

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

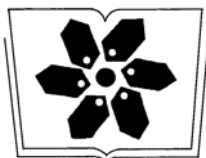
Acta Ecologica Sinica



第34卷 第6期 Vol.34 No.6 **2014**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 6 期 2014 年 3 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 全球气候变暖对凋落物分解的影响..... 宋 飘,张乃莉,马克平,等 (1327)
- 从系统到景观:区域物质流分析的景观取向 张晓刚,曾 辉 (1340)
- 论湿地生态系统服务的多维度价值评估方法..... 宋豫秦,张晓蕾 (1352)
- 保幼激素在昆虫中的分子作用机理..... 金敏娜,林欣大 (1361)
- 岩画和壁画类文物微生物病害研究进展..... 李 强,葛琴雅,潘晓轩,等 (1371)
- 基于 3S 技术的图们江流域湿地生态安全评价与预警研究 朱卫红,苗承玉,郑小军,等 (1379)
- 跨界保护区网络构建研究进展..... 王 伟,田 瑜,常 明,等 (1391)

个体与基础生态

- 速生树种尾巨桉和竹柳幼苗耗水特性和水分利用效率..... 邱 权,潘 昕,李吉跃,等 (1401)
- 三种增温情景对入侵植物空心莲子草形态可塑性的影响..... 褚延梅,杨 健,李景吉,等 (1411)
- 气象要素及土壤理化性质对不同土地利用方式下冬夏岩溶作用的影响 刘 文,张 强,贾亚男 (1418)
- 施用纳米碳对烤烟氮素吸收和利用的影响..... 梁太波,尹启生,张艳玲,等 (1429)
- 基于 Voronoi 图的林分空间模型及分布格局研究 刘 帅,吴舒辞,王 红,等 (1436)
- 近自然毛竹林空间结构动态变化..... 仇建习,汤孟平,沈利芬,等 (1444)
- 基于种实性状的无患子天然群体表型多样性研究..... 刁松峰,邵文豪,姜景民,等 (1451)
- 不同林分起源的相容性生物量模型构建..... 符利勇,雷渊才,孙 伟,等 (1461)

种群、群落和生态系统

- 毛竹材用林林下植被群落结构对多花黄精生长的影响..... 樊艳荣,陈双林,杨清平,等 (1471)
- 温度和 CO₂ 浓度升高下转 *Bt* 水稻种植对土壤活性碳氮和线虫群落的短期影响
..... 陈 婧,陈法军,刘满强,等 (1481)
- 中国东北地区近 50 年净生态系统生产力的时空动态 李 洁,张远东,顾峰雪,等 (1490)
- 遥感与 GIS 支持下的盘锦湿地水禽栖息地适宜性评价..... 董张玉,刘殿伟,王宗明,等 (1503)
- 秦岭火地塘林区土壤大孔隙分布特征及对导水性能的影响..... 陆 斌,张胜利,李 侃,等 (1512)
- 磷浓度对铜绿微囊藻、大型溞和金鱼藻三者相互作用的影响..... 马剑敏靳 萍,郭 萌,等 (1520)
- 普生轮藻浸提液对两种淡水藻类的化感抑制作用及其数学模型..... 何宗祥,刘 璐,李 诚,等 (1527)
- 北京永定河-海河干流河岸带植物的区系分析 修 晨,欧阳志云,郑 华 (1535)
- 基于河流生境调查的东河河流生境评价..... 王 强,袁兴中,刘 红,等 (1548)

景观、区域和全球生态

应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响 郭军庭,张志强,王盛萍,等 (1559)

长白山不同海拔树木生长对气候变化的响应差异..... 陈 力,尹云鹤,赵东升,等 (1568)

石家庄市空气花粉散布规律及与气候因子的关系..... 李 英,李月丛,吕素青,等 (1575)

不同放牧梯度下呼伦贝尔草甸草原土壤碳氮变化及固碳效应..... 闫瑞瑞,辛晓平,王 旭,等 (1587)

南四湖区农田土壤有机质和微量元素空间分布特征及影响因素..... 武 婕,李玉环,李增兵,等 (1596)

资源与产业生态

跨国土地利用及其生态影响 陆小璇 (1606)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 288 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 30 * 2014-03



封面图说: 图们江河流中段——图们江位于吉林省东南边境,发源于长白山东南部的石乙水,河流的绝大部分是中国与朝鲜的界河,下游很小一段为俄罗斯与朝鲜的界河,并由这里流入日本海,我国珲春距离日本海最近的地方仅有 15km。图们江是我国重要的国际性河流之一,随着我国经济的迅速崛起,图们江地区进入到多国合作联合开发阶段,湿地生态系统处于中度预警状态,并有向重度预警发展的趋势,生态安全面临的威胁越来越严重。对该区域进行湿地生态安全评价与预警研究,可为图们江流域生态环境的可持续发展提供依据。图中河道的远方为朝鲜、河道近方为中国。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@ 163.com

DOI: 10.5846/stxb201306211756

刁松锋, 邵文豪, 姜景民, 董汝湘, 孙洪刚. 基于种实性状的无患子天然群体表型多样性研究. 生态学报, 2014, 34(6): 1451-1460.

Diao S F, Shao W H, Jiang J M, Dong R X, Sun H G. Phenotypic diversity in natural populations of *Sapindus mukorossi* based on fruit and seed traits. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6): 1451-1460.

基于种实性状的无患子天然群体表型多样性研究

刁松锋, 邵文豪, 姜景民*, 董汝湘, 孙洪刚

(中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 富阳 311400)

摘要: 无患子 (*Sapindus mukorossi* Gaertn.) 是我国长江以南地区传统的重要绿化树种, 其果皮富含皂苷, 种仁富含油脂, 是国家林业局审定的新型木本油料树种之一。为揭示无患子群体间和群体内种实表型性状变异式样, 采用单因素方差分析、巢式方差分析、相关分析和主成分分析等方法, 对无患子 13 个天然群体的 10 个种实表型性状进行比较分析, 研究其群体间和群体内种实表型多样性以及表型变异与地理生态因子间的相关性。结果表明: 无患子种实表型性状变异系数平均为 7.34%, 在群体间和群体内均存在丰富的表型变异。表型性状分化系数平均为 62.21%, 群体间变异 (39.93%) 大于群体内 (27.46%), 是无患子种实表型性状变异的主要来源。多数性状在群体间差异显著, 不同程度的表现出边缘群体易于分化的特点, 但地理变化规律不连续, 而在群体内不同性状的差异性亦不一致。种子形态受群体地理生态的影响较果实形态大, 西北部群体种子趋于椭圆形, 东部、南部则趋于圆球形; 地理纬度、年平均气温与多数种实性状间呈显著相关, 是无患子种实表型性状变异的主要地理生态影响因子。可见, 无患子种实表型性状在群体间、群体内变异都较为丰富, 这些变异是由遗传和环境因素共同作用的结果。群体间和群体内多层次的变异为无患子优良种质资源保育和利用提供了物质基础。

关键词: 无患子; 天然群体; 种实性状; 表型变异; 地理生态因子; 群体分化

Phenotypic diversity in natural populations of *Sapindus mukorossi* based on fruit and seed traits

DIAO Songfeng, SHAO Wenhao, JIANG Jingmin*, DONG Ruxiang, SUN Honggang

Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, China

Abstract: *Sapindus mukorossi* Gaertn is a traditional and important virescent tree species in the south part of China with rich saponins in peel and rich oil in seed. This tree species is one of the newly-developed woody oil species that were approved by the State Forestry Administration of China. The objectives of the present study were investigating phenotypic variation of 10 fruit and seed traits among 13 natural populations of *S. mukorossi* and disclosing the relationship between phenotypic variation and geographical factors. Variance analysis, multiple comparison, correlation analysis and principal component analysis were used to examine morphological diversity among and within populations based on data of 10 phenotypic traits. Results showed significant variation in fruit and seed traits within and among populations. The degree of variation in the 10 traits was significantly higher among populations than that within populations. The averaged coefficient of variation (CV) for the 10 traits was 7.34%. The mean phenotypic differentiation coefficient for the 10 traits was 62.21%, and the variation within populations (27.46%) was lower than that among populations (39.93%), indicating that variance among populations was the main source of the phenotypic variation in *S. mukorossi*. There were significant difference in most traits among populations, and most traits exhibited larger degree of differentiation in the marginal populations.

