	0.70	0.65	0.62	0.58	0.64	0.56	0.78	0.71	0.59	0.57
十三碳烯酸	0.05	0.08	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04	0.05
十三烷酸	0.07	0.10	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.06	0.05	0.05	0.07
十四碳烯酸	15.60	17.73	18.33	19.55	16.02	19.03	18.11	18.43	18.97	17.13	16.79
十四烷酸(肉豆蔻酸)	76.58	74.95	72.42	71.00	75.63	71.04	72.73	72.61	71.97	74.53	75.25
十四碳酸总量(上2类)	92.18	92.68	90.75	90.55	91.65	90.07	90.84	91.04	90.94	91.66	92.04
十五烷酸	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04
十六碳烯酸	0.19	0.20	0.26	0.26	0.21	0.22	0.20	0.22	0.22	0.19	0.20
十六烷酸(棕榈酸)	2.40	2.16	2.57	2.30	2.33	2.17	2.16	2.11	2.20	2.21	2.32
十八碳二烯酸(亚油酸)	0.85	1.03	1.08	1.31	0.85	1.28	1.12	1.03	1.09	0.90	1.01
十八碳烯酸	3.00	2.54	3.83	4.11	3.47	4.21	3.80	3.72	3.94	3.54	3.55
十八烷酸(硬脂酸)	0.14	0.10	0.20	0.18	0.18	0.26	0.23	0.21	0.17	0.16	0.16
二十碳烯酸	0.22	0.16	0.33	0.42	0.32	0.64	0.55	0.44	0.36	0.42	0.41
二十烷酸	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.09	0.07	0.05	0.02	0.03	0.03
二十二烷酸	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
二十四烷酸	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02

(续表)

	植株编号	20090605	20100401	20100402	20100403	20100404	20100501	平均值	变异幅度
癸酸	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01~0.03
十二碳烯酸	0.02	0.05	0.03	0.04	0.02	0.02	0.04	0.04	0.01~0.07
十二烷酸(月桂酸)	0.55	0.61	0.68	0.44	0.52	0.58	0.62	0.62	0.44~0.93
十三碳烯酸	0.09	0.06	0.05	0.05	0.04	0.05	0.06	0.06	0.04~0.09
十三烷酸	0.05	0.06	0.06	0.04	0.06	0.05	0.05	0.06	0.04~0.11
十四碳烯酸	18.07	22.87	19.64	22.63	15.71	21.36	20.15	20.15	15.60~27.21
十四烷酸(肉豆蔻酸)	72.28	68.67	71.33	66.69	74.78	68.72	70.45	70.45	60.93~76.58
十四碳酸总量(上2类)	90.35	91.54	90.97	89.32	90.49	90.08	90.60	90.60	88.14~92.82
十五烷酸	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02~0.04
十六碳烯酸	0.22	0.3	0.24	0.29	0.29	0.25	0.25	0.24	0.18~0.31
十六烷酸(棕榈酸)	2.36	2.28	2.24	2.5	2.83	2.23	2.31	2.31	1.95~2.83
十八碳二烯酸(亚油酸)	1.16	1.19	1.15	1.55	0.83	1.24	1.20	1.20	0.83~1.78
十八碳烯酸	4.39	3.18	3.85	4.57	3.99	4.35	3.95	3.95	2.51~5.55
十八烷酸(硬脂酸)	0.17	0.21	0.19	0.22	0.34	0.24	0.20	0.20	0.10~0.50
二十碳烯酸	0.52	0.32	0.39	0.51	0.36	0.59	0.43	0.43	0.15~0.81
二十烷酸	0.03	0.02	0.02	0.04	0.04	0.06	0.04	0.04	0.01~0.14
二十二烷酸	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01~0.06
二十四烷酸	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01~0.06

5.6 小结

对琴叶风吹楠39株树的种子分析表明,种仁含油率变幅为52.84%~71.09%,平均为62.58%,含油率介于60%~70%之间的植株占74.36%,种仁含油率的株间差异极显著($P < 0.01$),这些结果与文献报道基本一致。油脂中共检测到17种常见脂肪酸,其中十四碳酸的相对含量占绝对优势,变幅为88.14%~92.82%,其中十四烷酸占60.93%~76.58%,十四碳烯酸占15.60%~27.21%。十二碳酸含量为0.48%~1.00%。脂肪酸成分和含量与文献报道的差异较大,主要表现在文献报道月桂酸(十二烷酸)含量39.60%(李延辉,1980;云南省热带植物研究所,1973),而本研究中月桂酸含量不足1%。

琴叶风吹楠种子脂肪酸成分相对含量在群体内表现出一定程度的变异,但是差异均不显著。其中,十四碳酸总含量为88.14%~92.82%,具有高度稳定性。十四碳酸含量占绝对优势,可以作为化学分类学的重要指标之一。研究表明,二十碳以下的脂肪酸在碳链长度上与理想的生物柴油组分接近,是比较理想的生物柴油原料(顾子霞,2009),琴叶风吹楠可以作为生物能源原料植物的后备树种之一。

参考文献

- 傅立国. 1991. 中国植物红皮书(第一册)[M]. 北京: 科学出版社.
- 顾子霞, 吴宝成, 吴林园, 等. 2009. 江苏3种大戟属野生植物总脂含量及脂肪酸组分分析[J]. 林产化学与工业, 29(4): 63-66.
- 李延辉, 王惠英, 李德厚, 等. 1980. 肉豆蔻科植物种子油的化学成分研究[J]. 热带植物研究, (15): 21-23.
- 许玉兰, 吴裕, 易小泉, 等. 2011. 珍稀油料植物琴叶风吹楠种子性状及含油率的变异分析[J]. 安徽农业科学, 39(6): 3426-3428.
- 许玉兰, 吴裕, 张夸云, 等. 2010. 珍稀油料树种琴叶风吹楠种子含油量及脂肪酸成分分析[J]. 贵州农业科学, 38(7): 163-166.
- 云南省热带植物研究所(资源组、化学组). 1973. 云南热区十四碳脂肪酸植物资源调查[J]. 云南植物研究, (3): 9-15.
- 中国油脂植物编写委员会. 1987. 中国油脂植物[M]. 北京: 科学出版社.
- 中国植物志编辑委员会. 1979. 中国植物志(第三十卷)[M]. 北京: 科学出版社.



西南林业大学实验室外景，2009



西南林业大学实验室内景，2009



第 6 章

琴叶风吹楠种子主要脂肪酸成分的消长规律

6.1 引言

第 5 章已经分析了琴叶风吹楠种子脂肪酸成分的群体变异式样，分析结果与文献报道差异太大。文献报道，云南野生琴叶风吹楠种子油的十二烷酸（12:0）相对含量为 39.60%，十四烷酸（14:0）为 52.20%；风吹楠 (*Horsfieldia amygdalina*) 的分别为 41.16% 和 49.29%；滇南风吹楠 (*H. tetraptera*) 的分别为 41.54% 和 39.09%（李延辉等，1980；云南省热带植物研究所，1973）。据第 5 章中的研究数据，琴叶风吹楠种子十四烷酸相对含量为 60.93%~76.58%，十二烷酸的不足 1%，但十四碳烯酸（14:1）的为 15.60%~27.21%，这个结果与文献报道差异太大；据本课题组的研究结果，风吹楠和滇南风吹楠的主要脂肪酸相对含量与文献报道基本一致（胡永华，2010；许玉兰，2010；许玉兰，2012），将在以后章节分别讨论。两个物种的研究数据基本一致，而 1 个物种的研究数据相差甚远。

油脂的形成受遗传和环境共同作用，不同单株间的遗传差异以及居群间的综合性差异、年际间降水量差异和气温差异、种子成熟度差异、种子储藏时间的差异等都可能造成脂肪酸测定数据的差异。推测，导致差异如此悬殊的原因有两种可能：抽样误差或仪器误差。

种子油脂原料的来源归根结底还是光合作用的产物。油脂不溶于水或微溶于水，在树体内“长途”运输很不可能，所以油脂应该在储存器官内合成，琴叶风吹楠的油脂合成器官应该是种子，油脂形成的时间段主要集中在果实或种子趋近

成熟的时期，脂肪酸的合成和分解都是一个动态的变化过程。

种内遗传多样性是导致研究结果差异的原因之一，但是从2009年测定34株树和2010年测定5株树的数据看，可以排除遗传差异的原因。所以本章主要分析同植株不同年份间和不同成熟度种子间的差异，结合群体变异数据，综合分析脂肪酸成分的消长规律，对化学分类学和种子采收利用都有一定意义。

