

格局在变化

王豁然

迁徙与适应

江泽平

中国和澳大利亚的气候比较研究

阎洪

中国桉树人工林的遗传多样性与长期生产力的可持续性

魏润鹏

我国引种的杨树遗传资源保存与利用

苏晓华 丁明明 黄秦军

外来树种在城市景观建设中的应用

李延峻 张淑珍 张静

格局在变化

王豁然

摘要：本文概述人类通过树木引种活动改变地球表面的树种分布格局和森林地理景观。随着科学技术的飞速发展和经济全球化进展，人类作为生物体的传播媒介必将加速改变生物在地球表面的分布格局，森林地理景观将不断地发生变化。

关键词：树种分布；格局变化；树木引种

A Review of Changing Distribution Patterns of Forest Species by Tree Introduction

Wang Huoran

(Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091)

Abstract: This paper generally outlined the distribution patterns of forest tree species and the landscape which has formed in the natural revolution is being changed by tree introduction as a dispersal agent, and this change will certainly be further sped up as modern science, technology and economic globalization develop rapidly and increasingly.

Key words: Species distribution; Geographical patterns; Tree introduction

生物地理学 (biogeography) 是对地球表面物种分布寻求解释的科学。顾名思义，其研究领域涉及生物学和地理学两个方面。在长期的自然进化历史中，动植物在地球表面的分布形成了一定的地理格局。这种格局尽管在不同的地质时期不断地变化，但是在特定的历史时期是相对稳定的 (Ridley, 1993; Tivy, 1993; 贺善安和顾姻, 1998)。这就是我们今天看到的每个树种都有一定的自然分布区，形成地球表面的植被类型和森林地理景观。

早在 1804 年，植物地理学之父洪保德 (Von Humboldt) 率先开始描述他在南美旅行期间所观察到的植物与地理环境。此后，人们努力寻求对植物的变异和自然环境的变化作出的科学解释，发现生物对其生长的自然环境具有适应性，那些最适应的生物在特定的生存环境中经历着自然选择过程。正是选择和适应这两个相互联系的基本概念，奠定了达尔文 (Charles Darwin) 进化论和物种起源的理论基础 (Tivy, 1993)。

地球表面的植物分布大致可分为 3 种类型：特有种 (endemic)、广布种 (cosmopolitan) 和间断分布种 (disjunctive)。特有种自然分布于有限的地理区域，例如杜仲 *Eucommia ulmoides* Oliv.；广布种亦称世界种，几乎可见于地球上各个大洲，例如欧洲刺柏 *Juniperus communis* L. 和车前草 *Plantago major* L.；很多树种地理分布产生间断，例如我国的华山松 *Pinus armandii* Franch.、澳大利亚的巨桉 *Eucalyptus grandis*、亮果桉 *Eucalyptus nitens* 和假山毛榉 *Nothofagus* spp.。地理间断分布模式的产生，或者由于长距离的传播、种群边界移动，或者由于气候变化所导致的群体灭绝 (Ridley, 1993; Pryor, 1971)。

所有森林树种都是从共同祖先演化而来的，针叶树具有大约 2 亿年的历史，出现于地球大陆解体之前，而阔叶树大约具有 1 亿年的历史 (Ridley, 1993)。大约 370 万年以前，地球开始变冷，有助于寒温带树种在迁徙过程中形成，更近的冰川期造成物种的大规模迁移，反复的进退促使种内群体分化，有些在庇护所得以子遗，如水杉 *Metasequoia glyptostroboides* Hu et Cheng 和马尖相思 *Acacia mangium*，有些群体具有较大的生态适应范围，

则跨越很宽的地理纬度和海拔高度 (Conkle, 1992)。一个树种的地理分布决定于其生态特征, 只要自然环境因子 (诸如温度、湿度和土壤等等) 能够满足这个树种的生态耐受极限 (tolerant limit), 从理论上说, 无论是地球上的任何地方, 它都能存活下来 (Ridley, 1993)。但是, 由于自然界中无处不在的强烈的种间竞争, 任何一个树种的现实分布区都小于其生态耐受区 (ecologically tolerant range)。用生态学术语来说, 现实生态位 (realized niche) 小于理论生态位 (fundamental niche)。反过来看, 每个树种现在的实际分布区都有扩展的潜力。正是由于这种空间差异的存在, 为动植物引种提供了可能性。因此, 树木引种就是通过野外试验来确定满足树种生存和发育的自然环境因子。

影响一个树种自然分布的地理因素有 3 种: 物种的传播能力、气候变化和地质变动, 包括造山运动和大陆漂移。生态学的、历史的和生物学的 3 种作用一起使不同树种在相当长的历史时期内, 相互隔绝, 独立进化, 形成树种和森林植被的地理格局多样化, 同时也在不断地改变地球表面地理景观的格局而产生多样性 (埃尔顿, 1958; Ridley, 1993)。

但是, 在人类出现以后, 人类成为树种跨越地理空间的主要传播媒介。人类活动使过去相互隔离的树种产生交换, 加速树种跨越大陆的流动, 不仅进一步改变了树种分布的地理格局, 甚至于对乡土树种和生物多样性产生强烈冲击过去需要千百万年的树种地理空间转移, 现在只需几十年, 甚至几年时间即可完成。由于人为传播克服了地理空间障碍, 一个树种在转移到新的栖息地之后, 能否驯化并建立起新的群体 (land race), 则主要取决于树种的遗传性。正如英国生物学家埃尔顿 (1958) 所指出的, “ 现在造成物种扩散和定居最主要的原因之一, 是从事种植行业的人们在世界范围内所进行的活动, 特别是他们有意的引进农作物、花卉和树木的行为 ”。他又精彩地评价说, “ 这是对一个国家植被的非常重要的贡献 ”。

树木引种是人为地将一个物种、亚种或更低的分类群, 包括任何能够存活的并且最终能够繁殖的繁殖体, 迁移出其自然分布区, 无论是过去的还是现在的分布区。这种树种迁移, 既可以在一个国家之内也可以在国家之间。实际上, 树木引种就是人为干扰和调整长期自然进化过程中地球表面树木分布的地理格局。

近 1 个世纪以来, 世界范围内的树种转移及其效应累积, 已打破 100 年前的树种分布地理格局。地理格局的改变, 尤其体现在那些既有较宽的生态适应幅度和遗传可塑性, 又具有较高经济价值而满足人类社会特殊需求的树种。现在让我们在全球尺度上来看一些主要树种的地理分布格局的变化。

FAO 发表的统计数据表明, 在所调查的 1121 个树种中, 680 种作为外来树种栽培在它们的自然分布区以外, 用于林业、农林体系 (agroforestry system) 和美化观赏 (Haysom and Murphy, 2003)。当然 这个统计是不完全的。但是, 它充分说明自然界中很多树种在人为作用下发生在其自然分布区以外, 改变了树种的自然分布格局。

人类的三大饮料树种, 茶 *Camellia sinensis* (L.) Kuntze.、咖啡 *Coffea arabica* L. 和可可 *Theobroma cacao* L. 与原产南美的巴西橡胶 *Hevea brasiliensis* (A. Juss.) Muell. 在世界范围内适宜地区广泛引种栽培。松属 *Pinus* spp.、杨属 *Populus* spp.、桉树、相思 *Acacia* spp.、石梓 *Gmelina arborea* Roxb.、柚木 *Tectona grandis* L. 等许多树种被引种到起自然分布区以外, Evans (1982) 估计, 松树、桉树、相思、柚木在世界热带地区人工林面积中占 85% 以上。

松属树种在南半球没有自然分布, 主要分布于亚洲、北美洲和中美洲, 中国和墨西哥是松属遗传多样性中心, 很多松属树种在第三纪早期向南迁移进入墨西哥 (《中国植被》编委会, 1980; Perry, 1991; Dvorak *et al.*, 2000)。美国学者 Ledig (1996) 说: “ 墨西哥献给世界的礼物一个是玉米, 另一个便是松树 ”。现在, 辐射松 *Pinus radiata* D. Don、加勒比松 *Pinus caribaea* Morelet 和墨西哥松 *Pinus patula* Schl. et Cham. 等松树广泛地栽培于智利、新西兰、南非和澳大利亚, 辐射松人工林面积已经超过 400 万 hm^2 ①。CAMCORE 的松树引种、地理种源和基因资源保存项目 (Dvorak, 2000) 进一步打破了中美洲松树自然分布界限。松树人工林明显地改变了南半球的森林地理景观。

澳大利亚桉树遗传资源为全世界的人工林业的发展作出巨大贡献, 全世界桉树人工林面积估计在 2000 万 hm^2 。桉树在世界热带、亚热带国家和地区广泛引种, 在工业用材林、城市绿化和立地恢复等生态建设项目中大规模应用, 打破了桉树地理分布格局, 使之不仅限于生长在华莱士线以东的澳大利亚及其附近的太平洋岛屿 (Pryor, 1976); 另一方面, 改变了热带、亚热带一些地区的自然地理景观, 并且对这些地区的生物多样性