基金项目: 浙江省重大科技专项重点农业项目 (2011C12015); 国家公益性行业 (林业) 科研专项项目 (200804032)

收稿日期: 2013-06-21; **修订日期:** 2014-01-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: germplasm-resources@outlook.com

Geographically continuous variation was not detected, and the differentiation of most traits were not consistent within the populations. Seed morphology was largely influenced by ecological factors of populations. The seed morphology in northwest area is near oval, whereas the seed morphology in eastern and southern area is near sphericity. Altitude and annual average temperature were significantly correlated with major traits of fruit and seed, indicating that altitude and annual average temperature were the main geographical and ecological factors and they interactively contribute to variations of fruit and seed phenotypic traits among populations and within populations. The multiple variations among and within populations provided insights and guidelines for genetic conservation and utilization of *S. mukorossi* germplasm resources.

Key Words: *Sapindus mukorossi*; natural population; fruit and seed traits; phenotypic variation; geography and ecological factors; population differentiation

植物表型性状反映了基因型对环境变化的适应,在长期的压力选择中发生不可逆变化,经稳定遗传后产生新表型,因此表型变异往往在适应和进化上有重要意义^[1]。种实性状表型变异不仅决定着物种的扩散能力和种群的分布格局,也是人类开发利用的重要经济性状^[2],在林木良种选育^[3]中具有重要意义。目前,对于植物表型变异的研究主要集中在两方面^[4],对于重要的经济性状,侧重于遗传分析,寻找具优良性状的遗传材料,为遗传改良奠定基础;在生态上较重要的性状主要从地理环境上开展相关研究,注重探究物种的适应性。

无患子(*Sapindus mukorossi* Gaertn.)为无患子科(Sapindaceae)落叶大乔木,在我国南方地区广泛分布^[5]。无患子又称“肥皂树”,其果皮皂苷含量达10.76%^[6],具有良好的起泡性和去污能力,是天然的环境友好型洗涤剂^[7],此外,无患子种仁含油率达42.7%^[8],不饱和脂肪酸含量达86.63%,为重要的生物质能源树种^[9]。近年来,随着生物质产业的发展,无患子作为新兴工业原料树种越来越受到关注,从事无患子大规模性种植的企业也相继增加。因此,为规范无患子原料林的培育利用活动,国家林业局印发了《无患子原料林可持续培育指南》([2012]129号)^[10]。

目前对无患子的研究多集中在化学成分及其提取工艺^[8,11]、医药应用^[12-13]、组织培养^[14-15]和主要经济性状变异^[16]等方面,关于无患子天然群体种实表型多样性的系统研究未见报道,良种选育及原料林培育技术尚处于起步阶段,这在一定程度上制约了无患子新兴生物质产业的发展。本文通过对无患子天然分布区内13个群体种实表型性状的研究,旨在

揭示无患子群体间和群体内种实变异式样,为无患子种质资源收集、遗传改良和保育提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料来源及取样方法

在样地调查的基础上,于2009年秋季果实成熟期完成无患子13个主要天然群体果实采集工作。野外取样时,要求同一群体采样单株间距25 m以上,尽量避免株间亲缘关系。于每个单株阳面树冠的中上部位选择3—5个生长发育良好的结果枝,收获果枝上的全部果实,满足果实数量不少于60个。根据取样群体的大小,每个群体分别采集13—28棵单株,共271棵。取样群体的地理位置和生态因子见表1。

1.2 种实性状的选取及测定

选择遗传相对稳定、易于获得和测量的表型性状,包括果实质量(FW)、果实纵径(FV)、果实横径(FH)、种子质量(SW)、种子纵径(SV)和种子横径(SH);分别计算果实、种子的纵径与横径的比值,记为果实形态指数(FV/FH)和种子形态指数(SV/SH);计算果实、种子的纵径与横径的乘积值,分别记为果实大小指数(FV×FH)、种子大小指数(SV×SH)。以上共计选取10个种实性状,其中纵径指果实或种子基部至顶部距离的测量值。

采集的果实经自然风干后,根据GB/T3543.7—1995百粒四分法每单株随机抽取30粒果实,用电子游标卡尺(精度0.01 mm)测量每个果实的纵径和横径,并用1/1000电子天平分别称取质量,重复6次。果实性状称测后,剥离果皮,按照同样方法分别测定种子纵径、横径及其质量。

表 1 无患子各取样群体概况

Table 1 The situations of different natural populations of *S. mukorossi*

群体 Populations	纬度 Latitude (N)	经度 Longitude (E)	年平均气温 Average temperature/℃	年平均日照时数 annual average sunshine hours/h	海拔 Altitude /m	年平均降雨量 Precipitation /mm	个体数 No. of individual
浙江遂昌	28°32'	118°52'	16.8	1755	245	1510	22
河南西峡	33°25'	111°21'	15.2	2019	253	850	28
浙江仙居	28°50'	120°43'	17.2	1786	416	1444	19
广西龙州	22°20'	106°51'	21.8	1654	280	1689	25
福建武夷山	27°46'	118°02'	17.9	1562	370	1881	16
浙江临安	30°13'	119°32'	16.2	1847	76	1453	18
安徽黄山	30°12'	118°11'	15.7	1885	448	1670	24
浙江龙泉	28°04'	119°09'	17.6	1758	228	1660	23
江西宜丰	28°14'	114°49'	17.2	1635	480	1800	21
福建建瓯	27°01'	118°18'	19.3	1612	299	1664	19
江西上犹	25°57'	114°34'	18.8	1765	335	1497	27
贵州榕江	25°44'	108°34'	18.1	1313	393	1211	16
湖北武汉	30°33'	114°19'	17.1	1985	35	1205	13

1.3 统计分析方法

采用巢式方差分析研究无患子种实性状变异^[17],线性模型为 $Y_{ijk} = \mu + P_i + T_{i(j)} + e_{(ij)k}$, 其中 Y_{ijk} 为第 i 群体第 j 个个体第 k 个观测值, μ 为总均值, P_i 为第 i 个群体的效应值(固定), $T_{i(j)}$ 为第 i 个群体内的第 j 个个体的效应值(随机), e_{ijk} 为试验误差。