6.2 研究方法

针对5株树（编号为20090304、20090305、20090310、20090402、20090403），以假种皮顶端开始微红（假种皮是从顶端向底部逐渐变红）为第一阶段采摘果实，以后每7d采果一次，直到果实完全成熟，采摘果实人工剥出种子，保证种子不受伤害。针对5株树（编号为20090308、20090310、20090402、20090403、20090511），于2009、2010和2014年分别从树下拾取自然成熟脱落的新鲜种子。对3株树（编号为20090310、20090402、20090508）于2009年从树下拾取自然成熟脱落的新鲜种子，干燥后常温贮藏，于2009年7月、2009年11月、2014年7月和2017年7月测定脂肪酸含量。按第5章的方法进行干燥处理、油脂提取和脂肪酸测定。根据第5章的数据和本章的测定数据，只有十四碳酸、十六碳酸和十八碳酸的含量较高，其余脂肪酸的含量极低，因而下面以含量较高的这3类脂肪酸分析其变化规律。

6.3 琴叶风吹楠不同成熟度种子脂肪酸成分的变化

本研究从假种皮顶端开始微红为第一阶段采果，以后每7d采果一次，到果实完全成熟共采摘了4个阶段的果实，并对5株树的种子进行油脂测定。结果表明，第一阶段种子尚未成熟，假种皮为白色，种仁含油率为39.17%~50.92%。从第二阶段到第四阶段（完全成熟）假种皮已变为红色，种仁含油率变化不明显，但是比第一阶段的含油率显著增加($P < 0.01$)，第四阶段与第一阶段相比含油率增加量为8.44%~18.36%。随着假种皮逐渐变红，种子也趋近成熟，油脂合成总量已基本达到高峰。

脂肪酸测定结果表明（表6-1），第一阶段采种时，有4株树的种子成熟度基本一致，十四碳烯酸相对含量为22.12%~28.61%，十四烷酸为62.31%~67.27%，十四碳酸总含量为85.40%~89.99%；第四阶段采种时，十四碳烯酸相对含

表 6-1 琴叶风吹楠相同植株不同成熟度种子脂肪酸成分含量

脂肪酸成分	20090402				20090403				20090310				20090304				20090305			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)		
癸酸(10 : 0)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03		
十二碳烯酸(12 : 1)	0.06	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.03	0.03	0.06	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.16		
十二烷酸(12 : 0)	0.58	0.46	0.58	0.60	0.50	0.55	0.47	0.53	0.35	0.60	0.55	0.39	0.39	0.49						
十三碳烯酸(13 : 1)	0.06	0.07	0.06	0.06	0.07	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.08						
十三烷酸(13 : 0)	0.04	0.03	0.04	0.05	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.03	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.01			
十四碳烯酸(14 : 1)	22.12	23.27	21.30	19.69	26.15	20.45	20.59	18.63	28.61	21.93	22.72	21.37	36.64							
十四烷酸(14 : 0)	65.63	64.01	66.78	69.18	62.31	69.93	69.11	71.38	56.79	68.57	67.27	68.87	46.10							
十四碳酸总量(上 2 类)	87.75	87.28	88.08	88.87	88.46	90.38	89.7	90.01	85.4	90.5	89.99	90.24	82.74							
十五烷酸(15 : 0)	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03			
十六碳烯酸(16 : 1)	0.32	0.32	0.31	0.29	0.30	0.25	0.30	0.25	0.49	0.24	0.35	0.30	0.41							
十六烷酸(16 : 0)	3.03	3.05	2.94	2.95	2.53	2.49	2.78	2.64	3.46	2.37	2.77	2.70	2.68							
十八碳二烯酸(18 : 2)	1.04	1.03	0.99	0.85	1.24	0.95	1.01	0.97	1.91	1.62	1.28	1.48	2.64							
十八碳烯酸(18 : 1)	5.73	6.13	5.63	5.14	5.74	4.39	4.76	4.47	6.98	3.36	3.98	3.51	8.36							
十八烷酸(18 : 0)	0.45	0.58	0.45	0.37	0.3	0.21	0.23	0.24	0.34	0.18	0.24	0.20	0.27							
二十碳烯酸(20 : 1)	0.48	0.57	0.49	0.40	0.53	0.41	0.37	0.46	0.55	0.34	0.32	0.36	1.04							
二十烷酸(20 : 0)	0.08	0.11	0.07	0.06	0.05	0.03	0.03	0.04	0.04	0.01	0.02	0.01	0.08							
二十二烷酸(22 : 0)	0.06	0.06	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.05	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05							
二十四烷酸(24 : 0)	0.07	0.06	0.04	0.02	0.02	0.02	0.07	0.04	0.04	0.04	0.06	0.12								

注：由于天气原因，部分种子样品未采集到；(1) 未成熟，(2) 接近成熟，(3) 接近成熟，(4) 完全成熟。

量为 18.63%~21.93%，十四烷酸为 68.57%~71.38%，十四碳酸总含量为 88.87%~90.24%；第二阶段与第三阶段相比，测定数据相似，介于第一阶段和第四阶段之间。分析含油率和十四碳酸总含量的数据表明，随着假种皮逐渐变红，十四碳酸的碳链合成已基本完成。第二阶段与第三阶段测定数据相似，主要因为种子成熟期较短（约 20d），此期间两次采集种子的成熟度差异不大，所以将第二阶段和第三阶段采摘的种子判定为接近成熟（表 6-1）。另外，20090305 号第一阶段采种时，其种子比另外 4 株树的种子更嫩，测定结果十四碳烯酸为 36.64%，十四烷酸为 46.10%，十四碳酸总量为 82.74%，符合脂肪酸含量的变化规律，可惜没有采集到该株的成熟种子。

根据表 6-1 的数据，随着种子逐渐成熟，十四碳烯酸含量规律性下降，而十四烷酸含量规律性递增，两者增减量相差不大，也就是十四碳烯酸正不断转化为十四烷酸；十四碳酸总含量呈逐渐增加的趋势，但变化不大；十八碳二烯酸和十八碳烯酸的含量呈下降趋势，但十八烷酸的含量未见增加，十八碳酸的总量逐渐下降。十四碳酸含量与十八碳酸含量呈此消彼长的态势，且消长量相当。

据报道，随着种子成熟，花生 (*Arachis hypogaea*) 含油率增加，主要脂肪酸为油酸 (18:1) 和亚油酸 (18:2)，两者总含量约占 80% (李晓丹, 2009；李兰, 2012)；越南安息香 (*Styrax tonkinensis*) 种仁脂肪酸主要为亚油酸 (18:2)，其次为油酸 (18:1)，十八碳酸总含量为 88% 以上 (石从广, 2013)；麻疯树 (*Jatropha curcas*) 种仁脂肪酸主要为亚油酸，其次为油酸，十八碳酸总含量为 80% 以上 (陈姹月, 2012)。随着种子成熟，其他脂肪酸逐渐转化为相对稳定的不饱和脂肪酸，既贮藏更多能量，又保持化学稳定，这是许多植物种子的脂肪酸成分变化规律；琴叶风吹楠以十四烷酸为主，保存一定量的十四碳烯酸，以维持化学稳定性。

有研究表明，脂肪酸合成途径是先生成饱和脂肪酸，然后在去饱和酶的作用下形成烯酸，以贮存更多的能量，去饱和酶的活性除了受植物自身基因表达调控外还可能受环境的影响 (戴晓峰, 2007)。琴叶风吹楠种子在成熟过程中，十四碳烯酸不断转化为十四烷酸，是一种释放能量的过程，这种“反方向”转化的机理有待研究。

研究数据表明，十四碳酸含量增加的同时，十八碳酸的含量下降。形成这种数据差异的原因可能有两个：一种可能是十四碳酸不断合成，绝对含量升高，从

而降低了十八碳酸的相对含量；另一种可能是十八碳酸在分解，十四碳酸在合成，但是本研究没有测定中间产物，没有直接证据，还有待研究。

6.4 琴叶风吹楠种子脂肪酸成分在不同年份间的变化

将5株树于2009、2010和2014年采集的种子测定结果统计于表6-2。结果表明，5株树的种子十四碳酸含量年际间的变幅为86.06%~92.31%，同株的年际差异为1.49%~4.26%，差异极小，在年际间具有良好的稳定性；5株树年际间十四碳烯酸的变化量为1.32%~9.19%，十四烷酸为1.77%~8.44%，十四碳烯酸与十四烷酸含量呈此消彼长的态势，且消长量差异不大。说明气候环境对总十四碳酸相对含量的影响较小，但是明显影响十四碳烯酸向十四烷酸转化的程度。十六碳酸含量年际间变幅为2.15%~2.98%，同株的年际差异为0.09%~0.48%。十八碳酸含量年际间变幅为3.86%~7.21%，同株的年际差异为1.21%~1.70%。同株树种子各脂肪酸含量的年际差异极小，具有良好的稳定性。5株树的株间差异大于同株的年际差异，说明脂肪酸成分的相对含量主要由植株本身遗传因素和地域环境所决定，不同年份间的气候差异会有少量的影响。