① http://www.cintrafor.org/RESEARCH_TAB/links/Fs/FS07.htm

和传统美学文化产生强烈影响。木麻黄被引种到许多立地困难地区，用于防护和生态建设，在中国沿海构筑绿色长城，在非洲撒哈拉沙漠为单调的沙漠景观增添绿色生机。最近 100 年的树木引种活动将许多澳大利亚特有种转移出自然分布区。反过来；澳大利亚不仅从北半球引种针叶树，还引种许多落叶阔叶树种，如杨树、柳树和栎树 *Quercus* spp.，用于营建人工林和城市景观建设。

欧洲受冰川影响最为严重，冰川所到之处，大量物种灭绝。欧洲森林遗传资源根本不能与亚洲和美洲相比，非常贫乏（埃尔顿，1958）。以英国为例，乡土树种只有 35 种，但是英国人自己说，现在沿着乡间小路散步就好像进入树木园一样，会看到许多从世界各地引种的不同树木。我曾经在威尔士和英格兰边界的一个小村附近见过引种的冈尼桉 *Eucalyptus gunnii* J. D. Hook. 在苏格兰最北部见过大洋洲南洋杉 *Araucaria heterophylla* Franco. 原产北美太平洋沿岸的锡加云杉 *Picea sitchensis* (Bong.) Carr.、北美黄杉 *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco、日本落叶松 *Larix kaempferi* (Lamb.) Carr. 和刺槐在欧洲都用于营造人工林。

中国引种的外来树种的来源，在地理上可大致分为 6 个区 这与 Wallace 研究世界动物地理分布所划分的 6 个生物地理区（Ridley, 1993）有些偶然地巧合和类似。由于降雨类型的差异对树种转移的影响（Pryor, 1976; Zobel and Talbert, 1984），将地中海气候类型区与欧洲归在一起。我国从北美、中南美洲和大洋洲引进的树种最多；东亚地区次之；从欧洲和地中海气候区引进的树种近年有所增加，主要用于绿化观赏；从非洲引种的树种最少。

中国，在 20 世纪 80 年代以前已引进外来树种 85 个科 570 种（吴中伦，1983），近 30 年来肯定有很大的增加。北方温带地区引种栽培的刺槐和杨树，长江流域的火炬松和湿地松，华南的桉树、相思和木麻黄已经使这些地区退化的立地恢复植被，同时显著地改变了这些地区的原有的地理景观。

随着科学技术的飞速发展和经济全球化进展，人类作为生物体的传播媒介必将进一步改变生物在地球表面的分布格局，森林地理景观将不断地发生变化。恰如埃尔顿（1958）半个世纪以前所说：“世界范围内的动物区系和植物区系的原有格局正在被打破，我们正目睹着这种变化”。

参考文献

- 贺善安，顾姻．1998．中国树木引种驯化历史回顾与 21 世纪展望．见：王豁然等编．林木引种驯化与森林可持续经营．北京：中国环境出版社，1～10
- 吴中伦等编．1983．国外树种引种概论．北京：科学出版社
- 张润立，任立等译．2003．埃尔顿著．动植物入侵生态学（英）．北京：中国环境科学出版社，222
- 《中国植被》编委会．1980．中国植被．第 4 章．北京：科学出版社，82～142
- Conkle M T. 1992. Genetic diversity-seeing the forest through the trees. In W. T. Adams, S. H. Strauss, D. L. Copes and A. R. Griffin eds: Population Genetics of Forest Trees. Kluwer Academic Publishers, 5 - 22
- Dvorak W S. 2000. Foreword. In: conservation & testing of tropical and subtropical forest tree species by the CAMCORE Cooperative, College of Natural Resources, NCSU. Raleigh, NC, USA.
- Dvorak W S, Jordan A P, Hodge G R, Romero J L and Woodbrige W C. 2000. The evolutionary history of the Mesoamerican Oocarpaceae. In: conservation & testing of tropical and subtropical forest tree species by the CAMCORE Cooperative, College of Natural Resources, NCSU. Raleigh, NC, USA.
- Evans J. 1982. Plantation forestry in the Tropics. Clarendon Press. Oxford, UK
- Haysom K A and Murphy S T. 2003. The status of invasiveness of forest tree species outside their natural habitat: a global review and discussion paper. Working Paper FBS/3E. FAO, Rome, Italy. 75 pp
- Ledig T. 1996. North American Temperate Forests. In Rogers, Deborah L. and Ledig F. Thomas eds. 1996. The status of temperate North American Forest Genetic Resources. Report No. 16. University of California Genetic Resources Conservation Program, Davis, CA
- Perry J P. 1991. The Pines of Mexico and Central America. Timber Press, Oregon. 231 pp
- Pryor L D and Johnson L A S. 1971. 王豁然译．桉树分类．哈尔滨：东北林业大学出版社，1986
- Pryor L D. 1976. Biology of Eucalypts. Studies in Biology No. 61. Edward Arnold. 83 pp
- Ridley M. 1993. Evolution. Blackwell Scientific Publications, 479 - 500
- Tivy J. 1993. Biogeography. A study of plants in the Ecosphere. 3rd edition, Longman Scientific & Technical, 452 pp
- Zobel B J and Talbert J. 1984. Applied tree improvement. Wiley, New York. 521 pp

迁徙与适应

江泽平

摘要：根据树种分布区的起源演化、种内的资源利用差异和遗传分化，提出了树种生态适应对策的新分类方案，即分为子遗种、专化种和泛化种 3 种类型。同时，指出树木在引种栽培地区有良好生长表现的两种不同驱动力：环境顺力和环境压力。这两种动力对不同的树种其效应不同。在此基础上，对树种引种栽培区的确定、引种对策以及遗传改良技术进行了分析。此外，文章还对树种异地（*ex situ*）生存的稳定性问题进行了讨论。

关键词：树木；引种；适应性

Immigration and Adaptation of Forest Trees to the Environment

Jiang Zeping

(Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091)

Abstract: This is a conceptual paper to discuss immigration and adaptation regimes of forest trees. Each species of forest trees has, in the long natural history, evolved an adaptive mechanism to the environment in which it lives in generation by generation. However, tree species must develop a new regime to get adapted to the new environment under the interaction of environment-driving and stress forces after they have been transferred as exotics.

Key words: Forest trees; Introduction and domestication; Immigration and adaptation

国外树种的引种和国内乡土树种的驯化已被证明是现代林业的重要内容，因此发展现代树木引种理论就显得尤为重要（王豁然等，1998；吴中伦等，1995；江泽平，1995；潘志刚等，1994）。树种的异地（*ex situ*，也叫易地或迁地）迁移和适应机理是林木引种理论研究的重要方面，也是开展生物多样性保存的重要基础。例如单位面积上可容纳的物种数目、树种异地生存的稳定性和不同适应对策和物种的配置等等一系列问题均与之有关。此外，在林木遗传改良中也涉及到树种适应性和优良种源或家系的稳定性问题。

树种的适应性是一个老问题，但不同使用者有不同理解。至今还没有一个统一、可以定量描述的定义。

1 传统树木引种理论的思考

进行树木引种时，首先面临着如何确定树种适生栽培区的问题。目前占主导地位的理论仍然是气候相似论和在此基础上扩展的环境相似论或生物气候匹配论。但此理论在应用时，有 4 点明显缺陷。第一，过分强调现代气候（或环境）的影响，忽略了历史因素，没有检验树种的现存分布区是否就是其潜在分布区的完善的理论和技术。例如，不能根据水杉 *Metasequoia glyptostroboides* 的自然分布区预测其可栽培地区。而且，还难于选择用于比较的生态因子。例如寒冷指标的表达，究竟是选用最冷月平均最低温度，还是最冷月极端最低温度，还是生长季末的降温速度，还是寒潮，抑或是春季的晚霜？第二，没有充分考虑遗传因素，忽略了树种的地理变异及其适应对策的分化。例如，南非在引种卵果松 *Pinus oocarpa* 时，曾因采用不恰当的种源而得出“卵果松不适合南非”的错误结论。第三，忽略了栽培措施的重要作用，如菌根、杂交育种、人工防寒技术等。第四，没

有考虑外来树种人工林的稳定性（稳产高产）和对当地生态系统的影响。虽然还没有外来树种造成灾难的报道，但外来树种面积的不断扩大大势必对当地的地理景观、乡土树种的生存环境等造成威胁，如刺槐在中国、柽柳 *Tamarix* spp. 在美国就是如此。