计算种实性状的均值、标准差、变异系数(CV)和表型分化系数(V_{st}), 其中变异系数(CV) = 标准差/均值, 表型分化系数 $V_{st} = \sigma^2 t/s / (\sigma^2 t/s + \sigma^2 s)$, $\sigma^2 t/s$ 、 $\sigma^2 s$ 分别为群体间、群体内方差值。利用变异系数(CV)表征性状变异的离散程度, V_{st} 值可以近似解释种群间分化大小^[18]。

利用相关分析法计算种实性状与地理生态因子间的 pearson 相关系数, 并对性状进行主成分分析, 采用方差最大化正交旋转方法, 按照累计贡献率大于 85% 且特征根大于 1 为提取主成分的标准^[19]。

数据处理利用 EXCEL2010 和 SPSS18.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 无患子种实表型性状变异在群体间和群体内的差异

从表 2 可知, 除果实大小指数性状外, 其它 9 个种实性状在不同群体间的差异均呈极显著水平 ($P < 0.01$), 而在群体内仅有果实质量、果实纵径和种子形态指数的差异性达到极显著水平, 种子质量性状

为显著差异水平 ($P < 0.05$), 其余性状在群体内均差异不显著。可见, 无患子多数种实表型性状在群体间存在广泛差异, 而不同性状在群体内的差异性不一致。种实性状变异的差异性既有来源于群体间、群体内遗传基础的差异, 也与各种群所处生长环境的异质性有关, 群体间、群体内广泛的变异为无患子种实优良类型的选育奠定了基础, 也为其栽培区划提供了参考依据。

最北部的河南西峡县无患子群体果实质量均值最大, 为 7.12 g, 与其它群体间差异显著, 均值最小的则来自中部群体湖北武汉, 仅为 2.68 g, 武汉群体果实纵径、横径均值在各群体中亦为最小, 差异显著; 而各群体中果实纵径、横径均值最大的群体分别为北部的浙江临安 21.21 mm 和西南部的广西龙州 20.41 mm。果实形态指数均值最大的为贵州榕江群体, 最小的为广西龙州群体, 而果实大小指数均值最大的为浙江临安群体, 最小的为湖北武汉群体。无患子种子各性状中, 种子质量均值最大的群体是河南西峡 1.90 g, 最小的为湖北武汉 0.93 g; 福建建瓯群体的种子纵径、横径和大小指数均值在各群体中均为最大, 而湖北武汉群体的三者性状均值均为最小。无患子各群体的种子形态指数均值均大于 1, 而指数值越趋向于 1, 说明种子形状越趋近于球形^[20]。河南西峡群体的种子形态指数均值最大为 1.335, 近椭圆形, 与其它群体差异显著, 而湖北武汉群体种子形态指数均值为 1.002, 最接近圆球形。

表 2 无患子天然群体种实表型性状变异的方差分析

Table 2 Variance analysis of phenotypic traits among and within *S. mukorossi* populations

性状 Traits	F														
	浙江遂昌	河南西峡	浙江仙居	广西龙州	福建武夷山	浙江临安	安徽黄山	浙江龙泉	江西宜丰	福建建瓯	江西上犹	贵州榕江	湖北武汉	群体间 Among populations	群体内 Within population
果实质量/g Fruit weight FW	4.36± 0.21bcd	7.12± 0.08a	4.88± 0.25bc	5.01± 0.15b	3.47± 0.11de	4.00± 0.03cde	3.85± 0.38de	3.62± 0.08de	3.18± 0.14ef	4.35± 0.04bcd	4.04± 0.25cde	3.97± 0.05cde	2.68± 0.13f	27.85 **	2.52 **
果实纵径/mm Fruit vertical diameter FV	19.40± 0.37abc	19.90± 0.12abc	20.96± 0.09a	20.41± 0.31abc	18.08± 0.35cd	21.21± 0.03a	20.84± 1.04ab	18.37± 0.29bcd	16.53± 0.66d	19.57± 0.20abc	20.53± 0.38abc	18.02± 0.27cd	14.48± 0.34e	11.71 **	1.32 **
果实横径/mm Fruit horizontal diameter FH	21.89± 0.37abc	22.09± 0.07abc	22.58± 0.24ab	23.43± 0.27a	20.38± 0.21bcd	23.36± 0.48a	22.18± 0.61abc	20.18± 0.12cd	18.71± 0.88d	22.05± 0.13abc	23.04± 0.29ab	18.92± 0.09d	16.43± 0.17e	16.49 **	1.85
果实形态指数 FV/FH	0.886± 0.01a	0.902± 0.01a	0.928± 0.01a	0.871± 0.011a	0.885± 0.01a	0.910± 0.02a	0.936± 0.02a	0.909± 0.01a	0.892± 0.027a	0.887± 0.01a	0.892± 0.01a	0.952± 0.011a	0.880± 0.013a	2.12 **	0.98
果实大小指数 FV×FH	425.89± 14.65ab	439.61± 2.87ab	473.26± 7.00a	478.63± 11.58a	368.66± 10.31bcd	495.49± 10.70a	466.50± 35.30a	370.84± 7.29bcd	314.06± 24.86d	431.64± 6.51ab	473.38± 14.69a	341.18± 6.39cd	238.23± 7.78e	13.90	1.68
种子质量/g Seed weight SW	1.66± 0.08ab	1.90± 0.03a	1.92± 0.03a	1.59± 0.08abc	1.13± 0.02de	1.41± 0.08bcd	1.47± 0.18bcd	1.48± 0.04bcd	1.23± 0.05cde	1.89± 0.02a	1.40± 0.04bcd	1.37± 0.03bcd	0.93± 0.03e	9.33 **	2.03 *
种子纵径/mm Seed vertical diameter SV	14.28± 0.28abc	16.09± 0.07a	15.40± 0.05ab	14.39± 0.27abc	12.96± 0.19bcd	11.80± 0.68cd	12.52± 1.55cd	12.78± 0.36bcd	10.54± 0.43d	16.40± 0.17a	12.23± 0.35cd	11.59± 0.22cd	8.02± 0.21e	12.85 **	1.05
种子横径/mm Seed horizontal diameter SH	14.15± 0.28abc	12.06± 0.15bcd	14.76± 0.01ab	13.99± 0.25abc	12.59± 0.16bcd	11.73± 0.68cd	12.37± 1.53bcd	12.64± 0.35bcd	10.42± 0.43d	16.21± 0.17a	12.09± 0.34bcd	11.33± 0.22cd	8.03± 0.21e	10.61 **	1.79
种子形态指数 SV/SH	1.010± 0.01bc	1.335± 0.016a	1.048± 0.00b	1.029± 0.01bc	1.030± 0.02bc	1.010± 0.00bc	1.010± 0.00bc	1.010± 0.00bc	1.010± 0.00bc	1.010± 0.00bc	1.010± 0.00bc	1.020± 0.00bc	1.002± 0.002c	99.18 **	3.90 **
种子大小指数 SV×SH	202.71± 7.78abc	194.06± 2.84abc	227.29± 0.65ab	201.94± 7.28abc	163.14± 3.70bcd	139.39± 15.89cd	171.50± 44.94bcd	162.51± 8.65bcd	111.60± 9.07de	266.02± 5.43a	148.43± 8.65bcd	131.59± 5.06cd	64.57± 3.34e	8.49 **	1.60