结合第5章的数据，39株树成熟种子十四碳酸的总含量株间变幅为88.14%~92.82%，平均值为90.60%，变化极小，十四碳烯酸和十四烷酸的含量此消彼长，且消长量相当，这两组数据呈极显著负相关($P < 0.001$)，相关系数为-0.98104。同株树不同年份间以及同一年份不同单株间，十四碳酸总含量具有高度稳定性，只是十四碳烯酸向十四烷酸转化的程度不一致，这可能与地域环境以及年际间降水和气温等差异导致植物内源激素的变化有关，至于是什么原因影响其转化程度还有待进一步研究。

6.5 琴叶风吹楠干种子在贮藏过程中脂肪酸成分的变化

选择3个地点3株树(20090310、20090402、20090508)于2009年采收种子，干燥处理后，室温通风干燥环境下贮藏，分别于2009年7月、2009年11月、2014年7月、2017年7月测定其脂肪酸成分及含量。测定结果列于表6-3。根据表6-3的数据，再结合气相色谱图和总离子流图的判别，种子贮藏了8年，脂肪酸成分同样是原有的17种。

贮藏5年时，样本20090508的十四碳烯酸下降量为2.8%，十四烷酸增加

/%

表 6-2 琴叶风吹楠同株不同年份的种子脂肪酸成分及含量

脂肪酸成分	20090308						20090310						20090402						20090403						
	2009	2010	2014	2009	2010	2014	2009	2010	2014	2009	2010	2014	2009	2010	2014	2009	2010	2014	2009	2010	2014	2009	2010	2014	
癸酸(10:0)	0.02	0.02	0.11	0.02	0.02	0.02	0.07	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	
十二碳烯酸(12:1)	0.05	0.06	0.03	0.05	0.03	0.07	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	
十二烷酸(12:0)	0.55	0.78	4.38	0.87	0.64	0.62	0.53	0.56	1.16	0.49	0.53	0.43	0.58	0.71	0.71	0.62									
十三碳烯酸(13:1)	0.08	0.08	0.05	0.07	0.05	0.06	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06		
十三烷酸(13:0)	0.05	0.06	0.07	0.11	0.06	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
十四碳烯酸(14:1)	27.21	22.65	18.02	16.83	18.41	23.78	22.3	20.98	21.21	22.77	18.63	19.61	16.02	18.51	22.29										
十四烷酸(14:0)	60.93	67.67	68.04	75.48	73.09	67.04	65.99	67.76	66.01	66.6	71.38	68.88	75.63	73.38	67.99										
十四碳酸总量 (上2类)	88.14	90.32	86.06	92.31	91.50	90.82	88.29	88.74	87.22	89.37	90.01	88.49	91.65	91.89	90.28										
十五烷酸(15:0)	0.02	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	
十六碳烯酸(16:1)	0.29	0.24	0.23	0.20	0.25	0.29	0.28	0.27	0.24	0.30	0.25	0.25	0.27	0.21	0.21	0.25									
十六烷酸(16:0)	2.08	2.22	2.43	1.95	2.38	2.14	2.26	2.67	2.58	2.59	2.64	2.71	2.33	2.35	2.33										
十八碳二烯酸(18:2)	1.78	1.45	1.34	0.98	1.07	1.43	1.02	0.96	1.21	1.04	0.97	1.05	0.85	1.02	1.49										
十八碳烯酸(18:1)	5.24	3.90	4.01	2.71	3.24	3.51	5.51	5.35	5.39	4.95	4.47	5.52	3.47	2.93	3.74										
十八烷酸(18:0)	0.19	0.16	0.22	0.17	0.24	0.15	0.50	0.40	0.49	0.26	0.24	0.32	0.18	0.16	0.16										
二十碳烯酸(20:1)	0.81	0.51	0.53	0.33	0.27	0.38	0.59	0.54	0.80	0.53	0.46	0.59	0.32	0.27	0.47										
二十烷酸(20:0)	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.14	0.07	0.16	0.05	0.04	0.07	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	
二十二烷酸(22:0)	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.06	0.05	0.07	0.03	0.02	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	
二十四烷酸(24:0)	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.02	0.05	0.04	0.06	0.03	0.02	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	

/%

表 6-3 处理不同时期琴叶风吹楠种子的脂肪酸成分及含量

脂肪酸成分	20090310				20090402				20090508			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
癸酸(10 : 0)	0.02	0.02	0.02	/	0.02	0.02	0.01	/	0.02	0.02	0.01	0.01
十二碳烯酸(12 : 1)	0.05	0.04	0.03	/	0.04	0.05	0.04	/	0.04	0.04	0.03	0.03
十二烷酸(12 : 0)	0.87	0.69	0.73	0.74	0.53	0.49	0.39	0.49	0.70	0.77	0.80	0.80
十三碳烯酸(13 : 1)	0.07	0.07	0.06	/	0.07	0.09	0.06	/	0.08	0.07	0.05	0.05
十三烷酸(13 : 0)	0.11	0.07	0.08	0.11	0.04	0.04	0.03	0.04	0.10	0.08	0.06	0.06
十四碳烯酸(14 : 1)	16.83	23.65	17.28	22.08	22.30	26.99	21.85	19.28	17.73	19.23	14.93	14.93
十四烷酸(14 : 0)	75.48	66.90	73.47	68.88	65.99	57.54	65.62	70.33	74.95	72.50	77.23	77.23
十四碳酸总量(上 2 类)	92.31	90.55	90.75	90.96	88.29	84.53	87.47	89.61	92.68	91.73	92.16	92.16
十五烷酸(15 : 0)	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03
十六碳烯酸(16 : 1)	0.20	0.27	0.23	0.28	0.28	0.36	0.29	0.23	0.20	0.24	0.17	0.17
十六烷酸(16 : 0)	1.95	2.17	2.18	2.11	2.26	3.00	2.93	2.55	2.16	2.27	2.21	2.21
十八碳二烯酸(18 : 2)	0.98	1.43	1.10	1.19	1.02	1.33	1.06	0.90	1.03	1.08	0.82	0.82
十八碳烯酸(18 : 1)	2.71	3.72	3.65	3.58	5.51	7.81	5.89	4.68	2.54	2.88	2.50	2.50
十八烷酸(18 : 0)	0.17	0.16	0.20	0.16	0.50	0.63	0.54	0.44	0.10	0.12	0.12	0.12
二十碳烯酸(20 : 1)	0.33	0.44	0.40	0.33	0.59	0.86	0.66	0.51	0.16	0.25	0.21	0.21
二十烷酸(20 : 0)	0.03	0.02	0.04	0.02	0.14	0.17	0.13	0.12	0.01	0.02	0.01	0.01
二十二烷酸(22 : 0)	0.02	0.03	0.02	0.01	0.06	0.09	0.06	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01
二十四烷酸(24 : 0)	0.03	0.03	0.03	0.02	0.05	0.08	0.05	0.03	0.02	0.04	0.03	0.03

注：(1) 2009 年 7 月测定；(2) 2009 年 11 月测定；(3) 2014 年 7 月测定；(4) 2017 年 7 月测定；“/”表示未测到相对含量值。

量为 2.28%，另外两份样本变化量甚微；十四碳酸总含量普遍下降，下降量为 0.52%~1.56%。由于十四碳烯酸和十四烷酸含量占绝对优势，因而这种变化量可以忽略不计。十六碳酸总含量普遍增加，增加量为 0.02%~0.68%；十八碳酸总含量在样本 20090508 中下降量为 0.23%，而在样本 20090310 和 20090402 中增加量为 1.09% 和 0.46%；其余脂肪酸含量极低，数据变化不明显。十四碳烯酸、十四烷酸、十六烷酸和十八碳烯酸总含量为 96.06%~97.38%。

于 2017 年 7 月（贮藏 8 年）测定了 20090310 和 20090402 的种子油脂，虽然每种脂肪酸成分相对含量都有所变化，总体上看，还是保持了良好的稳定性。

在种子贮藏 4 个月时（2009 年 11 月），十四烷酸的含量明显减少，十四碳烯酸和十八碳烯酸含量却明显增加（蔡年辉，2011）。分析原始数据发现（表 6-3），十四烷酸下降量为 2.45%~8.58%，十四碳烯酸增加量为 1.5%~6.82%，十四碳酸总下降量为 0.95%~3.76%；十六碳酸总增加量为 0.14%~0.82%；十八碳酸总增加量为 1.41%~2.74%；十四碳烯酸、十四烷酸、十六烷酸和十八碳烯酸总含量为 95.34%~97.38%。