2 树种在天然分布区的适应机制

2.1 生活史对策

根据演替的概念，美国学者 Clements (1916, 1928, 1936) 和 Gleason (1917, 1926, 1939) 把植物分为先锋种 (pioneer) 和顶极种 (climax) 两种类型。见表 1。

表 1 基于演替的树种生态适应对策 (Huston 和 Smith, 1987; Loehle, 1988)

项 目	先锋种	顶极种
光合作用	光饱和点和补偿点高，弱光效率低，光合效率高	光饱和点和补偿点低，弱光效率高，光合效率低
呼吸利用	高	低
水分利用	转移速率高，叶肉阻力低	转移速率低，叶肉阻力高
种 子	小，数量多，生活力长，休眠普遍，扩散距离大	大，数量少，生活力短，休眠不普遍(?)，扩散距离小
资源利用	获取率高，营养亏缺的恢复快	获取率低(?)，营养亏缺的恢复慢
成熟个体	体积小，结构强度低，寿命短	体积大，结构强度高，寿命长
根茎比率	低	高
生长速率	早期生长快	早期生长慢
极端气候	适应性强	适应性弱
木 材	易受病虫害危害	对病虫害抵抗力强

根据生存环境和进化对策，美国 MacArthur 等 (1967) 把生物分为 r-对策者和 k-对策者两种类型。从表 2 可见，这与先锋种 / 顶极种的分类模式有共同之处。

但是，先锋种也会有顶极种的某些特征，如欧洲白桦 *Betula pendula* 可生长在干燥的砂土上，小干松 *Pinus contorta* 和西方落叶松 *Larix occidentalis* 可生长在经常火火的干燥环境中，白柳 *Salix alba* 欧洲黑杨 *Populus nigra* 和银白杨 *P. alba* 可生长在河岸林中。

认识到上述两种模型的限制性，美国学者 Grime (1974, 1977, 1979) 基于干扰 (disturbance) 概念提出干扰种、忍耐种和竞争种的模型。他认为植物演化主要受两个生态因子影响，即干扰和逆境 (stress)。前者指降低植物生物量的任何因子，火烧是许多森林中常见的天然干扰来源；后者指限制群落生产力的环境条件。

干扰种 (ruderal) 的生境经常遭受干扰，其表现类似杂草。世代短，有性成熟早，潜在生长率高。如欧洲毛桦 *Betula pubescens*、欧洲黑杨 *Populus nigra* 等。

忍耐种 (stress-tolerant) 生存于条件很差、但受干扰少的环境中，即使在较好的环境条件下或消除竞争者后，其个体也较小。种子较大。为了保持长的世代，保证吸收矿质营养，这类树种把大量能量用于防御系统，故木材抗病虫害能力强。如欧洲刺柏 *Juniperus communis*、瑞士五针松 *Pinus cembra*、欧洲紫杉 *Taxus baccata* 等。

竞争种 (competitive) 的生境不受干扰，林分生产力高。它们趋向于逃避极端的气候、土壤环境，多数种类在好的立地上非常成功。其 2 个显著特征是：趋于占有和利用资源的绝对优势，如较高的潜在生长率、高大的植株；繁殖较迟，无性生长时间长。如欧洲鹅耳枥 *Carpinus betula*、欧洲白榆 *Ulmus laevis* 等。见表 3。

表 2 基于环境容纳量的树种生态适应对策 (Pianka, 1970)

项 目	r-对策	k-对策
气候	多变，难以预测和不确定	稳定，可预测，较确定
死亡率	灾难性的，无规律，非密度制约	有规律性，密度制约
生产力	常低于环境容量 k 值	稳定，临近 k 值
竞争	不紧张	常处于紧张状态
个体	寿命短，体型小，发育早	寿命长，体型大，发育迟
繁殖力	高，生殖消耗多	低，生殖消耗少

表 3 基于干扰概念的欧洲 36 个主要树种的生态适应对策 (Brzeiecki & Kienast, 1994)

项 目	种数	树 种
干扰种 (R)	9	<i>Alnus glutinosa</i> , <i>A. incana</i> , <i>Betula pendula</i> , <i>B. pubescens</i> , <i>Populus alba</i> , <i>P. nigra</i> , <i>P. tremula</i> , <i>Salix alba</i> , <i>S. caprea</i>
忍耐种 (S)	3	<i>Juniperus communis</i> , <i>Pinus cembra</i> , <i>Taxus baccata</i>
竞争种 (C)	9	<i>Acer platanoides</i> , <i>A. pseudoplatanus</i> , <i>Carpinus betula</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Tilia cordata</i> , <i>T. platyphyllos</i> , <i>Ulmus glabra</i> , <i>U. laevis</i> , <i>U. minor</i>
S-R 种	8	<i>Acer campestre</i> , <i>Malus sylvestris</i> , <i>Prunus avium</i> , <i>P. padus</i> , <i>Pyrus communis</i> , <i>Sorbusaria</i> , <i>S. aucuparia</i> , <i>S. torminalis</i>
C-S 种	5	<i>Abies alba</i> , <i>Fagus sylvatica</i> , <i>Picea abies</i> , <i>Quercus petraea</i> , <i>Q. robur</i>
C-R-S 种	2	<i>Larix decidua</i> , <i>Pinus sylvestris</i>

2.2 资源利用策略

前述 3 种模式的最大不足是没有考虑树种分布区的起源演化、种内的资源利用差异和遗传分化，所以使用起来尚有不便之处。为此，作者基于种群概念把树种分为 3 种类型，即子遗种 (relic species)、专化种 (specialized species) 和泛化种 (generalized species) (图 1)。

子遗种：由于历史原因 (如第四纪冰川)、地理原因 (如孤岛、崇山峻岭阻隔) 或其他种种原因，树种只占据其潜在生态位 (fundamental niche) 的极少一部分。如水杉、银杏 *Ginkgo biloba*、乔松 *Pinus griffithi*、加那利松 *P. canaliensis* 和辐射松 *P. radiata* 等。

专化种：树种几乎全部占据其潜在生态位，各地理种群之间或给定种群内个体之间的生态位重叠度小，遗传分化大 (地理变异明显)。这类树种在引种时应特别注意合适种源的选择。林木改良应以种源选择为主，并充分利用杂种优势。

泛化种：树种几乎全部占据其潜在生态位，各地理种群之间或给定种群内个体之间的生态位重叠度大，遗传分化小 (地理变异不明显)。这类树种在引种栽培时，种源的选择相对不重要。林木改良应侧重种源和个体的联合选择。

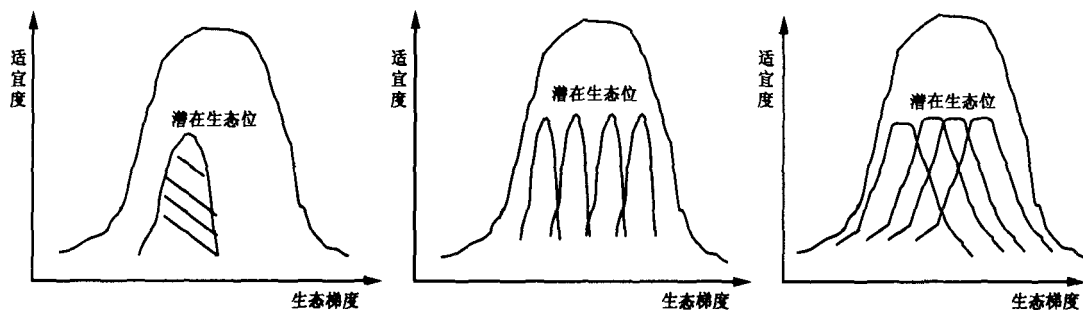


图 1 树木的现实生态位和潜在生态位。左：子遗种，中：专化种，右：泛化种

3 树种在人工引种栽培区的适应策略

传统的观念认为，树种只有在比原产地优越的环境中才会有良好的生长表现。但是，近年来的研究发现 (江泽平等, 1997; 贺善安等, 1998)，对某些树种来说，相对较差的新环境反而能刺激树木的生长，使其有突出的表现，如我国引种的北美树种刺槐、湿地松、紫穗槐、铅笔柏 *Juniperus virginiana* 等。因此，树种在引种栽培地区有良好生长表现的驱动力有两种：环境顺力和环境压力，它们对不同树种的作用方式和效果不同。

