

中国裸子植物物种丰富度空间格局与多样性中心

李 果¹ 沈泽昊^{1*} 应俊生² 方精云¹

¹ 北京大学城市与环境学院生态学系, 北京大学地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871

² 中国科学院植物研究所植物系统与进化植物学重点实验室, 北京 100093

摘要: 中国拥有世界上最丰富的裸子植物区系, 对理解全球裸子植物分布变化与系统演化具有重要意义。我们利用中国天然分布的202种裸子植物的水平和垂直分布信息获得物种分布区范围, 探讨了中国裸子植物在科、属、种水平的分布特点。总体上, 中国裸子植物物种丰富度南高北低, 山地裸子植物丰富度较高, 平原和高原相对贫乏; 随分类阶元变高, 丰富度高值区域面积逐渐扩大, 高值中心逐渐南移。占中国陆地面积5%的裸子植物最丰富区域内分布了85%的中国自然分布的裸子植物物种。我们将这些区域划分为6个裸子植物多样性中心: (1)东喜马拉雅—横断山脉—秦岭, (2)滇黔桂—南岭, (3)华中山地, (4)黄山—武夷山脉, (5)海南岛南部山地, (6)长白山(甑峰山附近)。各中心裸子植物区系之间的特点和联系反映了各自地理位置的差异和空间距离的隔离作用, 其中横断山脉地区是中国裸子植物最重要的分化中心。

关键词: 裸子植物, 丰富度, 特有性, 多样性中心, 种系分化

The spatial pattern of species richness and diversity centers of gymnosperm in China

Guo Li¹, Zehao Shen^{1*}, Tsunshen Ying², Jingyun Fang¹

¹ Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, the Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871

² Laboratory of Systematic and Evolutionary Botany, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093

Abstract: China has the richest flora of gymnosperm in the world, which is crucial for understanding the change of global distribution and phylogeny of gymnosperm. We mapped the geographical range of 202 native gymnosperm species in China with records of altitudinal range and horizontal distribution at the county level, and explored the spatial distribution characteristics of Chinese gymnosperm at the family, genus and species levels. The uniqueness and similarity among the richness centers were analyzed with respect to their gymnosperm family and genus composition, and the endemism. Generally, Chinese gymnosperm shows a decreasing trend of richness from south to north. The richness is high in mountainous areas and low in large plains and on large plateaus. From the species, genus to family levels, the area with high gymnosperm richness increases, and the center with high richness shifts southward. About 85% of all Chinese gymnosperm species are harbored in just 5% of Chinese land area. We classified these regions into six richness centers: (1) Eastern Himalaya-Hengduan Mountains-Qinling Mountains; (2) joint area of Yunnan-Guizhou-Guangxi and the South Mountain Ranges; (3) central China mountains; (4) Huangshan-Wuyi Mountains; (5) southern mountains of Hainan Island; and (6) central part of Changbai Mountains. The floristic relationship of gymnosperm among the centers is obviously related with their geographic location, and the effect of isolation by distance. Among the six centers, Hengduan Mountains is a major variation center of gymnosperm in China.

Key words: Gymnosperm, richness, endemism, diversity center, China

自白垩纪开始, 有花植物从热带地区向寒冷地区扩展分布区, 并逐步取代了裸子植物在植物界的

收稿日期: 2008-12-10; 接受日期: 2009-03-31

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40638039)和国家自然科学基金项目(30870432)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: shzh@urban.pku.edu.cn

统治地位(Crane & Lidgard, 1989)。在经历第四纪冰期的迁移和灭绝后, 全球裸子植物仅剩约850种(Farjón, 2001)。但这些数量有限的物种仍占据着与被子植物面积相当的生存空间。裸子植物在生态特性和地理分布诸方面不同于被子植物(Moles *et al.*, 2005; Mutke & Barthlott, 2005)。裸子植物在现代呈现的分布与丰富度格局是这些植物在长期和多变的环境中适应、进化和被选择、淘汰的结果。中国是世界上裸子植物最丰富的国家(Ying *et al.*, 2004)。中国裸子植物的分布在很大程度上反映了全球热带至温带地区裸子植物的分布特点, 对于理解裸子植物分布的变化与种系分化具有重要意义。

关于中国裸子植物的分布, 此前的研究主要是关于某一分类群物种的地理分布和资源现状, 如松科(应俊生, 1989; 李楠, 1995; 向巧萍, 2001; 张文辉等, 2004)、红豆杉科(檀丽萍和陈振峰, 2006)、杉科(于永福, 1995)等。在全球尺度上, Contreas-Medina 等(2001)提出了5个裸子植物特有中心, 其中之一是中国西南地区。Mutke和Barthlott(2005)进一步指出, 世界上裸子植物种类最丰富的区域是中国的云南和四川。Ying等(2004)作出了中国220种(含亚种、变种)裸子植物的分布点图, 但未作进一步的分析。因此, 中国裸子植物丰富度的总体格局和多样性或者特有性中心分布仍不清楚。