结合 4 次测定数据看，十四碳酸总含量基本保持不变，而十四碳烯酸和十四烷酸的含量差异很可能由于种子抽样误差和测定误差导致。总体上看，琴叶风吹楠种子在贮藏过程中，脂肪酸成分和相对含量保持了良好的稳定性。至于贮藏 4 个月时，十四烷酸明显减少而十四碳烯酸明显增加的原因需要进一步研究。

6.6 小结与讨论

本研究表明，琴叶风吹楠假种皮为白色是种子未成熟的标志，此时种仁含油率极显著低于成熟种子的含油率 ($P < 0.01$)；随着假种皮逐渐变红，种子趋近成熟，油脂积累量已达到高峰，一直到种子完全成熟，含油率基本保持稳定。但是，在种子逐渐成熟的过程中，脂肪酸含量发生了规律性的变化。

在种子成熟过程中，十四碳烯酸不断转化为十四烷酸，但是在同株树年际间和群体内单株间的转化程度不一致。在种子贮藏（8 年）过程中，各脂肪酸成分相对含量保持了高度稳定性。另外，在研究过程中，以乙醚为溶剂或者以沸程为 30~60℃ 和 60~90℃ 的两种石油醚为溶剂所提取的油脂成分和相对含量无差异。

据前人的研究报道，琴叶风吹楠种子油的十二烷酸相对含量为 39.60%，十四烷酸为 52.20%，未检出十四碳烯酸（李延辉，1980；云南省热带植物研究

所, 1973)。本研究的所有样品中十二烷酸含量均低于 1%, 而十四碳烯酸含量均在 15% 以上, 十四烷酸含量基本一致。针对这种差异, 第 5 章群体变异式样的数据可以排除遗传多样性的原因, 本章研究数据可以排除种子成熟度差异、年际差异、贮藏时间差异和溶剂差异等原因。总之, 导致这种差异的原因不是来自抽样误差。本研究中, 脂肪酸成分测定由中国科学院昆明植物研究所测试中心完成, 而且是多样品多年份的测定, 我们应承认其测定结果的可靠性。前人的研究时间是 20 世纪 70 年代, 可能仪器不够精密而导致脂肪酸成分判别错误是真正的原因。

同一株树的种子不是同时成熟, 即同一阶段采集的种子存在成熟度差异, 所以每个阶段测定的数据只能算是良好的近似值, 反映共同的变化趋势。另外, 分阶段采集种子, 同一时间测定成分, 贮藏时间有长短差异。种子贮藏 4 个月后, 十四碳酸含量下降 0.95%~3.76%, 十四碳烯酸含量升高 1.50%~6.82%, 十四烷酸含量下降 2.45%~8.58%; 第一阶段采集种子时间与第四阶段的时间相差 20 天左右, 假设含量是匀速变化, 20 d 的变化量应分别为 0.16%~0.63%, 0.25%~1.14%, 0.41%~1.43%, 这远远小于第一阶段到第四阶段的测定变化量。所以本研究中, 不同成熟度种子测定值能反映琴叶风吹楠种子脂肪酸成分变化的客观规律。第一阶段的种子虽然未成熟, 但已即将成熟, 至于更嫩种子的脂肪酸成分没有测定。

参考文献

- 蔡年辉, 许玉兰, 吴裕, 等. 2011. 贮藏对琴叶风吹楠脂肪酸含量及成分的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 31 (11): 85-89.
- 陈姹月, 唐琳, 陈放. 2012. 7 种木本植物油理化性质及其生物柴油脂肪酸组成的比较研究 [J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 37 (12): 88-92.
- 戴晓峰, 肖玲, 武玉花, 等. 2007. 植物脂肪酸去饱和酶及其编码基因研究进展 [J]. 植物学通报, 24 (1): 105-113.
- 胡永华, 吴裕, 许玉兰, 等. 2010. 风吹楠种子油的脂肪酸成分分析 [J]. 热带农业科技, 33 (4), 27-28.
- 李兰, 彭振英, 陈高, 等. 2012. 花生种子发育过程中脂肪酸积累规律的研究 [J].

- 华北农学报, 27 (1): 173-177.
- 李晓丹, 曹应龙, 胡亚平, 等. 2009. 花生种子发育过程中脂肪酸累积模式研究 [J]. 中国油料作物学报, 31 (2): 157-162.
- 李延辉, 王惠英, 李德厚, 等. 1980. 肉豆蔻科植物种子油的化学成分研究 [J]. 热带植物研究, (15): 21-23.
- 石从广, 李因刚, 朱光权, 等. 2013. 白花树种子成熟期含油率和脂肪酸变化规律 [J]. 浙江农林大学学报, 30 (3): 372-378.
- 许玉兰, 蔡年辉, 吴裕, 等. 2012. 几种风吹楠属植物脂肪酸成分分析 [J]. 中国油脂, 37 (5): 80-82.
- 许玉兰, 吴裕, 杨晓玲, 等. 2010. 滇南风吹楠种子油脂的提取及脂肪酸成分分析 [J]. 安徽农业科学, 38 (8): 3 993, 3 999.
- 云南省热带植物研究所(资源组、化学组). 1973. 云南热区十四碳脂肪酸植物资源调查 [J]. 云南植物研究, (3): 9-15.



第 7 章

琴叶风吹楠群体遗传结构

7.1 引言

对珍稀濒危植物遗传多样性的研究是了解其濒危机制的基础 (Joshi, 2000), 在保护濒危植物种群数量的同时, 还需保护其遗传多样性以及进化潜力, 根据遗传基础制定科学合理的保护措施, 因此, 应对珍稀濒危植物进行居群遗传多样性特征及遗传结构的研究。目前, 人们利用分子生物学手段如 AFLP、SSR、核基因、叶绿体基因片段等对濒危植物进行保护遗传学研究 (王燕, 2004 ; 李辛雷, 2012 ; 慈秀芹, 2007 ; 管毕财, 2008), 在探明这些濒危植物遗传多样性的基础上, 提出了科学合理的保护措施。

本课题组曾经通过 AFLP 标记方法进行系统分类处理 (吴裕, 2015), 也开展了琴叶风吹楠叶绿体基因组测序 (Mao, 2019), 然而云南野生琴叶风吹楠呈点状分布, 居群极小, 野生资源量小, 可采样本数少, 致使群体遗传多样性的空间分布研究困难重重。本章对自然分布的 8 个小居群进行采样 56 份, 通过 AFLP 标记技术, 以居群为单位进行分析。

7.2 研究方法

本次研究从云南省西双版纳州景洪市、勐腊县、临沧市双江县共 8 个居群采集了琴叶风吹楠 56 株树的嫩叶或者嫩树皮, 液氮保存 (采样点基本信息列于表 7-1)。

表 7-1 琴叶风吹楠 8 个居群基本信息

居群名称(代码)	经度	纬度	海拔/m
双江(SJ)	99° 46.956' ~99° 53.337'	23° 12.521' ~23° 15.724'	868~1 038
纳板河(NBH)	100° 36.369' ~100° 39.304'	22° 02.081' ~22° 14.707'	900~950
森林公园(SL)	100° 53.189' ~100° 53.201'	22° 02.081' ~22° 02.099'	749~800
勐仑(ML)	101° 00.000' ~101° 14.810'	21° 54.000' ~22° 00.000'	774~1 114
补蚌(BB)	101° 34.710' ~101° 35.301'	21° 37.513' ~21° 37.712'	685~788
望天树(WTS)	101° 34.916' ~101° 35.318'	21° 37.513' ~21° 37.711'	685~787
勐伴(MB)	101° 36.060' ~101° 36.070'	21° 50.820' ~21° 50.840'	1 110~1 120
回燕竜(HYL)	101° 34.000' ~101° 36.000'	21° 35.000' ~21° 36.000'	650~750

用 QIAGEN 试剂盒改良法提取实验材料基因组 DNA，用 NanoDrop 2000 超微量分光光度计测定 DNA 浓度及 OD 值，质量合格的 DNA 样品送生工生物工程（上海）股份有限公司进行荧光 AFLP 实验，实验结束后返回 0/1 数据矩阵。返回的数据进行人工校对后用 POPGENE version 1.32 软件计算多态性位点数和多态性条带；观测等位基因数，有效等位基因数，*Nei's* 基因分化值，香农信息指数，遗传一致度等参数。基于 popgene 计算得到的遗传一致度数据，用 NTSYSpc-2.10e 软件的 Clustering 中 SAHN 程序对 8 个琴叶风吹楠居群进行 UPGMA 聚类。用“经纬度计算距离软件”将各居群的经纬度换算成地理距离，用 TFPGA1.3 软件进行 mantel 相关性检验。Winamova 软件进行 AMOVA 分析。