* 表示 $P<0.05$ 水平上差异显著; ** 表示 $P<0.01$ 水平上差异显著; 表中数据=均值±标准差, 且同行数据后不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)

上述可见,无患子种实表型性状不同程度的表现出边缘群体易于分化的特点,从各群体的地理分布来看,多数性状的地理变化规律不连续,然而不同性状在群体间多表现为显著性差异。无患子作为重要的工业原料树种,其果实质量和种子质量在一定程度上反映了提取皂苷和油脂的潜力,河南西峡群体的果实、种子质量均值在各群体中均为最大,可考虑作为无患子种实用优良种质资源收集的重点区域。

2.2 无患子种实表型性状变异特征

变异系数是统计学上表示变异程度的重要指标,可以反映性状值的离散特征,数值越大说明性状的离散度越大。由表 4 可见,无患子种实各性状在种群内个体间的变异大小因性状而异,种群内各性状的平均变异系数为 1.16%—16.47%,10 个表型性状的平均变异系数大小依次为种子大小指数($CV=16.47\%$)、种子质量($CV=9.81\%$)、果实质量($CV=9.44\%$)、种子横径($CV=8.24\%$)、种子纵径($CV=8.18\%$)、果实大小指数($CV=8.02\%$)、果实纵径($CV=4.81\%$)、果实横径($CV=3.75\%$)、果实形态指数

($CV=3.54\%$)和种子形态指数($CV=1.16\%$)。无患子种实各性状平均变异系数为 7.34%,其中果实的 5 个性状的变异系数为平均为 5.92%,小于种子的 5 个性状的变异系数平均值 8.77%,表明无患子果实表型性状的稳定性相对较高。通过对各群体种实表型性状变异系数的均值比较可知,安徽黄山和江西宜丰群体的各性状变异系数均值较大,分别为 25.75%和 14.78%,河南西峡群体的最小为 2.30%。分别对无患子果实、种子 5 个性状变异系数计算均值,结果表明,江西宜丰群体的果实性状变异系数最大($CV=15.99\%$),河南西峡群体最小($CV=1.64\%$),反映出西峡群体果实性状稳定性较高,宜丰群体较低;安徽黄山群体种子性状变异系数最大($CV=35.78\%$),浙江仙居群体最小($CV=1.12\%$),反映仙居群体种子性状稳定较高,而黄山群体较低。可见,无患子果实和种子性状变异不具有同步性,而同一性状在不同群体内的变异幅度的差异性,在一定程度上表明无患子生长环境异质性可能是导致群体种实表型变异的主要原因之一。

表 3 无患子天然群体种实表型性状的变异系数

Table 3 Variation coefficients of phenotypic traits in natural *S.mukorossi* populations

性状 Traits	浙江 遂昌	河南 西峡	浙江 仙居	广西 龙州	福建 武夷山	浙江 临安	安徽 黄山	浙江 龙泉	江西 宜丰	福建 建瓯	江西 上犹	贵州 榕江	湖北 武汉	浙江 遂昌
果实质量 FW/g	16.73	2.60	11.64	9.35	6.55	1.09	28.04	6.38	14.92	2.39	13.78	2.96	11.19	9.44
果实纵径 FV/mm	6.65	1.47	0.91	4.84	3.89	0.28	14.14	4.73	13.31	2.66	4.13	3.65	5.23	4.81
果实横径 FH/mm	5.86	0.74	2.42	3.70	2.09	3.56	7.82	1.80	15.57	1.54	2.82	1.17	2.33	3.75
果实形态指数 FV/FH	3.92	1.78	1.60	4.10	2.84	3.30	7.24	3.98	9.90	1.81	1.46	2.93	3.41	3.54
果实大小指数 FV×FH	11.92	1.60	3.31	7.65	5.59	3.74	21.40	5.90	26.25	3.99	6.94	4.59	7.31	8.02
种子质量 SW/g	16.99	4.24	3.32	16.07	3.02	10.00	34.87	8.32	13.59	2.69	6.51	4.79	6.18	9.81
种子纵径 SV/mm	6.76	1.06	0.71	5.94	2.88	10.04	34.95	8.35	13.64	2.69	6.36	4.72	5.90	8.18
种子横径 SH/mm	6.93	3.06	0.11	5.61	2.56	10.05	34.96	8.36	13.65	2.71	6.34	4.72	5.78	8.24
种子形态指数 SV/SH	3.68	2.91	0.80	2.44	2.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.45	1.16
种子大小指数 SV×SH	13.29	3.59	0.64	11.40	4.54	19.75	74.12	15.96	26.94	5.40	13.03	9.43	11.58	16.47
均值 Mean	9.27	2.30	2.55	7.11	3.68	6.18	25.75	6.38	14.78	2.59	6.14	3.89	5.93	7.34

2.3 无患子群体间种实性状的表型分化

表型分化系数与遗传分化系数相对应,表示群体间变异占遗传总变异的百分比,它反应了群体间表型分化的大小,其值越大,表明群体间的遗传分化越大,群体间的遗传变异也越大。根据巢式方差分析结果,分别计算无患子种实 10 个表型性状种群间、种群内的方差分量以及表型分化系数(表 4)。

可见,无患子种实表型性状在种群间、种群内的平均方差分量百分比分别为 39.93%和 27.26%,各性状在群体间的表型分化系数变异幅度为 0.98%—86.48%,其中表型分化系数最大和最小的性状分别为种子形态指数和果实形态指数,表明种子形态在种群间分化较大,而果实形态分化较小,相对稳定,这与前述性状变异系数的研究结果一致。无患子种

实各性状在群体间的平均表型分化系数为 62.21%，表明种实性状群体间变异大于群体内变异，种群间的种实表型多样性程度大于种群内，这反映出群体

遗传与环境交互效应的复杂关系及其适应环境的程度差异，是不同环境长期选择的结果，更是群体分化的源泉^[21]。

表 4 无患子表型性状的方差分量及种群间表型分化系数

Table 4 Variance components of phenotypic traits and V_{st} among different *S. mukorossi* populations

性状 Traits	方差分量			方差分量百分比			表型分化系数 V _{st} /%
	Variance component			Proportion of variance component/%			
	群体间 Among populations	群体内 Within population	随机误差 Random error	群体间 Among populations	群体内 Within population	随机误差 Random error	
果实质量 FW/g	0.95861	0.38403	0.41759	54.46	21.82	23.72	86.17
果实纵径 FV/mm	2.96973	2.24033	3.91097	32.56	24.56	42.88	63.73
果实横径 FH/mm	3.85648	1.98434	1.4931	52.58	27.06	20.36	79.07
果实形态指数 FV/FH	0.00019	0.00187	0.00629	2.23	22.38	75.39	0.98
果实大小指数 FV×FH	4927.9	2825.1	3445.2	44.01	25.23	30.77	75.26
种子质量 SW/g	0.05368	0.06132	0.0512	32.30	36.90	30.81	43.39
种子纵径 SV/mm	4.23861	2.84227	2.60067	43.78	29.36	26.86	68.98
种子横径 SH/mm	3.37574	2.40721	2.60977	40.22	28.68	31.10	66.29
种子形态指数 SV/SH	0.00564	0.00223	0.00126	61.79	24.44	13.77	86.48
种子大小指数 SV×SH	2080.1	2008.1	1790.9	35.38	34.16	30.46	51.76
均值 Mean	—	—	—	39.93	27.46	32.61	62.21