本文中, 我们利用县域空间单元的物种分布数据, 首次探讨中国裸子植物丰富度的格局特征, 提出了中国裸子植物多样性中心, 并分析其间的相互联系, 以进一步完善中国裸子植物分布格局的研究。

1 数据来源和方法

1.1 数据来源

本文中的裸子植物数据来源于《中国植物志》第七卷(郑万钧和傅立国, 1978)、《中国高等植物》第三卷(傅立国和洪涛, 2002)、*Atlas of the Gymnosperms of China* (Ying *et al.*, 2004)、《横断山区维管植物》上册(中国科学院青藏高原综合科学考察队, 1993)、《中国植物红皮书》第一册(傅立国, 1991)和各省植物志的裸子植物部分。将所获得的物种名录与*World Checklist and Bibliograph of Conifers* (Farjón, 2001)与*A Bibliography of Cupressaceae and Sciadopitys* (Farjón, 2005) 进行核对校正后, 共计裸子植物9科33属202种(含亚种、变种)(见附录I)。我

们尽可能全面地确定了各物种在县级行政区划上的分布和分布区的海拔上下限。所有分布数据均为物种的自然分布区域, 不包括引种栽培的区域。

1.2 物种分布区确定

目前的物种分布图通常根据其水平分布信息生成(Stohlgren *et al.*, 2006; Tang *et al.*, 2006)。但由于中国地形起伏大, 在县域水平范围内往往会由于地形变化产生实际分布空白区, 从而带来很大的数据误差。因此, 本文中我们依据每一物种的县域分布信息和海拔分布范围信息, 结合中国行政区划图(矢量数据)和1 km分辨率的中国数字高程栅格数据, 在ArcGIS9.2中生成各物种的地理分布图。步骤如下: (1)依据县域分布信息, 生成各物种的县域分布图矢量数据; (2)根据各物种的海拔分布信息, 提取该海拔段的高程栅格数据; (3)两者叠加形成具有该物种分布的地形栅格; (4)对地形图重新插值, 得到含有地形信息的 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 的物种分布栅格图。

1.3 中国裸子植物热点区域的确定

我们从保护最多物种和控制最小保护面积两个角度探讨了中国裸子植物丰富度热点区域的分布。首先将所有单元格按裸子植物种丰富度由高到低排列, 然后按该顺序选取单元格。单元格选取分别按照以下两种方法: 一是取物种量累计达到总物种数的95%、90%、85%、80%、75%和70%的单元格; 二是取面积累计达到国土总面积的1%、5%和10%的单元格。最后, 把两个系列中交集最大的方案确定为中国裸子植物丰富度的热点区域。

1.4 数据处理

为研究裸子植物种系分化强度, 采用物种数/科数比值(R)进行描述。 R 值通过每一单元格内裸子植物的种数(S)除以科数(F)求得:

$$R = S / F \quad (1)$$

以Sørensen指数(SI)测度不同丰富度中心的物种相似程度:

$$SI = 2c / (a+b) \quad (2)$$

a 和 b 分别为两个中心各自的物种数, c 为两个中心的共有物种数。

2 结果

2.1 中国裸子植物的基本分布格局

中国裸子植物分布范围广阔, 约占国土总面积的75%, 种丰富度的基本格局是南高北低。天然分

布的裸子植物在东北平原、华北平原、长江中下游平原、四川盆地，而塔里木盆地西部和青藏高原腹地基本没有或非常稀少。一个明显的物种丰富度分布中心位于滇西北—川西的横断山脉地区，向北延至川甘交界的岷山山脉。

中国裸子植物不仅物种数量丰富，且特有物种多，202种植物中特有种有92种，占45.54%。特有种分布的纬度范围为18.75–43.08° N，其中分布最南的种为海南苏铁(*Cycas hainanensis*)，分布最北的种

为长白落叶松(*Larix olgensis*)。中国特有种的物种丰富度格局(图1e)与全部物种的丰富度格局(图1a)相似，但新疆、青藏高原中西部、东北北部和内蒙古高原大部分地区没有特有种。横断山脉形成一个显著的特有种高峰区，华中山地为一个次高区，武夷山脉和浙皖丘陵为另一个较高区。