7.3 琴叶风吹楠荧光 AFLP 扩增多态性

用 QIAGEN 试剂盒改良法提取的 56 份琴叶风吹楠基因组 DNA 能够满足本实验要求。将 DNA 送生工生物工程（上海）股份有限公司进行荧光 AFLP 实验，从 64 份引物组合中选出 6 对多态性引物，分别为 H-AAC/M-CAG、H-ACA/M-CTC、H-ACG/M-CAA、H-AAC/M-CAC、H-AGC/M-CAG、H-AGG/M-CAA。6 对引物共扩增出 1 296 条带，平均多态性条带 162 条，多态性率 75.16%。每对引物扩增结果见表 7-2。

表 7-2 琴叶风吹楠 6 对引物扩增结果

	H-AAC/ M-CAG	H-ACA/ M-CTC	H-ACG/ M-CAA	H-AAC/ M-CAC	H-AGC/ M-CAG	H-AGG/ M-CAA	平均
多态性位点数 / 条	145	145	171	168	180	165	162
多态性率 (PPB/%)	67.13	67.13	79.17	77.78	83.33	76.39	75.16

7.4 琴叶风吹楠居群遗传多样性

用 POPGENE version1.32 软件进行 8 个居群各遗传参数的计算, 结果列于表 7-3。从表 7-3 可以看出, 琴叶风吹楠居群内的等位基因观察值 Na 变化范围为 1.217 2~1.532 5, 等位基因期望值 Ne 变化范围为 1.044 9~1.248 9, $Nei's$ 多样性指数 H 变化范围为 0.073 7~0.151 9, 香浓信息指数 I 变化范围为 0.112 0~0.236 1。各居群扩增的多态性条带百分率为纳板河居群 (NBH) 最大, 双江居群 (SJ) 最小。其余各遗传参数的结果和多态性条带百分率显示结果一致, 均为纳板河居群 (NBH) 最高, 双江居群 (SJ) 最低。纳板河居群采样株的株间距离最大, 而且分布于两个沟谷中; 双江居群最小, 且只分布于一个沟谷。

表 7-3 琴叶风吹楠居群遗传多样性

居群	观测等位基因数 (Na)	有效等位基因数 (Ne)	$Nei's$ 多样性指数 (H)	Shannon 多样性指数 (I)	多态位点数 (Np)	多态位点百分率 (PPB)
双江 (SJ)	1.22	1.12	0.07	0.11	60	21.72%
纳板河 (NBH)	1.53	1.25	0.15	0.24	148	53.25%
森林公园 (SL)	1.40	1.21	0.13	0.19	112	40.31%
勐仑 (ML)	1.48	1.04	0.13	0.20	133	47.96%
补蚌 (BB)	1.24	1.13	0.08	0.12	68	24.43%
望天树 (WTS)	1.35	1.18	0.11	0.16	96	34.78%
勐伴 (MB)	1.33	1.20	0.12	0.18	91	32.91%
回燕竜 (HYL)	1.34	1.20	0.12	0.18	95	34.30%
总 体	1.75	1.24	0.15	0.24	100	36.20%

7.5 琴叶风吹楠群体遗传结构

将琴叶风吹楠居群间的遗传分化数据列于表 7-4。从表 7-4 可以看出，琴叶风吹楠各遗传参数在各引物组合中的表现不同，总遗传多样性 (H_t) 变化范围为 0.124 2~0.184 1，居群内遗传多样性 (H_s) 变化范围为 0.096 2~0.123 3，居群间遗传分化系数 (Gst) 变化范围为 0.175 4~0.386 6，居群间遗传多样性 (Dst) 变化范围为 0.026 2~0.071 2，其平均 H_t 、 H_s 、 Gst 、 Dst 分别为 0.149 5、0.112 8、0.238 6、0.036 7；物种水平的 H_t 、 H_s 、 Gst 、 Dst 分别为 0.140 6、0.102 8、0.226 5、0.030 6。对居群间及居群内的遗传变异占总变异的百分率进行分析显示，居群内的遗传变异占总变异的 75.45%，居群间的遗传变异占总变异的 24.54%，说明琴叶风吹楠的遗传变异主要存在于居群内。从表 7-4 数据可以看出，不同引物组合得到的基因流 (Nm) 不同，其变化范围为 1.350 8~1.933 0，变化幅度不大。在物种水平，基因流为 1.707 5。

通过对琴叶风吹楠所有样本的 AFLP 数据进行 AMOVA 分析表明：琴叶风吹楠居群间的遗传差异达到极显著水平 ($P<0.001$)，居群内的遗传变异为 94.26%，居群间的遗传变异为 5.74%，物种遗传变异主要来自于群体内，这和 *Nei's* 基因多样性、多态性条带、Shannon 信息指数分析结果一致。

表 7-4 琴叶风吹楠遗传结构

引物组合	总遗传多样性 (H_t)	居群内遗传多样性 (H_s)	居群间遗传分化系数 (Gst)	居群间遗传多样性 (Dst)	基因流 (Nm)
H-AAC/M-CAG	0.1529	0.1204	0.2127	0.0325	1.8503
H-ACA/M-CTC	0.1242	0.0962	0.2260	0.0281	1.7127
H-ACG/M-CAA	0.1841	0.1129	0.3866	0.0712	1.7933
H-AAC/M-CAC	0.1496	0.1233	0.1754	0.0262	1.3508
H-AGC/M-CAG	0.1581	0.1225	0.2254	0.0356	1.7180
H-AGG/M-CAA	0.1280	0.1017	0.2055	0.0263	1.9330
各对引物平均	0.1495	0.1128	0.2386	0.0367	1.5955
物种水平	0.1406	0.1013	0.2265	0.0393	1.7075

7.6 琴叶风吹楠居群间遗传距离

通过 NTSYS 软件计算琴叶风吹楠居群间的遗传距离及遗传一致度，结果列于表 7-5。表 7-5 显示，琴叶风吹楠居群间的遗传距离在 0.019 6~0.099 7，纳板河（NBH）居群与森林公园（SL）居群的遗传距离最低为 0.019 6，望天树（WTS）居群与双江（SJ）居群的遗传距离最高为 0.099 7。琴叶风吹楠的遗传一致度在 0.909 4~0.980 7，纳板河（NBH）居群与森林公园（SL）居群的遗传一致度最高为 0.980 7，望天树（WTS）居群与双江（SJ）居群的遗传一致度最低为 0.909 4。根据表 7-1 列出的居群的经纬度用“经纬度计算距离软件”换算成地理距离。将得到的地理距离与遗传距离进行 mantel 相关性检验，结果显示地理距离和遗传距离之间存在一定相关性 ($r=0.119 7$, $P=0.321 0$)，但相关性不显著。

表 7-5 共 8 个居群的 *Nei's* 遗传一致度（右上角）及遗传距离（左下角）

居群	SJ	NBH	SL	ML	BB	WTS	MB	HYL
SJ	—	0.9403	0.9388	0.9539	0.9661	0.9094	0.9381	0.9515
NBH	0.0617	—	0.9807	0.977	0.956	0.9472	0.9731	0.9665
SL	0.0633	0.0196	—	0.9738	0.9531	0.9369	0.9673	0.9637
ML	0.0474	0.0234	0.0265	—	0.9647	0.9429	0.9729	0.9701
BB	0.0346	0.0451	0.0481	0.036	—	0.9203	0.9508	0.9556
WTS	0.0997	0.0567	0.0689	0.0615	0.088	—	0.9356	0.9265
MB	0.064	0.0272	0.0332	0.0275	0.0504	0.0689	—	0.9601
HYL	0.0498	0.0341	0.037	0.0303	0.0455	0.0795	0.0408	—

7.7 琴叶风吹楠居群聚类分析

将琴叶风吹楠居群的 UPGMA 聚类结果列于图 7-1，当遗传相似性系数在 0.951 左右时，琴叶风吹楠居群被分为 3 大支。首先，地理距离较近的森林公园（SL）和纳板河（NBH）居群聚在一起，勐仑（ML）、勐伴（MB）和回燕竜（HYL）3 个居群地理距离较近，再与森林公园和纳板河聚在一起形成第 I 支，