环境顺力 (environmental-driving force)：新引种栽培区的环境条件比树种原产地差，从而促进了外来树种的生长，这种情况见于专化种。

环境压力 (environmental-stress force)：新引种栽培区的环境条件比树种原产地优越，从而刺激外来树种的生长，这种情况见于泛化种。

对这种现象的 3 种可能的解释是：

(1) 生物节律机制。从高一层的关系来看，生物系统的存在就是耦合振子，因为生命各器官之间、系统各组分之间均有各自的节律。节律与环境之间、节律与节律之间相互关系，正是调节的本质。前苏联阿诺德发现并证明，两个非线性振子间的耦合，其频率比值必定要锁定在一定的值上，该值为两个整数之比。美国 Winfree (1972) 发现，生物的节律存在奇点 (singularity)，在该点给以一定刺激，生物就会表现出非常规行为。因此，环境刺激可以以两种方式作用于生物：一是解除生物体内某些节律间的模式锁定；二是增强某些主要节律，从而增强生物对新的环境条件的反应机制并产生适应。当然，不同树种所需要的刺激类型不同。

(2) 反馈机制。树种与环境共同组成一个反馈的生态系统。系统输出 / 输入之比 A_f 可表达为：

$$A_f = A / (1 + A \cdot F) \quad (1)$$

式中： A 为无反馈 F 时的系统输出 / 输入之比。

当 $A \cdot F$ 较大时，即满足深度反馈时，

$$A_f = 1 / F \quad (2)$$

F 是时间的函数，因而反馈可正可负。负反馈能提高系统的内稳定程度，而正反馈破坏系统的内稳定状态。系统的稳定程度依赖于这两类性质完全不同的反馈机制的平衡。因此，反馈使外来树种与生境之间协同进化，导致生态位漂移，使树种能够利用新的环境资源。

(3) 能量分配机制。生物的能量有两种用途：用于自身生长发育和抵抗外界不利因素。两者互为消长关系（若生物能量一定）。当然生物的能量会随发育阶段不同而发生变化。新的环境通过各种方式增加树种能量，从而促进树种生长。需要指出的是，环境条件是否有利，都是针对树种而言的。因为抗旱力、抗寒力、耐火烧、耐瘠薄能力等依树种而异。

4 树种遗传分化的确定和生态位的定量表达

4.1 树种遗传分化的确定

(1) 种源试验。对一些重要树种

已进行过广泛的研究，见表 4。

(2) 分子生物技术。如同工酶分析 (Falkenhagen, 1985)。

(3) 生态位分析。

表 4 一些树种的种源试验结果

树 种	遗传分化
湿地松	种源间差异显著，地理变异呈随机型式，与立地的互作 GEI 不显著。可着重在优良林分中选择优良单株
火炬松	种源间差异显著，地理变异呈连续和不连续形式，GEI 显著。可着重选择优良种源，并从中选择优良单株
加勒比松	种源间差异显著，GEI 显著
欧洲赤松	种源间差异显著，GEI 显著。连续变异
欧洲云松	种源间差异显著，GEI 显著。连续变异
落羽杉	种源间和家系间差异很显著，随机变异
刺槐	种源间、林分间和个体间差异显著，GEI 显著
细叶桉	种源间差异显著，GEI 显著
亮果桉	种源间差异显著，GEI 不显著
蓝桉	种源间差异显著
黑荆	种源间差异显著，GEI 不显著
马占相思	种源间差异不显著，GEI 不显著。随机变异

4.2 生态位的概念

按 Hutchinson (1957) 的定义，生态位是指由生态因子组成的多维的时空环境，在此环境内物种能够无限生存。见表 5。

目前还没有确定物种潜在生态位的恰当方法。一般用实验方法或田间试验确定，如植物园、树木园的引种试验、生理生化实验等。有些研究者用实际生态位代替潜在生态位，这种做法是不合适的，特别是子遗种的情况。

树木非存在生态位的产生方式有：基因突变；种间或种内不同种源之间杂交；这是一种人工扩大树种生态位的常用方法；引种材料（种子或插条）锻炼；如把萌发的种子或幼苗，经过一定时间的高温或低温等锻炼，然后栽种，可提高植物的抗逆能力；不同的引种驯化方式，如用“原产地—过渡栽种地—目的地”的间接方式代替“原产地—目的地”的直接方式。即米丘林的逐步锻炼法。刺槐就是一例，它于 1601 年引到德国，于 19 世纪初引入我国青岛，而后扩散至全国，已成为驯化种。奥地利黑松 *Pinus nigra var. austriaca* 在延安树木园的引种表现是另一个例子。该松在延安生长表现和抗寒力等很突出。原产地与引种地虽然所处地理位置不同，气候差异也很悬殊，但其种的历史起源较近，加之又是转引自榆林、西安、北京、呼和浩特等地，已经过一定驯化阶段，所以适应性较强。

表 5 生态位分类

类别	定义
存在生态位	
潜在生态位	能被生物利用的最大生态位。因种种限制因素的存在，生物极少占据其潜在生态位
实际生态位	生物实际占据的生态位
非存在生态位	生物与其生存环境协同进化或人为措施而新产生的生态位

4.3 生态位的定量表达

生态位大小 (niche size, N) : 指生态位的变化幅度。以离散情况为例, 生态位大小可表示为:

$$N = \sum \sum X_{ij} \quad (3)$$

式中: X_{ij} 为第 i 个生态因子第 j 个取值对生态位的贡献。

当 $i=1$ 时, 即为一维生态位, 用生态位宽度 (niche width) 表示。如某生物能够在 $5 \sim 40$ 之间生存, 则其生态位宽度为 35°C 。

Austin 等 (1990)、江泽平 (1991) 曾描述过一种定量表达树种实际生态位的方法。

最适生态位 (optimal niche) : 指最适合生物系统生存的生态位。实际生态位并不一定是物种的最适生态位。

生态位多样性 (niche diversity, ND) : 指生态位结构的异质程度。可用 Shannon 公式表达为:

$$ND = - \sum \sum p(X_{ij}) \ln p(X_{ij}) \quad (4)$$

式中: $p(X_{ij})$ 为生态因子 X_{ij} 的取值概率。

生态位重叠 (niche overlap, NO) : 指各生物系统生态位之间的相似程度。两个生态位重叠可表达为:

$$NO = (NO_1 \cap NO_2) / (NO_1 \cup NO_2) \quad (5)$$

5 树种在新引种栽培区的稳定性

论及稳定性时, 有两方面的含义: 一是系统对外界干扰的反应, 可用抵抗力 and 恢复力来度量; 二是没有外界干扰时系统的时空变化, 如涨落波动 (fluctuation)。见表 6。其中变异性是用得比较广泛的稳定性定义。因为种群或群落参数的变异性不仅是系统抵抗性和恢复性的函数, 而且也是干扰频率和强度的函数。

目前还没有一个统一的指标来鉴别系统的稳定性。常用的两种方法是: 一种是数学方法, 先建立系统动态变化的数学模型, 然后用参数“微扰法”对模型进行稳定性分析, 如用李雅甫诺夫方法分析局部稳定性 (Goh, 1976)。数学方法现处于研究初级阶段。根据数学模型进行稳定性分析的基本前提是模型能描述系统的动态变化, 但以前研究所用的任何数学模型能否描述系统的动态变化还值得怀疑。因为系统的动态变化是不确定的, 故用确定性进程来描述系统的动态变化是不合适的。

而且, 数学上还没有行之有效的方法对付复杂的非线性问题 (图 2)。另一种是经验方法, 先建立一套与系统结构、功能及其环境有关的稳定性指标体系, 然后判断系统的相对稳定性。在实践上, 确定与系统特性有关的参数以作为稳定性的指标, 以及确定影响稳定性的关键参数是非常困难的。度量抵抗性的最常用经验方法之一是估计系统对干扰的反应。如用系统在给定干扰下达到某一偏离程度所需的时间来度量。度量弹性的经验方法通常是用系统恢复到与初始状态有 50% ~ 80% 相似时所需的时间来表示。度量变异性常用统计方差和频率来进行。

外来树种形成的森林生态系统的 3 种可能结果是: 稳定; 被其他种类替代; 与其他种类交替占据生

表 6 稳定性分析中常用的术语

术语	定义
抵抗力	系统抵抗外界干扰的能力
恢复性	某一小干扰后, 系统恢复到初始状态的能力
局部稳定性	任一大的干扰后, 系统恢复到平衡点的能力
全局稳定性	任一大的干扰后, 系统返回到平衡点的能力
稳定极限环	系统围绕某一点周期振荡的能力
弹性	某一干扰后, 系统恢复到初始状态的速率
振幅	系统能返回到初始状态的区域大小
替代性	干扰后, 系统新建立的稳态与初始状态的差异
持续性	系统或其组分的生存时间
变异性	系统某些特征的波动频率和幅度

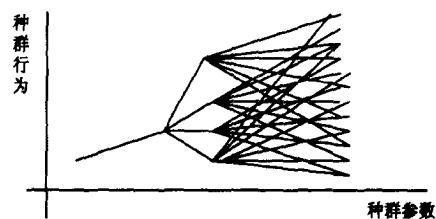


图 2 种群的动态变化 (据 May, 1976)