2.4 无患子种实表型性状与地理生态因子间的相关性

由表 5 可知,无患子果实质量、种子形态指数性状与 6 个地理生态因子间均表现为极显著相关($P<0.01$),其中果实质量与经度因子呈极显著正相关,且相关系数值相对较大($R=-0.027$),表明东部群体果实质量较大,而与海拔($R=-0.218$)、年平均气温($R=-0.202$)因子间呈极显著负相关,表明随着海拔

升高、温度下降,无患子果实质量变小。种子质量与经纬度间不存在显著相关关系,而与年平均日照时数($R=0.074$)、年平均气温($R=0.050$)间极显著正相关,与年平均降雨量($R=-0.152$)极显著负相关,表明种子质量受群体地理空间影响较小,相对稳定,在日照充足、温度相对较高的生长环境中更适于种子质量的累积,这也反映出无患子作为阳性树种的生物学特性。无患子种子形态指数与各地理生态因

表 5 无患子种实表型性状与生态因子的相关分析

Table 5 Correlation analysis between phenotypic traits and ecological factors

性状 Traits	纬度 Latitude (N)	经度 Longitude (E)	年平均气温 Average temperature/°C	年平均日照时数 Annual Average Sunshine Hours/h	海拔 Altitude/m	年平均降雨量 Precipitation/mm
果实质量 FW/g	0.093 **	0.270 **	-0.202 **	0.099 **	-0.218 **	-0.110 **
果实纵径 FV/mm	-0.097 **	0.015 **	0.083 **	0.078 **	0.044	-0.002
果实横径 FH/mm	-0.194 **	-0.024	0.211 **	0.111 **	-0.007	0.051 **
果实形态指数 FV/FH	0.065 **	0.031	-0.111 **	-0.042	0.085 **	-0.060 **
果实大小指数 FV×FH	-0.141 **	-0.004	0.143 **	0.117 **	0.020	0.025
种子质量 SW/g	0.011	0.036	0.050 *	0.074 **	-0.021	-0.152 **
种子纵径 SV/mm	-0.064 **	0.021	0.140 **	0.016	-0.008	-0.070 **
种子横径 SH/mm	-0.227 **	0.118 **	0.252 **	-0.126 **	0.021	0.161 **
种子形态指数 SV/SH	0.434 **	-0.256 **	-0.291 **	0.378 **	-0.077 **	-0.629 **
种子大小指数 SV×SH	-0.119 **	0.097 **	0.175 **	-0.028	0.005	0.057 *

子间的相关性较大,其密切程度依次为年均降雨量 ($R = -0.629$)、纬度 ($R = 0.434$)、年平均日照时数 ($R = 0.378$)、年平均气温 ($R = -0.291$)、经度 ($R = -0.256$)和海拔 ($R = -0.077$),表明种子形态受群体生长环境因子影响较大,西北部群体种子趋于椭圆形,东部、南部则趋于圆球形。各地理生态因子中,纬度、年平均气温与多数种实性状间呈显著相关关系,两者对无患子种实表型性状的影响较大,而种实性状与地理生态因子间不同的相关性,应是种实各部位对环境条件适应的外在表现。

2.5 无患子种实表型性状的主成分分析

通过对无患子 10 个种实表型形状进行主成分分析(表 6),得到无患子种实性状地理变异 4 个特征根大于 1 的主成分,第一主成分(PC-1)中种子大小指数、种子横径、种子纵径、种子质量载荷度较高,主要表征的是种子性状,贡献率为 55.475%;第二主成分(PC-2)中果实大小指数、果实横径、果实纵径、果实形态指数载荷度较高,主要表征的是果实性状,贡献率为 12.946%;第三主成分(PC-3)中果实形态指数、果实纵径载荷度较高,贡献率为 10.984%;上述 3 个主成分描述了无患子 10 个种实表型性状中约 80%的变异。

表 6 无患子不同群体种实表型性状的主成分分析

Table 6 The PCA of phenotypic traits in different *S. mukurossi* populations

性状 Traits	主成分 Component			
	1	2	3	4
果实质量 FW/g	0.412	0.089	-0.323	-0.287
果实纵径 FV/mm	0.342	0.834	0.420	0.015
果实横径 FH/mm	0.310	0.919	-0.217	0.039
果实纵横比 FV/FH	0.155	0.725	0.544	-0.029
果实纵横积 FV×FH	0.341	0.924	0.163	0.021
种子质量 SW/g	0.877	0.308	0.077	0.178
种子纵径 SV/mm	0.915	0.310	0.081	0.204
种子横径 SH/mm	0.918	0.303	0.087	-0.143
种子纵横比 SV/SH	0.099	0.755	-0.017	0.660
种子纵横积 SV×SH	0.926	0.290	0.106	0.004
特征值 Eigen value	6.275	2.667	1.793	1.028
贡献率 Contributive percentage%	55.475	12.946	10.984	10.626

根据 PC-1、PC-2 构建散点图,由图 1 可知,无患子不同群体的地理分布对无患子种实表型性状影响较大,对种子性状(PC-1)的影响大于果实性状(PC-2)。江西上犹、浙江临安、安徽黄山、河南西峡和浙江遂昌群体的种实表型性状受地理因子影响较小,湖北武汉、江西宜丰、贵州榕江群体则受地理因子影响较大,而浙江龙泉和福建武夷山两个群体的种实表型性状具有高度一致性。种实表型性状主要受到遗传因素控制,在不同地理分布区也会因适应不同的生境而产生多样性^[22]。无患子适应性强,自然分布范围广泛,栖息环境条件差异较大,在长期的进化过程中,造成地理隔离、生境片段化和基因流隔离,都会促使一定的表型变异的产生^[23]。

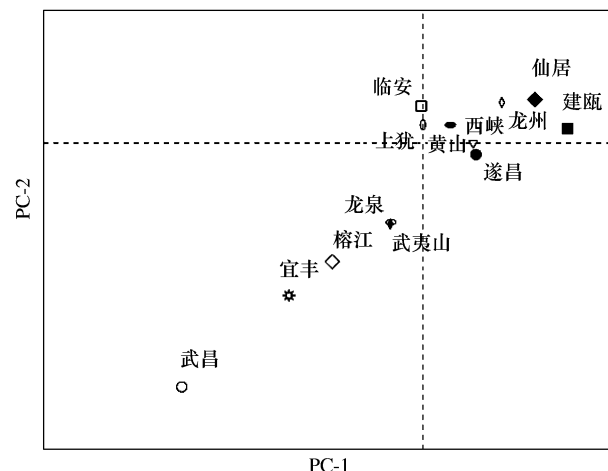


图 1 基于种实表型性状(PC-1、PC-2)的无患子天然群体关系
Fig. 1 The relationship among different *S. mukurossi* populations based on PC-1 and PC-2

3 结论与讨论

对无患子 13 个天然群体种实表型多样性研究表明,无患子种实表型性状在群体间、群体内变异都较为丰富,这些变异多是由于遗传和环境因素共同作用的结果,群体间、群体内多层次的变异为无患子优良种质资源保育和利用提供了物质基础。