双江 (SJ) 和补蚌 (BB) 地理距离较远, 但遗传距离较近, 两居群聚在一起形成第Ⅱ支, 最后是望天树 (WTS) 居群单独出来形成第Ⅲ支。

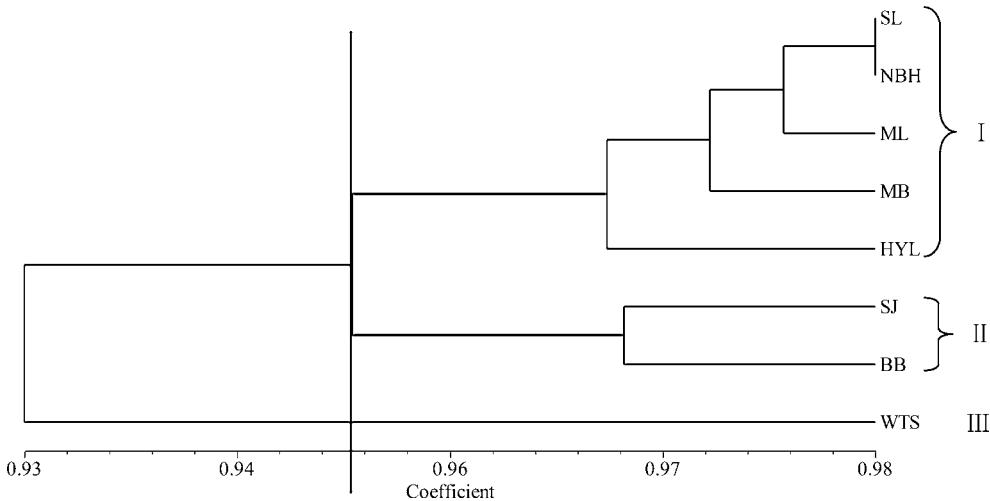


图 7-1 琴叶风吹楠 UPGMA 聚类

7.8 小结

本研究采用 6 对引物共扩增得到 1 296 条带, 平均每对引物扩增的多样性位点为 162, 在物种水平的平均多态性率 (PPB) 为 75.16%, 表明琴叶风吹楠具有丰富的遗传多样性; 在居群水平的平均多态性位点为 100, 平均多态性率为 36.20%, 与物种水平的遗传多样性相比, 呈下降趋势。推测琴叶风吹楠在远古时期, 其祖先在云南地区可能成连续分布, 且分布范围广泛, 遗传多样性丰富, 但受到云贵高原隆起影响, 其分布范围逐渐缩小, 分布区片段化, 居群内种群数量逐渐减少, 即使祖先具有丰富的遗传多样性, 由于分布区域的片段化, 居群规模不断缩小, 这必定会导致遗传漂变, 其直接后果就是居群内遗传变异下降。同时后代成活数量的差异也是导致有效居群大小下降的原因之一 (刘占林, 1999)。

基因的相互交流可引起居群内的遗传变异增加, 减少居群间的分化 (Whitlock, 1999; Lenormand, 1998)。遗传结构分析表明, 琴叶风吹楠物种的基因流 (Nm) 为 1.7075, 居群间的遗传分化系数 (Gst) 为 0.2265, 居群内遗传变异大于居群间的遗传变异, 居群内变异是其变异的主要来源, 变异式样和濒危植物思茅木姜

子相似（慈秀芹，2007），但与双子叶植物的遗传变异水平（ $G_s=0.273$ ）对比，琴叶风吹楠的遗传分化程度稍低。推测造成琴叶风吹楠居群内变异增加的原因之一可能和结实习性有关，在对该物种进行花序观察时发现，同一株树上雌雄花序并存，同一花序也有雌花和雄花，且部分单独生长的植株却硕果累累，周围找不到其余单株，可能琴叶风吹楠具有近交、自交或孤雌生殖的特点，这样的繁殖群体必定造成同一个居群内遗传变异的增加。

聚类分析的结果是各个居群的分组并非所有居群都按地理距离远近聚类。地理距离和遗传距离之间存在不显著的正相关性，但总体上还是遵循遗传距离随地理距离增大而增大的规律。距离较近的纳板河和森林公园两个居群首先聚在一起，勐仑、勐伴和回燕竜地理距离较近，3个居群聚在一起。但是补蚌居群从地理距离看，与勐伴和回燕竜相隔很近，但聚类时却和双江居群聚在一起，这可能和其自然居群的大小有关，双江也属于小居群，小居群趋向于更低的遗传多样性。

参考文献

- 慈秀芹. 2007. 樟科濒危植物思茅木姜子的保护遗传学研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院.
- 管毕财. 2008. 特有濒危植物八角莲保护遗传学和分子亲缘地理学 [D]. 杭州: 浙江大学.
- 李辛雷. 2012. 杜鹃红山茶遗传多样性及其濒危机制 [D]. 北京: 中国林业科学研究院.
- 刘占林, 赵桂仿. 1999. 居群遗传学原理及其在珍稀濒危植物保护中的应用 [J]. 生物多样性, 7 (4): 340-346.
- 王燕, 唐绍清, 李先琨. 2004. 濒危植物元宝山冷杉的遗传多样性研究 [J]. 生物多样性, 12 (2): 269-273.
- 吴裕, 毛常丽, 张凤良, 等. 2015. 琴叶风吹楠(肉豆蔻科)分类学位置再研究 [J]. 植物研究, 35 (5): 652-659.
- Joshi S P, Gupta V S, Aggarwal P K, et al. 2000. Genetic diversity and phylogenetic relationship as revealed by inter simple sequence repeat (ISSR) polymorphism in

- the genus *Oryza* [J] . Theoretical and Applied Genetics, 100 : 1 311-1 320.
- Lenormand T, Guillemaud T, Bourguet D, et al. 1998. Evaluating gene flow using selected markers: a case study [J] . Genetics, 149 : 1 383-1 392.
- Mao C L, Zhang F L, Li X Q, et al. 2019. The complete chloroplast genome sequence of *Horsfieldia pandurifolia* (Myristicaceae) [J] . Mitochondrial DNA Part B: Resources, 4 (1) : 949-950.
- Whitlock M C, David E McCauley. 1999. Indirect measures of gene flow and migration: $F_{ST} \neq 1 / (4Nm + 1)$ [J] . Heredity, 82 : 117-125.



第8章

琴叶风吹楠繁殖试验

8.1 引言

繁殖障碍是导致物种濒危的内部因素之一（李莲芳，2005；宁世江，2005）。植株能否正常开花结实？种子能否发育成熟？成熟种子能否正常萌发？幼苗能否长大？只要有一个环节发生障碍，种群发展就受到抑制，表现为种群数量下降，走向濒危或灭绝。琴叶风吹楠已被列入《中国植物红皮书》（傅立国，1991）和《中国物种红色名录》（汪松，2004），但是致危原因知之甚少。据调查，琴叶风吹楠分布区木材采伐和毁林开荒等诸多人为因素是导致濒危的主要外在因素（吴裕，2011）。另外，调查中发现，有多种动物采食种子，一方面有助于种子传播，另一方面也损失了部分种子。

由于繁殖障碍导致濒危的物种普遍存在，调查表明琴叶风吹楠开花结实正常，且种子饱满。因而开展种子繁殖研究，认识萌发习性，对琴叶风吹楠的致危机理研究和物种开发利用都有重要意义。本章主要介绍模拟野生环境下种子萌发情况、沙床和苗圃中播种比较、带果皮与去果皮播种比较、不同单株间种子萌发能力比较、不同萌发阶段幼苗移栽试验，以及无性繁殖的初步试验结果。

8.2 研究方法

试验于2009—2010年在云南省热带作物科学研究所试验地进行。试验地在云南省景洪市内，大约位于东经 $100^{\circ} 47'$ ，北纬 $22^{\circ} 00'$ ，海拔600 m地段，属于琴叶风吹楠的自然分布区范围；土壤属酸性红壤，pH值为4.5~5.5，土层深

厚；年平均气温21℃，最冷月平均气温（1月）15.6℃，最热月平均气温（7月）25.2℃；年平均降水量1200 mm。5—10月，受印度洋和太平洋暖湿气流的影响，雨量充沛，集中80%~90%的年降雨量于该期间，属于雨季；11月至翌年4月，受来自西部沙漠的干暖气流影响，空气干燥而温暖，降雨极少，属于旱季。相比而言，2009年雨季期间晴天较多。

本试验所用种子采自于西双版纳地区天然林内的5个分布点，共12株树，以株为单位编号记录。模拟野生环境下的萌发试验在林下进行，不浇水，不用人工遮阴；沙床和土壤（苗床）都用遮阴网遮阴，根据天气情况浇水，保证沙床和苗床湿润。繁殖试验开始后，跟踪观察记录，调查萌发率和移栽成活率，测量苗高和地径，数据采用Excel 2003软件分析处理。

8.3 模拟野生环境下的种子萌发试验

以琴叶风吹楠原生环境为参考，选择树木茂密林地内林下较空旷的小环境进行试验。2009年5月5日将20090310号植株（野生于西双版纳纳板河流域国家级自然保护区）的自然脱落种子随机分成10组，每组20粒，设置浅覆土（种子露一半在外面）和不覆土（种子完全裸露地面）的对比试验，5次重复。