存环境。显然，只有当外来树种林分是一个随时间推移而能够趋于稳定并且自身有序（self-ordering）的生态系统时，外来树种才能与生境协同进化。可见，系统的稳定性只有当引入“演替”或“进化”的概念时才能准确地加以说明。对于给定环境，原有种类会抑制其他外来种类的侵入，Drury等（1973）曾列举了许多这方面的例子。所以人工干预是必要的。任何生物系统都是反馈系统。根据（1）式，当 $1 + AF = 0$ 时， $A_f \rightarrow \infty$ ，即存在自激振荡，引起系统的波动（涨落）。此时给以即使是很小的干扰，系统也会产生令人惊奇的巨大反应，即对初始条件的敏感性。

Eberhart等（1966）根据基因型与环境互作原理，提出了测定品种稳定性的遗传学方法。即用品种测值 - 环境统计模型中的回归系数表示品种对环境的反应参数，用方差表示品种的稳定性参数。

由于新物种的引入，对当地的生态系统必然产生影响。其中对物种数目的影响可用美国MacArthur等（1967）提出的某种“均衡理论”（equilibrium）来分析。该理论认为，物种栖息地与其周围环境之间的广义非平衡，形成了事实上的广义力，引起物种迁入、迁出以及消长的动态变化，构成振荡和往复行为。即某些区域物种数目的维持是一种动态平衡的结果。其中包含下述“物种-面积”关系：

$$\lg S = \lg C + z \cdot \lg A \quad (6)$$

式中： S 为面积 A 上物种数目； C 为单位面积内的物种数目； z 为参数。

研究表明，参数 z 是一个十分复杂的函数，目前仍未能揭示其完整的内容，更没有获得恰当的函数关系（牛文元，1987）。

6 讨论

为了更加有效地开展林木引种，对树种在新环境下的适应机理需要更多的深入研究，包括生态对策、生态位的拓展、稳定性等方面。大量的树种/种源试验为这类研究提供了丰富的素材。

从种群（population）角度来研究树木适应机理的工作还不多见，需要充分融合遗传学、生态学、生理学以及古植物学等多学科的理论和技术。

生物系统是一个复杂的非线性系统。近年来，非线性理论和技术得到迅速发展，如混沌学、分形学等，这些成果的应用必将大大促进树木迁移与适应机理的研究。

参考文献

- 潘志刚，游应天．1994．中国主要外来树种引种栽培北京：中国林业出版社
- 江泽平．1995．中国林木引种的现状和展望．林业科技通讯，(3)：36~38
- 王豁然，江泽平，傅紫菱．1998．林木引种驯化与森林可持续经营．北京：中国环境科学出版社，311
- 吴中伦，江泽平．1995．中国林木引种的经验总结和几点建议．沈国舫主编中国林业如何走向21世纪．北京：中国林业出版社，65~71
- 江泽平，王豁然，吴中伦．1997．论北美洲木本植物资源与中国林木引种的关系．地理学报，52(2)：169~176
- 江泽平．1991．麻栎、栓皮栎和小叶栎的生态地理学．中国林业科学研究院博士学位论文．
- 马世骏主编．1990．现代生态学透视．北京：科学出版社，322
- Austin M P *et al.* 1990. Measurement of Realized Qualitative Niche; Environment Niches of Five Eucalyptus Species. *Ecol. Monog.* 60 (2): 161-177
- Brzeziecki B and Kienast. F 1994. Classifying the Life - History Strategies of Trees on the Basis of the Grimian Model. *For. Ecol. Manag.* 69 (1-3): 167-187
- Drury W H and Nisbet I C T, Succession J. 1973. *Arnold Arb.*, 54: 331-368
- Falkenhagen E R. 1985. Isozyme Studies in Provenance Research. *Theor. Appl. Genet.* 69: 335-347
- Gray A J *et al.* 1984. *Colonization, Succession and Stability.* Blackwell, Oxford
- Goh B S. 1976. Nonvulnerability of Ecosystems in Unpredictable Environments. *Yheor. Popul. Biol.*, 10: 83-95
- Grime, J P. 1979. *Plant Strategies and Vegetational Processes.* John Wiley, New York
- Huston M. and Smith T. 1987. Plant Succession: Life History and Cometion, *Am. Nat.* 130: 168-198
- Loehle C. 1988. Tree Life History Strategies; The Role of Defences, *Can. J. For. Res.*, 18: 209-222
- Mac Arthur R H and Wilson E O. 1967. *The Thoery of Island Biogeography.* Princeton Univ. Press
- Pianka E R. 1983. *Evolutionary Ecology* (3rd ed.) . Harper & Row Publ. Inc. ,
- Pickett STA *et al.* 1987. Models, Mechanism and Pathways of Succession. *Bot. Rev.*, 53: 335-371
- Winfree A T. 1987. *The Timing of Biological Clocks.* W. H. Freeman. New York

中国和澳大利亚的气候比较研究

阎 洪

摘要：针对区域尺度气候分类系统不兼容所导致的气候匹配失准问题，首先假设中国和澳大利亚的气候分类系统具有兼容性，利用中国气候分类系统对两地进行气候区划，根据结果与现有气候区划的差异验证两国的气候分类系统是否具有兼容性。结果表明两国的气候分类系统互不兼容，因而根据两国各自系统生成的气候区划不具有类比匹配的合理性。特别是在澳大利亚被视为温带的大部分地区在中国普遍被划为亚热带地区，是导致引种时冻害的原因之一。为克服系统不兼容所带来的问题，提取两国气候数据库中所共有的气候因子的栅格数据集成为一个以气候因子为属性的点阵数组，通过聚类分析形成具有 15 个气候类型的综合兼容的数值气候分类模型。各类型的气候因子平均值经矩阵转换构成三维相似空间，分别以三原色的色调代表各气候类型在不同维上的相似距离，用 GIS 以合成色彩表示各气候类型的空间相似程度。综合区划确认澳大利亚气候在同纬度相对更加温暖。两国共有的气候类型在相对面积上均不平衡，但在最相近的气候类型下存在着资源丰富区和潜在引种区的互补关系。结论同时指出应当重视气候类型内不同雨型的影响。

关键词：外来树种；引种；气候分析；数值分类

Comparison of Climate Similarity between Australia and China Using Numerical Classification Analysis

Yan Hong

(Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091)

Abstract: Climate matching is a fundamental way to predict the suitable areas for exotic tree species to be planted. In most cases such work is carried out depending on the analogy of compatible climate zones. In order to examine mismatching caused by incompatible climatic classifications between Australia and China, the climate zones were developed for both countries according to unique classification of China. Visual check approved significant differences between developed and currently used climate zones of Australia as a result of incompatible classifications, particularly in shifting most temperate into subtropical climate. A compatible classification model with 15 groups was derived from the integration of gridded climate data with nine climatic variables from the two countries using numerical clustering analysis. The spatial similarity of groups were displayed by GIS using compound of three primary colors to represent three dimension configuration of group similarity transformed from intra-group climatic variable mean matrix. Among the 15 groups in respect of climatic types seven groups are located only in China, others are shared by Australia and China. The resultant maps indicate the unbalanced relative areas of shared climatic types in Australia and China, but the most similar types are promisingly complementary to each other country in rich tree resources and potential planting areas. Attention is also given to different rainfall regimes within developed climatic types in Australia. The potential of climate matching is discussed not only in exotic forestry but also native tree and animal species management, as well as ecosystem security assessment.

Key words: Exotic trees; Tree introduction; Climate analysis; Numerical classification

1 气候匹配与树木引种

林木引种对林业生态环境建设具有重要意义，被广泛用于造林绿化。它作为速生丰产林的主要组成部分，能显著提高森林生产力，在发挥森林碳汇功能减缓气候异常变化的同时有效缓解木材需求对天然林采伐的压力，从而达到保护生态环境和生物多样性的目的。当乡土树种不是总能胜任退化立地上的生态恢复的角色时，

作者简介：阎洪，获澳大利亚国立大学博士学位，现任中国林业科学研究院林业研究所副研究员。

又往往作为先锋树种起到改善生态环境的替代作用 (Zobel *et al.* , 1987; 吴中伦, 1984; 潘志刚等, 1994)。在众多外来树种来源中, 澳大利亚以资源丰富, 树种适应性强, 生长迅速和材质优良而著称 (Boland, 1989; 祁述雄, 2002)。