3.1 无患子种实表型性状变异的多样性

表型性状变异是物种遗传变异的表现形式,是基因型和环境条件共同作用的结果^[24]。无患子种实表型性状在群体间和群体内存在显著或极显著的差异,群体间果实性状的平均变异系数(5.91%)小于种子性状(8.77%),表明果实性状较种子性状稳定。相关研究表明,植物群体间的变异程度能反映其对不同环境的适应程度,变异系数越大,适应的环境条件越广^[25];无患子种子性状平均变异系数较高,使得其适生性强,种群易于繁衍,可能是无患子在我国南方各地分布较广的原因之一。无患子果实质量、果实大小指数、种子质量和种子大小指数变异系数幅度为 8.02%—16.47%,平均为 10.94%,而果实和种子的纵径、横径和形态指数变异系数均值仅为 4.95%,表明无患子果实、种子的质量性状变异较大,而形状相对稳定,这与对毛茛(*Cornus walteri*)种实表型性状的研究结果一致^[26]。

群体间的多样性变异是种内多样性的重要组成部分^[27],反映了群体在不同环境中的适应状况,变异大小在某种程度上说明了物种对不同环境适应能力的高低^[21]。无患子群体间和群体内种实表型性状差异较大且表现不一致,变化较为复杂而不稳定。本文无患子取样群体基本涵盖其天然分布区,从西部山地到东部沿海、从热带北缘到亚热带北缘,地理生态因子差异较大,而分布广泛的种一般都表现出较高的遗传多样性^[28],因此地理隔离造成的基因交流障碍,很可能是促使无患子不同群体间种实表型性状变异较为丰富的主要原因^[27]。

3.2 无患子种实表型性状分化及其系统学意义

无患子种群间的变异是种实表型性状遗传变异的主要部分,其中天然群体表型分化系数(V_{st})的均值为 62.21%,高于皂角(*Gleditsia sinensis*) (20.42%)^[23]、川西云杉(*Picea likiangensis*) (36.53%)^[25]、毛茛(23%)^[26]和浙江柿(*Diospyros*

glaucofolia) (40.15%)^[29];低于山苍子(*Litsea cubeba*) (66.66%)^[30]、夏腊梅(*Sinocalycanthus chinensis*) (89.30%)^[31]、滇龙胆(*Gentiana rigescens* Franch.) (73.14%)^[32]等,表明种群间的表型分化程度高,这与本文对无患子变异模式的研究有相似之处。不同程度的表现出边缘群体易于分化的特点,多数性状的地理变化规律不连续。相关分析表明,无患子东部群体果实质量较大,种子质量受群体地理空间影响较小,而种子形态则受群体各地因子影响较大,西北部群体种子趋于椭圆形,东部、南部趋于圆球形。植物种实表型的地理变异一般比较复杂,因物种而异,如川西云杉种实性状存在经度和纬度并存的变异模式^[25],青海云杉(*Picea crassifolia*)呈现出以经度变异为主的梯度规律性^[33],山苍子则表现为以年平均降雨量和海拔高度为主的变化规律^[30],而本文研究结果表明,无患子不同地理群体间种实表型性状的变异与地理纬度和年平均气温两个主要因子密切相关。

无患子的表型变异主要存在于种群间,原因可能与无患子的繁育系统有关。相关研究认为,交配系统和基因流是影响种群遗传结构的最主要因素之一^[34]。无患子为虫媒传粉植物,有性繁殖是其种群繁衍的最主要方式,相比较风媒花粉传播的距离,无患子花粉的传播受到限制,从而导致种群间的基因水平相对较低,增加了无患子种群间分化的可能性。除繁育系统外,植物遗传多样性与物种的地理分布范围有着密切的关联性。一般说来,环境异质性是决定物种变异的极其有利的因素,在较大的规模上看,种群间变异的量值取决于其地理和生态分布区^[35],小种群的相互隔离和遗传漂变是导致其遗传变异大幅下降、种群间遗传分化加大的主要原因^[34,36]。无患子适生性强,广泛分布于我国南方各地,以至缅甸、尼泊尔等国亦有分布,宽泛的环境异质性也是造成无患子地理群体间种实表型性状分化的重要原因。

3.3 无患子种质资源的保育与利用

无患子冠形优美、秋叶金黄,是我国南方地区重要的彩叶树种,同时,其果皮皂苷含量丰富、种仁油脂含量高,又为环境友好型天然洗涤剂原料树种和重要生物质能源树种。无患子自然分布跨度大,生长环境条件复杂,通过长期的地理隔离、自然选择,

使得无患子群体间和群体内存在丰富的变异,这为无患子选择育种奠定了重要物质基础。目标改良性状变异几率越大,变异幅度越大,选择效果越好,因此,在无患子遗传改良工作中既要重视不同地理群体间目标性状的变异格局,也应注重对群体内重要性状的变异分析,同时综合考虑子代遗传的稳定性,提高优良种质资源的选择力度。无患子种实丰富的表型变异为其资源良种化和产业化提供了广阔的前景,但目前针对该树种的种质资源评价、良种选育、栽培管理、生产加工等更进一步的研究尚缺乏系统性,在国家倡导发展新兴生物产业的需求下,本文研究结果对无患子种质资源收集、遗传多样性保护以及遗传改良工作具有一定的指导意义。

References:

- [1] Pigliucci M, Murren C J, Schlichting C D. Phenotypic plasticity and evolution by genetic assimilation. *Journal of Experimental Biology*, 2006, 209(12): 2362-2367.
- [2] Greipsson S, Davy A J. Seed mass and germination behaviour in populations of the dune-building grass *Leymus arenarius*. *Annals of Botany*, 1995, 76: 493-501.
- [3] Liu Z L, Yu M K, Tang L Z, Fang S Z. Variation and cluster analyses of morphological characters and nutrient content of *Quercus acutissima* seed from different provenances. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2009, 18(1): 36-41.
- [4] Zeng J, Zheng H S, Gan S M, Bai J Y. Phenotypic variation in natural populations of *Betula alnoides* in Guangxi, China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(2): 59-65.
- [5] Flora of China Editorial. *Flora Republicae Popularis Sinicae* (V. 47-1). Beijing: Science Press, 1998: 14-15.
- [6] Shao W H, Jiang J M, Dong R X, Yue H F, Diao S F. Geographic variation of saponins contents in *Sapindus mukorossi* peels from different habitats. *Bulletin of Botanical Research*, 2012, 32(5): 627-631.
- [7] Rupeshkumar G, Surekha S K, Balu C A, Arun B G. Study of functional properties of *Sapindus mukorossi* as a potential bio-surfactant. *Indian Journal of Science and Technology*, 2011, 4(5): 530-533.
- [8] Huang S M, Wang J W, Du M H, Zhang J P, Jiang J M. Fatty acid composition analysis of *Sapindus mukorossi* Gaertn. seed oil. *China Oils and Fats*, 2009, 34(12): 74-76.
- [9] Sun S D, Ke X Q, Cui L L, Yang G L, Bi Y L, Song F F, Xu X D. Enzymatic epoxidation of *Sapindus mukorossi* seed oil by perstearic acid optimized using response surface methodology. *Industrial Crops and Products*, 2011, 33(3): 676-682.
- [10] <http://www.forestry.gov.cn/portal/swzny/s/731/content-544875.html>
- [11] Liu G B, Zhao X X, Hu D N, Liu Y Q, Huang C G, Huang Z, Du T Z, Xiong C L, Dong Z H. Study on extraction and physiochemical properties of *Sapindus mukorossi* seed oil and preparation of biodiesel. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2013, 28(3): 59-64.
- [12] Kanchanapoom T, Kasai R, Yamasaki K. ChemInform abstract: Acetylated triterpene saponins from the Thai Medicinal Plant, *Sapindus emarginatus*. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 2001, 49(9): 1195-1197.
- [13] Guo Y, Xie J P, Liu A H, Hu X G, Luo Y P, Wu Z Q, Bao F K. Overview of the pharmacological action of *Sapindus mukorossi*. *Journal of Pathogen Biology*, 2011, 6(11): 873-874.
- [14] Kim H T, Yang B H, Park Y H, Liu J R. Somatic embryogenesis in leaf tissue culture of *Soapberry* (*Sapindus mukorossi* Gaertn.). *Plant Biotechnology*, 2012, 29(3): 311-314.
- [15] Upma Dobhal, Snehlata Bhandari, Shivani Bisht. Plant regeneration through somatic embryogenesis in *Sapindus mukorossi*. *Plant Archives*, 2012, (1): 219-221.
- [16] Yue H F. Study on the Geographic Variation of Main Economic Characters of *Sapindus mukorossi* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2010.
- [17] Li B, Gu W C, Lu B M. A study on phenotypic diversity of seeds and cones characteristics in *Pinus bungeana*. *Biodiversity Science*, 2002, 10(2): 181-188.
- [18] Ge S, Wang M X, Chen Y W. An analysis of population genetic structure of masson pine by isozyme technique. *Scientia Silvae Sinicae*, 1988, 24(4): 399-409.
- [19] Jing X H, Cao L, Zang R G. Spatial distribution of tree species richness in Xiaodonggou forest region of the Altai Mountains, Northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(9): 2886-2895.
- [20] Zhou X, He Z B, Kang H Z, Sun X, Liu C J. Variations of seed morphology related to climate for *Quercus variabilis* across temperate-subtropical China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(6): 481-491.
- [21] Pang G C, Jiang D M. Population genetic diversity and data analysis. *Scientia Silvae Sinicae*, 1995, 31(6): 543-550.
- [22] García D, Zamora R, Gómez J M, Jordano P, Hódar J A. Geographical variation in seed production, predation and abortion in *Juniperus communis* throughout its range in Europe. *Journal of Ecology*, 2000, 88(3): 435-446.
- [23] Li W, Lin F R, Zheng Y Q, Li B. Phenotypic diversity of pods and seeds in natural populations of *Gleditsia sinensis* in southern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(1): 61-69.
- [24] Merril D J. *Ecological Genetics*. London: Longman, 1987.
- [25] Gu Y J, Luo J X, Wu Y W, Cao X J. Phenotypic diversity in natural populations of *Picea bafou-rana* in Sichuan, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(2): 291-301.

- [26] Kang Y X, Zhao B X, Yun Y J, Chen M. Study on phenotypic diversity of seeds and fruits' characteristics in *Cornus walteri*. Journal of Northwest A and F University: Nature Science Edition, 2011, 39(9): 107-117.
- [27] Hartl D L, Clark A G. Principles of Population Genetics. Sunderland: Sinauer Associates, Inc., 1997.
- [28] Zhang D Q, Yang Y P. A statistical and comparative analysis of genetic diversity detected by different molecular markers. Acta Botanica Yunnanica, 2008, 30(2): 159-167.
- [29] Jing Z H, Li H, Shao W H, Yue H F, Jiang J M. Phenotypic diversity of natural populations in *Diospyros glaucifolia*. Bulletin of Botanical Research, 2010, 30(3): 325-331.
- [30] Tian S P, Wang Y D, Chen Y C, Han X J. Phenotypic diversity of natural *Litsea cubeba* population's leaf and fruit traits. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(7): 1665-1672.
- [31] Jin Z X, Gu J J, Li J M. Genetic variation among populations of the endangered *Sinocalycanthus chinensis* based on morphological traits and ISSR profiles. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(12): 3849-3858.
- [32] Yang W Z, Jin H, Yang M Q, Zhao Z L, Zhang Z H, Wang Y Z, Zhang J Y. Phenotypic diversity and environment relations in *Gentiana rigescens* of Yunnan. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2012, 32(7): 1326-1334.
- [33] Wang Y L, Li Y. Study on phenotypic diversity of cone and seed in natural populations of *Picea crassifolia* in Qilian Mountain, China. Journal of Plant Ecology: Chinese Version, 2008, 32(2): 355-362.
- [34] Ge S, Wang H Q, Zhang C M, Hong D Y. Genetic diversity and population differentiation of *Cathaya argyrophylla* in Baimian Mountain. Acta Botanica Sinica, 1997, 39(3): 266-271.
- [35] Yang J. Intraspecific variation in plant and the exploring methods. Journal of Wuhan Botanical Research, 1991, 9(2): 185-195.
- [36] Ge S, Hong D Y, Wang H Q, Liu Z Y, Zhang C M. Population genetic structure and conservation of an endangered conifer, *Cathaya argyrophylla* (Pinaceae). International Journal of Plant Sciences, 1988, 159(2): 351-357.
- [8] 黄素梅, 王敬文, 杜孟浩, 张金萍, 姜景民. 无患子籽油脂脂肪酸成分分析. 中国油脂, 2009, 34(12): 74-76.
- [11] 刘光斌, 赵晓霞, 胡冬南, 刘苑秋, 黄长干, 黄忠, 杜天真, 熊春兰, 董振浩. 无患子油脂的提取、理化性质及其制备生物柴油的研究. 中国粮油学报, 2013, 28(3): 59-64.
- [13] 郭英, 谢建平, 柳爱华, 胡兴国, 罗艳萍, 吴知情, 宝福凯. 无患子药理作用概述. 中国病原生物学杂志, 2011, 6(11): 873-874.
- [16] 岳华峰. 无患子主要经济性状的地理变异研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- [17] 李斌, 顾万春, 卢宝明. 白皮松天然群体种实性状表型多样性研究. 生物多样性, 2002, 10(2): 181-188.
- [18] 葛颂, 王明麻, 陈岳武. 用同工酶研究马尾松群体的遗传结构. 林业科学, 1988, 24(4): 399-409.
- [19] 井学辉, 曹磊, 臧润国. 阿尔泰山小东沟林区乔木物种丰富度空间分布规律. 生态学报, 2013, 33(9): 2886-2895.
- [20] 周旋, 何正彪, 康宏樟, 孙道, 刘春江. 温带-亚热带栓皮栎种子形态的变异及其与环境因子的关系. 植物生态学报, 2013, 37(6): 481-491.
- [21] 庞广昌, 姜冬梅. 群体遗传多样性和数据分析. 林业科学, 1995, 31(6): 543-550.
- [23] 李伟, 林富荣, 郑勇奇, 李斌. 皂荚南方天然群体种实表型多样性. 植物生态学报, 2013, 37(1): 61-69.
- [25] 辜云杰, 罗建勋, 吴远伟, 曾小军. 川西云杉天然种群表型多样性. 植物生态学报, 2009, 33(2): 291-301.
- [26] 康永祥, 赵宝鑫, 负玉洁, 陈绵. 毛栎天然群体种实表型多样性研究. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(9): 107-117.
- [28] 张德全, 杨永平. 几种常用分子标记遗传多样性参数的统计分析. 云南植物研究, 2008, 30(2): 159-167.
- [29] 井振华, 李皓, 邵文豪, 岳华峰, 姜景民. 浙江柿天然群体表型多样性研究. 植物研究, 2010, 30(3): 325-331.
- [30] 田胜平, 汪阳东, 陈益存, 韩小娇. 山苍子天然种群叶片和种实性状的表型多样性. 生态学报, 2012, 32(7): 1665-1672.
- [31] 金则新, 顾婧婧, 李钧敏. 基于形态及分子标记的濒危植物夏蜡梅自然居群的遗传变异研究. 生态学报, 2012, 32(12): 3849-3858.
- [32] 杨维泽, 金航, 杨美权, 赵振岭, 张智慧, 王元忠, 张金渝. 云南滇龙胆居群表型多样性及其与环境关系研究. 西北植物学报, 2011, 31(7): 1326-1334.
- [33] 王娅丽, 李毅. 祁连山青海云杉天然群体的种实性状表型多样性. 植物生态学报, 2008, 32(2): 355-362.
- [34] 葛颂, 王海群, 张灿明, 洪德元. 八面山银杉林的遗传多样性和群体分化. 植物学报, 1997, 39(3): 266-271.
- [35] 杨继. 植物种内形态变异的机制及其研究方法. 武汉植物学研究, 1991, 9(2): 185-195.