琴叶风吹楠的原生环境树木茂密，层次复杂，土壤湿润，地面光照弱，但为了操作方便，选择林下比较空旷的小环境进行试验。2009年5月5日开始试验，第1~35 d雨日多，第36~50 d为晴天，之后雨日较多。总体而言，雨量比往年少，晴天较多。试验结果表明，以种子最终萌发的数量计算萌发率，浅覆土的种子萌发率为55%~95%；不覆土的种子萌发率为20%~65%，差异较大（表8-1）。浅覆土的种子萌发比较整齐，在第20~40 d内基本萌发完成，且保苗率高；不覆土的种子萌发不整齐，保苗率低。本试验于2009年6月23日调查拍照时每个重复的种子数量保持20粒不变，萌发情况表现为：浅覆土的种子已展开叶片（图8-1A）；不覆土的种子在环境较潮湿条件下大部分种子萌发长出胚根（图8-1B）；不覆土的种子在环境较干燥条件下，尚未见萌发（图8-1C），但后续观察发现有少部分种子萌发了。到2009年12月调查时，部分小苗生长良好。种子萌发受小环境影响大，在土壤潮湿、阳光不能直射的环境下容易萌发，即使不覆土萌发率也在60%以上；但是在土壤比较干燥的条件下，萌发率明显下降。

表 8-1 琴叶风吹楠模拟野生环境下的种子萌发率 /%

处理	重 复 次 数				
	I	II	III	IV	V
浅覆土	95	75	75	60	55
不覆土	60	65	45	35	20



图 8-1 琴叶风吹楠（模拟野生环境的种子萌发，2009）

说明：A 浅覆土；B 不覆土，环境较湿润；C 不覆土，环境较干燥

观察发现不覆土的种子萌发时恰好遇到降雨少，土壤干燥，胚根不能伸入土壤而夭折，只要胚根能顺利扎入土壤基本上能保证幼苗成活。

20090310号植株于2009年结实特别多，2009年11月调查时，发现树下有不少小苗（图8-2），大多数生长3~5片叶，株高10~30cm，可是到2010年5月调查时，这些小苗全部死完。这株大树生在水沟边，沟水常年不断，从大环境看，植株不缺水，生长旺盛，然而树下的小苗生在乱石堆上的草丛中，旱季严重缺水可能是致命的伤害。西双版纳地区干湿季分明，旱季降雨极少，光照强，气温高，蒸

图 8-2 琴叶风吹楠
(野外大树下的小苗，2009)

发快，土壤含水量低，空气湿度低。每年旱季琴叶风吹楠 1~2 年生植株向阳处的叶片都会受到日灼伤害，随着植株年龄增大，日灼伤害减轻。据课题组 2010 年 3 月 8 日的测定，土壤含水量 14%~15%，琴叶风吹楠苗木生长缓慢，随后几年测定情况，都是类似的结果：土壤含水量 12%~15%，苗木生长缓慢，雨季到来，便迅速生长。针对土壤含水量这个指标，含水量下降到什么程度，持续时间多久，会导致苗木死亡，尚需进一步测定。在这里需要说明的是：在其他地方的调查中发现诸多大树下环境湿润，很适合种子的萌发和幼苗生长，然而很少见幼树。在西双版纳保护区内发育比较好的林分中，有小苗、幼树、小树和大树，然而这些幼小的植株隔大树都比较远，推测可能大树对幼树的生长有抑制作用，尚需进一步研究（参见第 2 章和第 3 章）。

琴叶风吹楠种子属于玩拗型 (recalcitrant) 种子，容易失活，不耐久藏。有试验报道（云南省热带植物研究所，1973），贮藏 10 d 发芽率为 32.5%，贮藏 20 d 只有 2.5%；另有报道，贮藏 10 d 发芽率为 85%，贮藏 20 d 只有 30%（傅立国，1991）。相同的贮藏时间在不同试验中种子萌发率差异较大，可能是由于贮藏环境不同，导致水分散失程度不等所致。课题组 2009 年 5 月 1—4 日，对 20090310 号植株经历 4 d 的时间采拾自然脱落的种子（置于通风阴凉处），于 5 月 6 日沙床催芽（即有部分种子脱落 5 d 后才播种），萌发率为 96%；但是将同一批种子在室温自然通风条件下贮藏和在 4 ℃冰箱贮藏，分别于 5 月 11 日和 5 月 21 日沙床催芽，萌发率均为 0，7 月 15 日检查，部分种子已经腐烂。琴叶风吹楠果实 4—5 月成熟，正值云南热带地区高温干旱季节，种子容易失水而死亡，所以只在有流水的沟谷和洼地才可能具备裸露种子萌发的水分条件，或者由于动物的活动将种子埋于土壤中才有可能在水分相对较少的环境中萌发，这也许是琴叶风吹楠只分布于洼地或沟谷的原因之一。

8.4 沙床播种与土壤播种的比较

2009 年 4 月下旬从 20090310 号植株下拾取成熟自然脱落的种子，去掉假种皮，于 4 月 27 日混合均匀，随机分成 4 组，开展沙床播种与土壤播种的对比试验，设 2 次重复。

琴叶风吹楠种子胚乳极大，极小的胚位于种子基部，幼苗属子叶留土类型。根据观察，种子沙床播种 20 d 左右种子基部露白，胚根慢慢伸出，第 20~30 d

主根伸长到 1~2 cm, 第 30~46 d 主茎高 5~7 cm, 真叶初展, 作为种子正常萌发的标志记数; 苗床播种的种子出土后记数。统计结果表明: 沙床播种的种子萌发率在 96% 以上, 而土壤播种的种子萌发率接近 80%, 两次重复的萌发率基本无差异 (表 8-2)。

表 8-2 琴叶风吹楠种子沙床播种和土壤播种的萌发试验

基质	重复次数	播种数 / 粒	萌发数 / 粒	萌发率 /%
沙床	I	130	125	96.15
	II	143	140	97.90
土壤	I	118	93	78.81
	II	112	89	79.46

种子萌发的条件是有充足水分、充足氧气和适宜温度, 沙床通风良好, 既能保湿又不渍水, 更有利于种子的萌发。虽然琴叶风吹楠种子属于顽拗型种子, 容易失活, 不耐久藏, 但是本次试验种子采拾过程经历 4 d, 即有部分种子脱落 5 d 后才播种, 萌发率仍在 96% 以上, 短时间内不会失活。

8.5 带果皮播种与去果皮播种的比较

琴叶风吹楠每个果实只有 1 粒种子。2009 年 3 月 30 日和 4 月 1 日采摘第 20090303、20090304、20090308 共 3 株树的成熟果实, 分株记录, 将每株树的果实各自混合均匀后随机分成 2 组, 其中一组用利刀切开果皮再用手剥去假种皮 (确保种皮不受伤害) 后土壤播种, 记为 “去皮”; 另一组用完整的果实直接土壤播种, 记为 “留皮”。

琴叶风吹楠的果皮从绿色逐渐转变为黄色, 假种皮顶端变红, 标志着果实已经开始成熟, 但是同株树的果实成熟时间不完全一致, 因而将果皮明显绿色的嫩果和已经开裂的果实剔除, 将果皮黄色而又未开裂的果实充分混匀用作试验。试验过程中第 20090303 号植株的去皮种子播种失误而未记入。统计结果表明, 第 20090304、第 20090308、第 20090303 号植株的留皮种子萌发率仅为 9.09%~33.33%, 且苗木生长不良; 而第 20090304、第 20090308 号植株的去皮种子萌发率为 80.00%~86.27% (表 8-3), 且苗木生长良好。第 20090304、20090308

号植株的种子萌发率与第 20090310 植株自然脱落种子土壤播种的萌发率相近，表明这些种子虽不是自然脱落，但已生理成熟。

表 8-3 琴叶风吹楠留皮与去皮播种的萌发试验

植株编号	种子	播种数 / 粒	萌发数 / 粒	萌发率 /%
20090304	留皮	22	2	9.09
	去皮	20	16	80.00
20090308	留皮	57	19	33.33
	去皮	51	44	86.27
20090303	留皮	58	10	17.24

果实成熟开裂，种子连同假种皮一起脱落，假种皮很快烂掉，只剩下种子。种子离开果皮和假种皮后萌发生长是琴叶风吹楠种子繁衍的固有方式。2011 年 4 月 18 日人工采摘 20090402 和 20090403 号植株的果实重复试验，表明果皮和假种皮对种子的萌发和幼苗生长也有一定抑制作用。所以在人工播种繁殖时应除去果皮和假种皮，以保证较高萌发率和苗木生长良好。果皮抑制种子萌发和幼苗生长的机理有待进一步研究。

8.6 不同植株种子的萌发能力比较

于 2009 年 4 月果实成熟期间，将 11 株树自然脱落的新鲜种子土壤播种，2 个月后调查萌发率，2009 年年底调查保苗率。将 11 株树的种子萌发率和保苗率统计于表 8-4。不同植株种子萌发率为 58.67%~90.48%，11 株树 798 粒种子平均萌发率为 76.44%；到 2009 年年底，11 个家系的保苗率为 94.74%~100.00%，平均保苗率为 98.03%。