受自然选择的影响, 树种在其自然分布区的生态环境有着天然适应, 在与原产地相似的环境条件下最有可能发挥其生物学特性 (Wright, 1978)。在影响外来树种引种成败的环境诸因子中, 气候因素具有决定性的作用 (Woodward, 1987; Eldridge, 1993)。鉴于森林经营时空跨度大, 环境和社会经济影响深远的特点, 当以造林为目的时引种的先期决策就显得十分重要。根据气候相似论的原理进行气候对比可以初步判断未来引种的效果, 是通常采用的一种切实可行的方法 (Holdridge, 1967; FAO, 1952)。很多这类研究是采用类比法在气候区划的基础上进行的, 这种气候带匹配研究方式的优点是简单易行, 缺点是失之粗放。根据全球气候区划所采用的几个气候因子和尺度范围很难满足对树种生态学特性和引种地状况的描述。反之, 区域尺度气候区划针对性虽强又往往不具备兼容性。一些引种试验结果表明, 某些来自澳大利亚温带地区的树种在中国的亚热带地区仍然因冻害时有发生而生长不良, 使人联想到这种气候区划不兼容的可能 (Wang *et al.* , 1994; Yang *et al.* , 1994) 如果这类因素确实存在, 并且和树种的基因型与环境的相互作用混合在一起, 就会使试验结果背离原有目的, 大大增加认识问题的难度。

计算技术和相关学科的发展为改进气候分析的质量提供了基础, 先进的插值技术使人们可以根据气象站的数据对空间上任一点的气候条件进行估计并且通过地理信息系统 (GIS) 描述气候的空间分布 (Hutchinson, 1991; 阎洪, 2004) 在此基础上, 比较准确地对特定树种的生态学描述和引种范围选择成为可能 (Booth, 1990; Yan, 1996)。同时, 对区域间气候全面比较的需求仍然存在, 它有助于对问题的全面了解, 以便确认和克服气候分类系统不兼容所造成气候匹配失准的问题。

为此, 本研究采用两个方法来处理所遇到的问题。首先通过中澳两国现有气候带的类比分析来检验两国的气候分类系统是否存在不兼容的问题。针对由于不兼容而导致的气候失配问题, 采用气候数据合成和数值分类方法对两国气候进行综合比较, 生成一个兼容的气候分类模型, 并根据色彩合成原理利用 GIS 对中澳两国的气候空间相似性加以描述。

2 气候分类系统兼容性类比分析

类比逻辑是基于不同事物在某些方面相似时认为它们在其他方面也具有相似性。属于相同气候带的地域不论远近都意味着具有相似的气候和植被类型, 气候带内的植物种交换比带间更具有成功的把握。这种推理只有在采用单一或兼容的气候分类系统的条件下才是合理的, 不兼容的气候分类系统所产生的气候区划必然也是不兼容的, 采用这样的气候区划进行气候比较必然导致气候匹配的失准。

为检验中澳两国的气候分类系统是否兼容, 我们采用类比反证的方法, 首先假设用于两国的系统是兼容的, 因此采用二者中的任一分类系统对两国同时进行气候区划应该得到与现有气候区划类似的结果, 反之证明二者的气候分类系统不具有兼容性。该过程利用了两国的空间气候数据, 根据中国的气候分类系统生成两国的气候区划与各自现有气候区划 (图 1、图 2) 的对比来完成。中国气候分类系统涵盖从寒温带到热带的 10 种气候类型, 采用 4 个气候因子进行综合气候划分 (Zhang and Lin, 1985)。考虑到中国气候季风明显, 雨热同季的特点, 所采用的 4 项气候因子分别为: 最冷月平均气温 (MTC), 极端最低气温 (EMT)、日均气温 ≥ 10 的积温 (AMT) 和日均气温 ≥ 10 °C 的天数 (AND)。气候带内又划分为湿润 (A)、半湿润 (B)、半干旱 (C) 和干旱 (D) 气候类型区。见表 1。

表 1 中国气候分类系统

气候带	气候类型	AMT (°C)	AND (d)	MTC (°C)	EMT (°C)
I	北温带	< 1600	< 100	< -30	< -48
II	中温带	1600 ~ 3400	100 ~ 160	-30 ~ -10	-48 ~ -30
III	南温带	3400 ~ 4500	160 ~ 220	-10 ~ 0	-30 ~ -20
IV	北亚热带	4500 ~ 5000	220 ~ 240	0 ~ 4	-20 ~ -10
V	中亚热带	5000 ~ 6500	240 ~ 300	4 ~ 10	-10 ~ -5
VI	南亚热带	6500 ~ 8000	300 ~ 365	10 ~ 15	-5 ~ 2
VII	北热带	8000 ~ 9000	365	15 ~ 19	2 ~ 6
VIII	中热带	9000 ~ 10 000	365	19 ~ 26	6 ~ 20
IX	南热带	> 10 000	365	> 26	> 20
X	高原带	< 2000	< 100		