参考文献:

- [3] 刘志龙, 虞木奎, 唐罗忠, 方升佐. 不同种源麻栎种子形态特征和营养成分含量的差异及聚类分析. 植物资源和环境学报, 2009, 18(1): 36-41.
- [4] 曾杰, 郑海水, 甘四明, 白嘉雨. 广西西南桦天然居群的表型变异. 林业科学, 2005, 42(2): 59-65.
- [5] 《中国植物志》编辑委员会. 中国植物志第四十七卷(第1分册). 北京: 科学出版社, 1998: 14-15.
- [6] 邵文豪, 姜景民, 董汝湘, 岳华峰, 刁松峰. 不同产地无患子果皮皂苷含量的地理变异研究. 植物研究, 2012, 32(5):

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.6 Mar., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Impacts of global warming on litter decomposition SONG Piao, ZHANG Naili, MA Keping, et al (1327)
- From system to landscape: the other orientation of regional material flow analysis ZHANG Xiaogang, ZENG Hui (1340)
- A multi-dimensional approach for wetland ecosystem service valuation SONG Yuqin, ZHANG Xiaolei (1352)
- Molecular mechanisms of the insect juvenile hormone JIN Minna, LIN Xinda (1361)
- Microbial deterioration in ancient cave and wall paintings LI Qiang, GE Qinya, PAN Xiaoxuan, et al (1371)
- Study on ecological safety evaluation and warning of wetlands in Tumen River watershed based on 3S technology
..... ZHU Weihong, MIAO Chengyu, ZHENG Xiaojun, et al (1379)
- A review of transboundary protected areas network establishment WANG Wei, TIAN Yu, CHANG Ming, et al (1391)

Autecology & Fundamentals

- Water consumption characteristics and water use efficiency of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* and bamboo-willow
seedlings QIU Quan, PAN Xin, LI Jiyue, et al (1401)
- Three warming scenarios differentially affect the morphological plasticity of an invasive herb *Alternanthera philoxeroides*
..... CHU Yanmei, YANG Jian, LI Jingji, et al (1411)
- The influence of meteorological factors and soil physicochemical properties on karst processes in six land-use patterns in summer
and winter in a typical karst valley LIU Wen, ZHANG Qiang, JIA Yanan (1418)
- Effects of nanocarbon application on nitrogen absorption and utilization of flue-cured tobacco
..... LIANG Taibo, YIN Qisheng, ZHANG Yanling, et al (1429)
- The stand spatial model and pattern based on voronoi diagram LIU Shuai, WU Shuci, WANG Hong, et al (1436)
- Dynamic analysis of spatial structure in a close-to-nature *Phyllostachys edulis* stands
..... QIU Jianxi, TANG Mengping, SHEN Lifen, et al (1444)
- Phenotypic diversity in natural populations of *Sapindus mukorossi* based on fruit and seed traits
..... DIAO Songfeng, SHAO Wenhao, JIANG Jingmin, et al (1451)
- Development of compatible biomass models for trees from different stand origin ... FU Liyong, LEI Yuancai, SUN Wei, et al (1461)

Population, Community and Ecosystem

- The impact of understory vegetation structure on growth of *Polygonatum cyrtoneura* in extensively managed *Phyllostachys edulis*
plantation FAN Yanrong, CHEN Shuanglin, YANG Qingping, et al (1471)
- Short-term effects of CO₂ concentration elevation, warming and transgenic *Bt* rice cropping on soil labile organic carbon and
nitrogen, and nematode communities CHEN Jing, CHEN Fajun, LIU Manqiang, et al (1481)
- Temporospatial variations in net ecosystem productivity in Northeast China since 1961
..... LI Jie, ZHANG Yuandong, GU Fengxue, et al (1490)
- Assessment of the habitat suitability for waterfowls in the Panjin, Liaoning with GIS and remote sensing
..... DONG Zhangyu, LIU Dianwei, WANG Zongming, et al (1503)
- Distribution of soil macropores and their influence on saturated hydraulic conductivity in the Huoditang forest region of the
Qinling Mountains LU Bin, ZHANG Shengli, LI Kan, et al (1512)

- Influences of phosphorus concentration on interactions among *Microcystis aeruginosa*, *Daphnia magna* and *Ceratophyllum demersum* ...
 MA Jianmin, JIN Ping, GUO Meng, et al (1520)
- Allelopathic inhibition and mathematical models of *Chara vulgaris* extracts on two freshwater algae species
 HE Zongxiang, LIU Lu, LI Cheng, et al (1527)
- Flora analysis of riparian vegetation in Yongding-Haihe river system, China XIU Chen, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua (1535)
- Stream habitat assessment of Dong River, China, using *River Habitat Survey* method
 WANG Qiang, YUAN Xingzhong, LIU Hong, et al (1548)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Appling SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the streamflow in a Watershed of Northern
 China GUO Juntong, ZHANG Zhiqiang, WANG Shengping, et al (1559)
- Climate response of tree growth along an altitudinal gradient in the Changbai Mountains, Northeast China
 CHEN Li, YIN Yunhe, ZHAO Dongsheng, et al (1568)
- The dispersion of airborne pollen and its relationship with major climatic parameters in Shijiazhuang
 LI Ying, LI Yuecong, LÜ Suqing, et al (1575)
- The change of soil carbon and nitrogen under different grazing gradients in Hulunber meadow steppe
 YAN Ruirui, XIN Xiaoping, WANG Xu, et al (1587)
- Spatial distribution and influencing factors of farmland soil organic matter and trace elements in the nansihu region
 WU Jie, LI Yuhuan, LI Zengbing, et al (1596)

Resource and Industrial Ecology

- Transnational land use and its potential environmental consequence LU Xiaoxuan (1606)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 薛建辉

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 34 卷 第 6 期 (2014 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 6 (March, 2014)

编 辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 王如松
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂
发 行 科 学 出 版 社
地址:东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel: (010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief WANG Rusong
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元