在试验过程中发现大部分植株的种子都很饱满，萌发率也高，只有极少数植株的种子不饱满，而且部分种子还未脱落就已腐烂，这些都是导致种子萌发率差异较大的原因。

表 8-4 琴叶风吹楠不同植株种子的萌发率和保苗率

植株编号	播种数 / 粒	萌发数 / 粒	萌发率 /%	年底株数 / 株	保苗率 /%
20090304	10	9	90.00	9	100.00
20090308	51	44	86.27	44	100.00
20090310	230	182	79.13	178	97.80
20090404	100	76	76.00	74	97.37
20090406	30	19	63.33	18	94.74
20090407	48	39	81.25	39	100.00
20090408	55	44	80.00	43	97.73
20090409	52	32	61.54	32	100.00
20090413	75	44	58.67	44	100.00
20090414	84	64	76.19	63	98.44
20090415	63	57	90.48	54	94.74
合计	798	610	76.44	598	98.03

8.7 不同萌发阶段的幼苗移栽试验

2009年5月5日，将20090310号植株的种子随机分成8组，每组25粒，沙床播种。种子萌发是一个连续的过程，为了方便记录将其分成可明显识别的4个阶段（杨晓玲，2009）：胚根生长期（主根长1~2 cm）、上胚轴生长期（主茎弯曲成Q字形）、主茎伸直、真叶长2~3 cm，依次编号为1、2、3、4。播种后随时检查种子萌发的动态，适时移栽，每个阶段的幼苗采取全苗和切根苗移栽对比试验。切根苗指移栽时切去主根，只保留近种子端1.5~2 cm长。移栽工作从5月29日开始，到7月1日完成。7月1日以后萌发的种子未移栽，移栽过程中受损严重的幼苗丢弃，以最后移栽的总数进行统计。

将4个萌发阶段的全苗和切根苗移栽后调查数据统计于表8-5。从表8-5中可看出各个阶段的幼苗移栽，以及全苗和切根苗移栽对幼苗的成活率没有影响，都能满足100%，但是对幼苗的生长量有一定影响。本试验于2009年5月5日播种，分阶段移栽，于2009年11月25日测量，无论是全苗还是切根苗第1阶段移栽的苗生长量均最大。针对全苗移栽，第1阶段移栽的平均苗高45.55 cm，

平均地径 8.41 mm, 苗高变异系数 11.58%, 地径变异系数 7.88%, 生长比较整齐, 以后各阶段移栽的生长量逐渐减小; 关于切根苗, 第 1~3 阶段移栽的生长量都比全苗移栽的小, 但是到第 4 阶段移栽的生长量却比全苗移栽的大。另外, 据 2009 年 10 月对 16 株苗的切根移栽试验, 苗高 25~30 cm, 主根只留近种子端 10 cm 长, 剪除部分主茎, 留 1~2 片叶子, 其成活率为 100%, 且生长良好。随着根系发育健全, 主根极长, 但侧根细弱, 切根移栽更有利于根系恢复而促进生长。总体说来, 以胚根发育长 1~2 cm 时全苗移栽为最佳, 如果幼苗较大以切根移栽为宜。

琴叶风吹楠种子大, 营养富足, 胚乳为幼苗提供营养物质, 所以移栽或锄草等过程中不能伤到种子, 如果幼苗失去种子的营养供应, 则生长瘦弱, 甚至死亡。

表 8-5 琴叶风吹楠不同萌发阶段移栽幼苗的成活率和生长量

幼苗	移栽数 /株	成活数 /株	成活率 /%	平均苗高 /cm	苗高变异 系数 /%	平均地径 /mm	地径变异 系数 /%
1 全苗	20	20	100	45.55 ± 5.28	11.58	8.41 ± 0.66	7.88
1 切根	18	18	100	44.78 ± 7.57	16.90	8.58 ± 0.84	9.81
2 全苗	20	20	100	41.90 ± 7.36	17.57	8.18 ± 1.53	18.72
2 切根	20	20	100	37.10 ± 9.14	24.62	7.36 ± 0.96	13.05
3 全苗	20	20	100	41.90 ± 8.79	20.97	7.76 ± 1.29	16.59
3 切根	18	18	100	38.77 ± 5.51	14.21	7.69 ± 0.93	12.09
4 全苗	20	20	100	37.90 ± 8.29	21.87	7.56 ± 1.11	14.68
4 切根	18	18	100	40.72 ± 6.27	15.39	7.87 ± 0.66	8.39

注: “全苗”指全苗移栽; “切根”指移栽时切去主根, 只留 1.5~2 cm 长。

8.8 无性繁殖初步试验

2010 年 5 月, 以一年生苗为砧木, 从一年生苗木上采穗, 进行带木质部芽接和枝接, 两种方法都能成活(图 8-3、图 8-4)。琴叶风吹楠嫩枝髓心大, 嫁接时砧木切口靠边, 切下少量木质部; 接穗则削成楔形, 同样是削去少量木质部。以“背靠背”的方式嫁接, 用捆绑带从下向上逐层覆盖轻轻捆紧即可, 注意上切

口处严密封闭，避免进水。芽接方法与枝接的方法原理完全一样，差异是接穗只带1个芽。嫁接后10 d左右抽出新枝，1个月后，嫁接部位愈合，可以解绑。2014年5月，以一年生苗为砧木，从140年生老树上采穗，从砧木基部剥皮进行芽接，芽片不带木质部，芽接成活后，将砧木锯干，但芽片不抽出新枝，其中的问题需要进一步研究。



图 8-3 琴叶风吹楠 (芽接苗, 2010)



图 8-4 琴叶风吹楠 (枝接苗, 2010)

2010年5月，从一年生苗采集插穗，以细沙和红土两种基质分别扦插。扦插结果为：两种基质中都有少量半木质化的插穗生根发芽，但生根量太少（图8-5、图8-6）。本次试验，无论是枝接、芽接或扦插繁殖，成活率都太低，没有统计学的意义，但是也说明可以通过嫁接或扦插建立无性系。如何提高繁殖效率以及苗木后期生长情况等问题都有待进一步研究。

8.9 小结

本研究表明，模拟野生环境条件下同一株树的种子在浅覆土时萌发率为55%~95%，保苗率较高，不覆土的种子萌发率为20%~60%，且萌发不整齐，

保苗率低；同一植株发育良好的种子沙床播种萌发率在 96% 以上，而土壤播种萌发率约为 80%，差异较大；从不同 3 株树的成熟果实中剥出种子土壤播种，其萌发率为 80.00%~86.27%，而整个果实土壤播种萌发率为 9.09%~33.33%；11 株树自然成熟脱落的新鲜种子土壤播种萌发率为 58.67%~90.48%，6 个月后（2009 年底）保苗率为 94.74%~100.00%；幼苗移栽容易成活，移栽时要带种子保证子叶不受伤害，种子能继续给幼苗提供营养物质。



图 8-5 琴叶风吹楠（扦插苗床，2010）



图 8-6 琴叶风吹楠（扦插生根，2010）

琴叶风吹楠种子发育良好、萌发率高、幼苗生长健壮，从这些指标可以判定为不存在繁殖障碍。从播种到 2 周年，大部分苗木高达 2 m 以上。野外调查发现，未受人为破坏的森林中幼树生长良好，表现为“幼树多，大树少”的特点。在水分充足保护完好的森林环境中，琴叶风吹楠的种群发育良好，但在干旱环境中，即使大树每年产生许多种子，也很难生长出幼树，种群不能发展。

参考文献

- 傅立国, 金鉴明. 1991. 中国植物红皮书(第一册) [M]. 北京: 科学出版社, 468-469.
- 李莲芳, 周云, 王达明. 2005. 云南红豆杉的濒危成因剖析 [J]. 西部林业科学, 34 (3): 30-34.
- 宁世江, 唐润琴, 曹基武. 2005. 资源冷杉现状及保护措施研究 [J]. 广西植物, 25 (3): 197-200.
- 汪松, 解焱. 2004. 中国物种红色名录 [M]. 北京: 高等教育出版社, 330.
- 吴裕, 段安安, 田耀华, 等. 2011. 云南野生珍稀油料树种琴叶风吹楠资源调查 [J]. 广西植物, 31 (2): 217-221, 216.
- 杨晓玲, 许玉兰, 段安安, 等. 2009. 油料植物琴叶风吹楠种子萌发观察 [J]. 热带农业科技, 32 (4): 30-32.
- 云南省热带植物研究所(油料组). 1973. 贺得木种子繁殖试验初报 [J]. 热带植物研究, (3): 25-27.



嫁接繁殖试验，2010