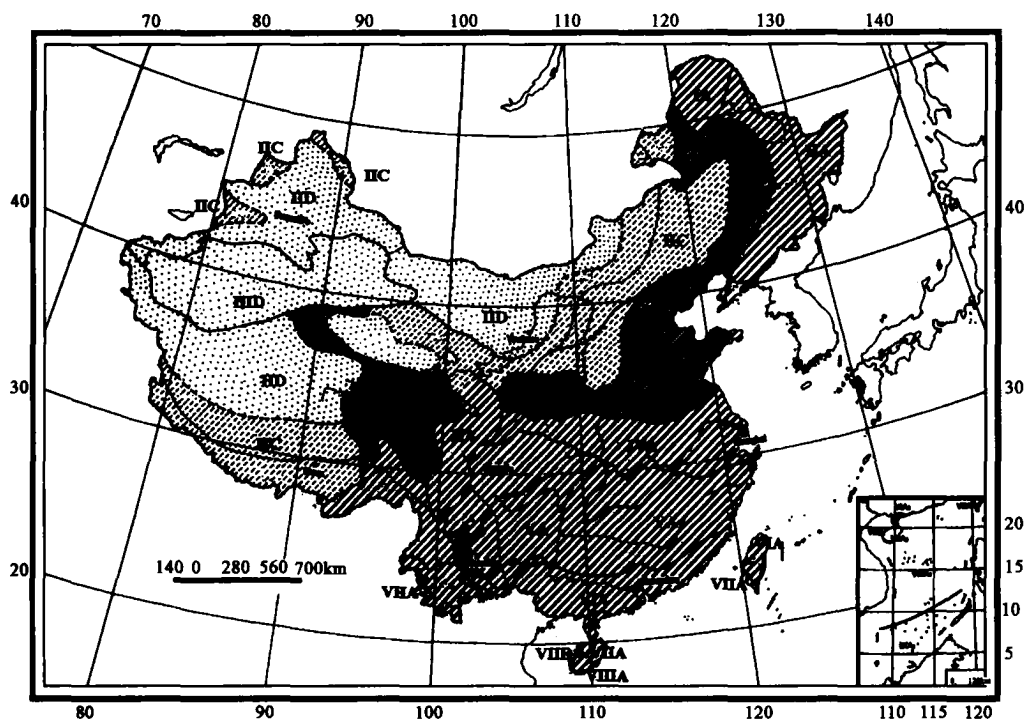


图 1 中国气候区划

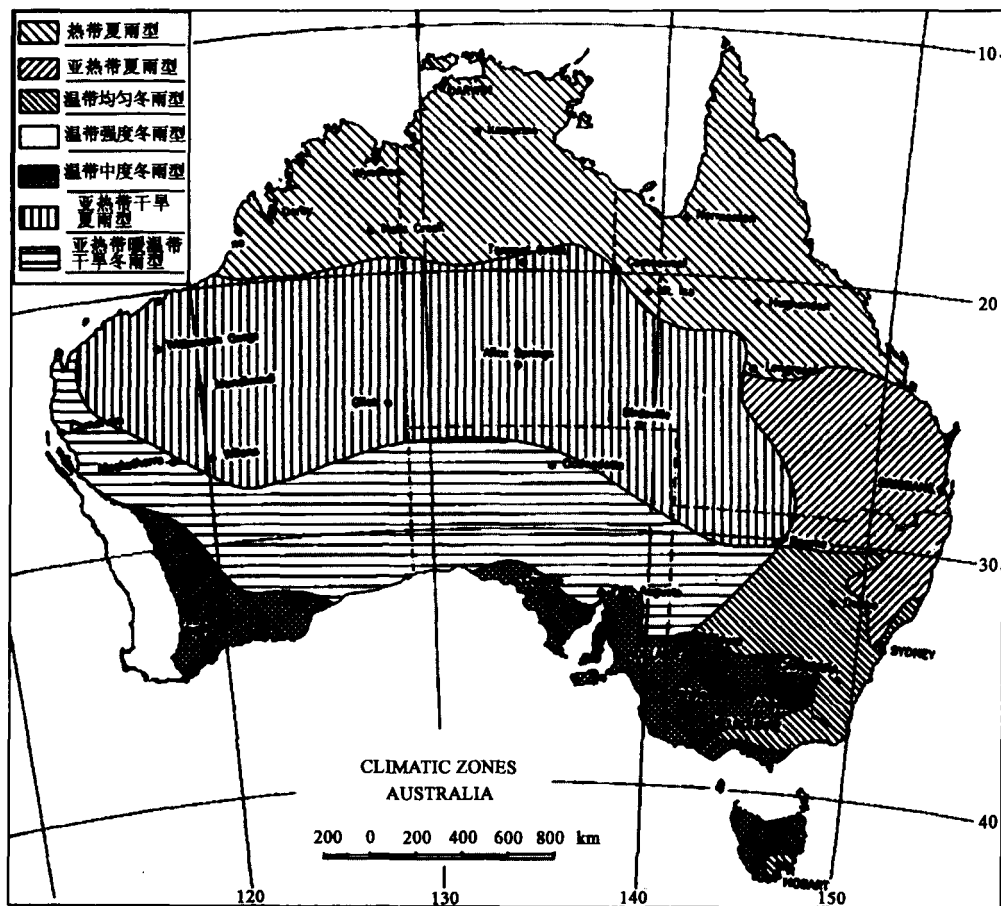


图 2 澳大利亚气候区划



图3 根据中国气候分类系统利用极端最低温度数据划分的中国气候带



图4 根据中国气候分类系统利用最冷月平均温度数据划分的中国气候带

由于澳大利亚缺乏相应的积温记录，本研究主要采用分类系统中的温度指标生成新的气候区划，对一些记录比较完备的澳大利亚气象站点进行了 4 项因子的检验。

图 3、图 4 是根据中国气候分类系统分别用最冷月平均温度和极端最低温度两项指标生成的中国气候区划。结果与现有的中国气候区划具有明显的对应关系。各气候带特别是热带亚热带的界限与现有气候区划图十分一致，这也从一个侧面说明两个气候因子本身具有很好的空间相关性。

与中国的情况相反，根据中国气候分类系统产生的澳大利亚气候区划与现行的澳大利亚气候区划有很大差别（图 5、图 6）。主要表现在澳大利亚相应的温带地区明显减少，仅有少量温带地区局限于东南山地。同时，图中亦看不到气候因子之间明显的空间相关性，根据最冷月平均温度和极端最低温度所划分的气候带出现了相互背离的现象。由最冷月平均温度所划分的热带面积比现行气候区划稍有增加而和由极端最低温度所划分的热带面积则明显减少。

为验证这一结果，对一些澳大利亚的气象站点计算了为期 10 年的 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的日数，汇同温度指标根据中国气候分类系统区分上述地点的气候带归属。表 2 显示，补充的区划指标并未使区划的清晰程度有所改善，反而在一定程度上增加了区划的难度。几乎所有被澳大利亚现行气候区划视为温带的地点都被划归为亚热带，一些地点甚至被判归 3 个气候带，说明上述气候因子在澳大利亚没有像其在中国同样的空间一致性。气候带比较的结果表明采用中国气候分类系统产生的气候带不能兼容现行的澳大利亚气候区划，反之亦然。

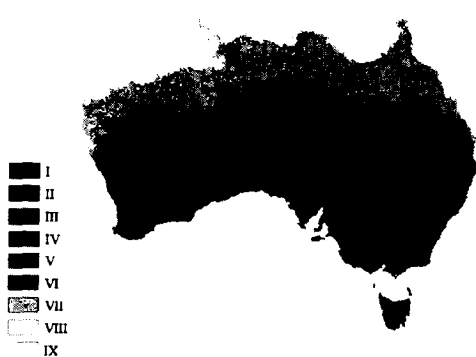


图5 根据中国气候分类系统利用最冷月平均温度数据划分的澳大利亚气候带



图6 根据中国气候分类系统利用极端最低温度数据划分的澳大利亚气候带

表 2 根据中国气候区划指标体系对澳大利亚数据完备地点进行的气候划分

地 点	AMT	AND	MTC	EMT	澳大利亚系统
博克 Bourke NSW	VI	VII	VI	VI	亚热带
堪培拉 Canberra ACT	III	III	V	V	温带
墨尔本 Melbourne VIC	V	VI	V	V	温带
悉尼 Sydney NSW	V	VII	VI	VII	温带
阿德莱德 Adelaide SA	V	VII	VI	VI	温带
帕斯 Perth WA	VI	VII	VI	VI	温带
艾利斯泉 Alice Spring NT	VI	VII	VI	V	亚热带
卡固里 Kalgoorlie	VI	VII	VI	VI	温带
霍巴特 Hobart TAS	III	V	V	VI	温带
达尔文 Darwin NT	IX	VII	VII	VII	热带
汤斯维尔 Townsville QLD	VII	VII	VIII	VII	热带

3 数值气候分类和气候相似对比

鉴于两国气候分类系统的巨大差异所造成的气候区划的不兼容性，采用现有气候带匹配方法显然不适合林木引种的可行性研究。解决这一问题的方法是两地的气候条件进行综合分析。为此挑选两国气候数据库中都具有的气候因子，合成气候因子的栅格数据文件，通过数值分类方法生成综合的空间气候分类模型。参与模型构建的气象因子包括：年平均温度、年平均降水量、最冷月平均最低温度、最热月平均最高温度、极端最低温度、最热季节的降水量、最热季节的平均温度、最冷季节的降水量和最冷季节的平均温度。

中国部分的栅格数据来自分辨率为 1km 插值生成的中国空间气候数据库（阎洪，2004），经 GIS 转换成分辨率为 5km 的栅格数据；澳大利亚部分的栅格数据根据原有的气象站数据利用样条插值方法和 5km 分辨率的数字高程模型生成。将两国的数据衔接形成以栅格为行代表空间点，以气候因子为列代表属性的空间气候数据矩阵。

整合后的数据通过统计软件包 PATN 进行数值分类（Belbin, 1987a）。PATN 提供了非层次聚合分类算法（non-hierarchical agglomerative classification algorithm, ALOC）模块，它主要用于处理大批量数据的聚类分析。每个栅格点根据气候属性的相似程度归入不同的类（Belbin, 1987b）。由用户主观决定入选属性及其权重，相关距离度量和最后要生成的组数。本文中采用所有气候因子作为分类属性，并给予它们等权重。利用标准化的 Gower 矩阵（Gower, 1971）作为栅格点属性空间相关距离的度量，根据人为设定的阈值，使最终的结果聚合为 15 个类。随后调用 PATN 的通用统计模块 GSTA 计算出各类的内部统计汇总，包括类内各属性的极大、极小和平均值。由各类内的属性平均值组成的矩阵经过类似主成分分析的半强制混合降维计算（semi-strong hybrid multi-dimensional scaling algorithm, SSH）转换成每类由 3 个数值范围在 0~255 之间的特征值构成的特征矩阵。为形象表达以类在三维特征值空间中的距离来衡量的类的相似程度，将类的特征值对应三原色中的一种颜色，每种颜色有 256 个与特征值对应的色调，相近的特征值具有相似的色调。具有不同色调的三原色合成的色彩代表着不同的类，相近的色彩表示相似的类（Belbin *et al.*, 1983）。

由于分类采用的是非层次算法，类间距离是不等的。为此采用 PATN 提供的 FUSE、GSTA 和 DEND 模块根据计算的类间统计结果形成类间相似关系的树状图（图 7），用横坐标的距离表示类的相似程度。15 个类分别代表了 15 个气候类型。根据 PATN 所提供的统计汇总，中国数据占有所有 15 种气候类型，而澳大利亚则只占有其中的 8 种。根据图 7 可以把气候类型大致分为 4 个类群，其中第一组有 1、3、4、7 四个类型；第二组有 2、5、6 三个类型；第三组只有 14 和 15 两个类型；其余为第四组的类型。在第一、二组中的 1~7 气候类型为中国所特有，澳大利亚的气候特征则反映在第三、四组的气候类型中。

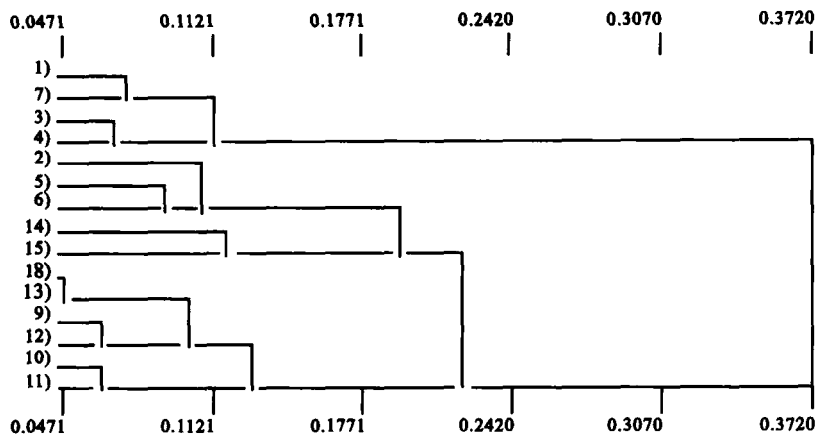


图 7 聚类树状图

根据数值分类结果，将类特征矩阵与原始栅格数据文件耦合，形成每个栅格点带有分类信息的合成矩阵。将合成矩阵分割为各自国家的数据文件，其中的分类信息被转换成 ARCINFO 栅格数据文件。根据与各气候类型的特征值对应的三原色调，每个气候类型被赋予单一的合成色，相近的色彩代表相似的气候类型。最后利用 GIS 以气候区划图的形式用相应的色彩来显示各国的的气候类型空间分布及其相似性（图 8、图 9）。

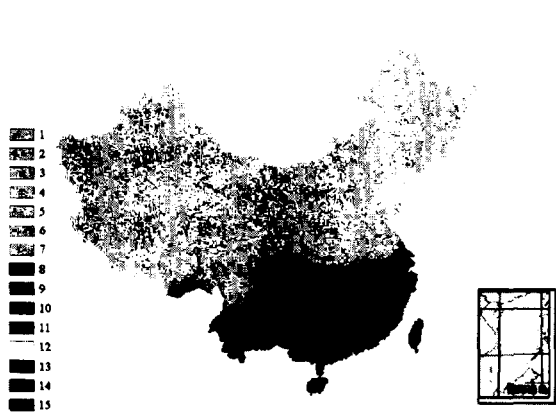


图 8 采用综合数据和数值分类产生的中国相似气候空间分布

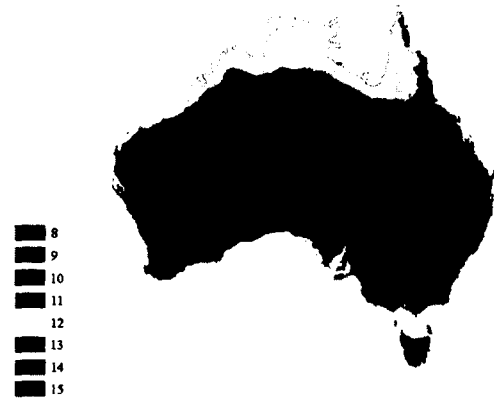


图 9 采用综合数据和数值分类产生的澳大利亚相似气候空间分布

作为结果的气候区划图与现行的中国气候区划仍然具有较好的关联性。类型 10 相当于热带和南亚热带的组合，而类型 11 和 15 分别代表了中和北亚热带。不过依靠有限的新类群数目不足以与所有的现行气候区划类型一一对应，特别是不能很好的区分澳大利亚的干旱和湿润地区。这是因为在新产生的气候分类模型中温度仍然比降水量占有主要地位的缘故。总体而言，澳大利亚在相同纬度上的气候普遍比中国温暖。

图 10 是各气候类型区相对各国总面积的比例。虽然两国共同拥有 8 个相同的气候类型区，但各气候类型在两国所占的相对面积却正好相反，既在中国具有较大面积的气候类型往往在澳大利亚的对应面积有限。所幸的是两国的树种资源丰富地区和潜在引种地区在最相近的气候类型区是互补的，即同一种气候类型在一国具有相对较小的面积和较多的资源而在另一国又具有较大的引种适合区。类型 10 和 11 位于澳大利亚的热带和亚热带夏雨型地区，是和中国气候最为相似的气候类型，地处澳大利亚东部沿海，树种

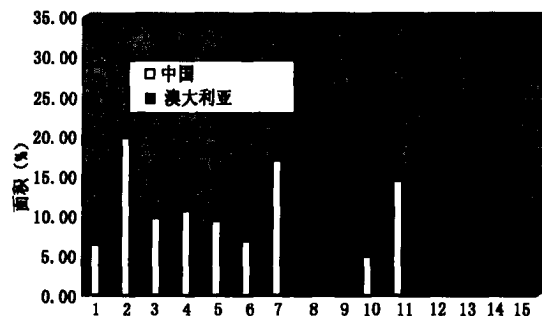


图 10 中澳两国各气候类型的相对面积比

资源丰富；相对应的中国同类型区位于东南热带和亚热带广大地区，是中国主要的森林分布和人工林发展地区，目前中国引种的绝大多数澳大利亚树种来自上述地区。类型 8 和 9 在澳大利亚是中西部干旱荒漠，面积虽大但少有植物生长，在中国的对地地区也十分有限。类型 12 与类型 10 相似也为热带夏雨型气候，但热量更高，中国的对应地区局限于海南岛南部。类型 13 和 14 在澳大利亚同属亚热带和暖温带，都横跨 3 种不同雨型。这是又一个树种资源较多的地区，特别是比较耐寒的树种，在中国的对地地区仅限于西南少数地区。类型 15 仅有冬雨型和均匀雨型，与中国大陆的夏雨型气候差别较大，仅在台湾山地有少量对应分布。

4 讨论与结论

气候分类的好处是将相似的气候加以区划以便利用，但是通用的区划难免不能满足特定的气候分析需求。这也是为什么虽然柯本系统大行其道并未妨碍其他分类方法层出不穷（Köppen, 1923）。如 Gentilli (1972) 就利用 20 多个气候指标对澳大利亚进行了分类研究。新的方法普遍借助新的技术，力求更加客观实用。当然，方法的选择最终取决于研究目的。不容否认，各国的气候区划可能更适合反映本国的气候特点，但难免在气候对比时出现不匹配的问题。综合气候分析是克服这一问题的一个途径，而数据集成，数值分类，相似度色彩合成和 GIS 空间分布描述则是达到这一目的的有效手段。

本研究证实了中国和澳大利亚的气候区划源于不同的分类系统，因而不具有兼容性。这种不兼容性会造成气候匹配的失准，进而导致引种决策的失误。在历次南树北移和试验失败的教训中，技术不完善对主观认识的影响是原因之一。研究表明，在澳大利亚被认为是温带的大部分地区相当于中国的亚热带地区，这可能是一些澳大利亚树种在中国生长表现不理想的原因之一。本研究还指出，不兼容的气候区划之间的类比推论至少在逻辑上是不合理的，不论是用造林地的气候条件进行种源选择，还是根据树种产地气候条件选择适生区。同时，采用任一个系统去描述另一个不兼容系统下的气候的结果不一定令人满意，因为这些系统都必然包含有特化的成分。

研究结果表明没有一个气候类型在两国同时占有优势地位。针对中国的引种目的，更令人感兴趣的气候类型可能是在中国具有较大的潜在应用面积同时在澳大利亚具有较丰富的树种资源，如类型 10、12 和 14。其中的类型 14 应当引起更多关注因为它包含有 3 种不同的雨型。由于中国属典型的夏雨型季风气候，简单可靠的方法是首先从该气候类型区中的夏雨型地区进行种源选择。

从气候区划的结果可以看出，中国和澳大利亚的气候有着较大的差别，因此在一个综合分类模式中很难调和互不兼容的系统。中国的系统多采用温度指标是因为存在着单一雨型和雨热同季的现象，而澳大利亚则把雨量和雨型作为重要的区划依据（Ding, 1994; Linacre *et al.*, 1977）。此外，数值分类的运算过程虽然是客观的，但气候因子的取舍和分类数量的界定都属于经验范畴。所幸，本研究的目的并不是要取代各国现有的气候分类系统，而是对两国的气候相似性加以补充和描述。

不论是传统的气候带匹配还是如今的栅格点的比较都是基于一些气候因子推论气候相似程度，空间上准确性提高的同时不能回避类比推理的结果都具有或然性，本研究的结果可以通过田间和生理方法加以验证（Searle *et al.*, 1994; Larmour *et al.*, 2000 林睦就等，1999）。虽然本研究的对象是外来树种，但方法却具有通用性，可以用于动植物种的分布迁移以及外来种的生物安全性评价（Fischer, 2001）。更进一步的研究包括采用更多的立地指标来反映树种的生物学特性和生态环境，通过生态位匹配达到深入理解物种时空演替的目的（Booth, 1998）。

参考文献

- 林睦就 李榕 1999 亚热带地区耐寒桉树选择. 桉树科技, (1): 13~19
潘志刚, 游应天. 1994 外来树种引种栽培北京: 北京科技出版社
祁述雄 2002 中国桉树北京: 中国林业出版社
吴中伦等. 1983. 国外树种引种概论北京: 科学出版社
阎洪. 2004. 薄板光顺样条插值与中国气候空间模拟. 地理科学, 24 (2): 163~169
Belbin L, Marshall C, Fainth D P. 1983. Representing Relationships by Automatic Assignment of Colour. Australian Computer Journal, 15 : 160 - 163