2.2 不同分类阶元的丰富度

裸子植物不同分类阶元的丰富度格局差异明

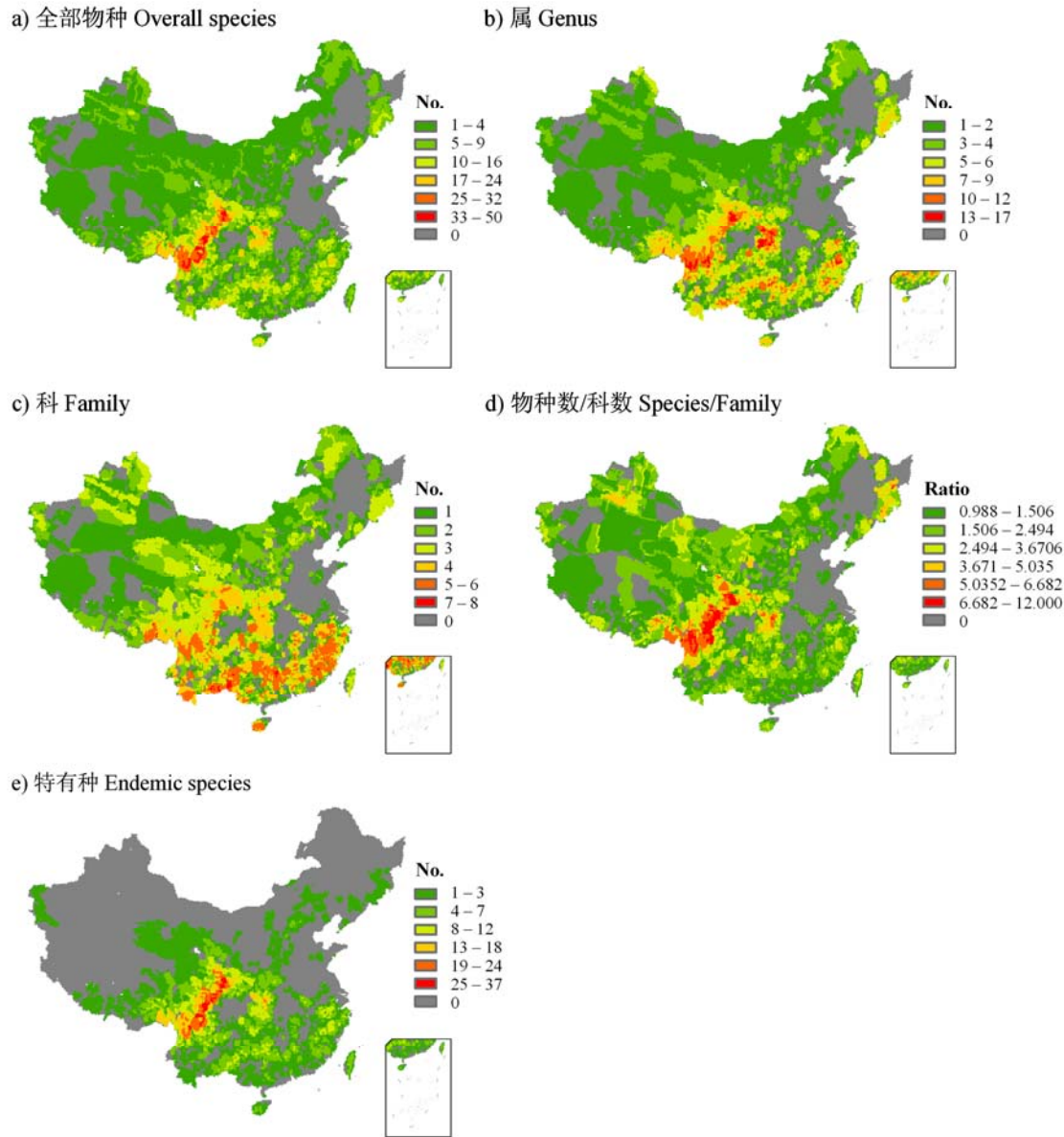


图1 中国裸子植物丰富度分布格局。a), b), c), e)分别为全部物种、属、科与特有种的丰富度格局; d)为物种数/科数比的格局。
Fig. 1 Richness patterns of the Chinese gymnosperm. a), b), c), and e) are the richness patterns of overall species, genera, families and endemic species, respectively. d) is the pattern of the ratios of gymnosperm species over families.

显(图1a, b, c)。从种到属、科, 丰富度高值区域的面积逐渐扩大, 且高值中心逐渐南移。其中种的丰富度格局以横断山脉的高峰值最为显著, 华中山地(包括大巴山脉东段和巫山)次之, 浙闽山地和滇黔桂交界区也相对较高。在属的水平上, 横断山脉—岷山和华中山地的丰富度依然突出, 从桂西南—滇东南、滇黔桂交界至南岭山脉, 皖南山地—武夷山脉也是较突出的高值区。值得注意的是, 长白山脉也出现了一个较高值区。在科水平上, 纬度范围 $25\pm 2^{\circ}\text{N}$ 内, 从滇东南开始经南岭到闽—粤丘陵的南亚热带山地是丰富度最高的区域; 喜马拉雅山脉东段、滇西北和四川盆地的周边山地及海南岛次之; 中部亚热带至暖温带山地如罗霄山脉、大别山脉、秦岭东部也有较高值。

以物种数/科数比反映的种系分化率最高值区出

现在横断山脉地区, 次高值区域出现在华中山地和长白山脉。大面积的平原和高原地区都是最低值区。

2.3 中国裸子植物分布的多样性中心

从物种丰富度最高的区域开始, 比较95%、90%、85%、80%、75%、70%裸子植物物种的分布区域, 和占国土面积1%、5%、10%的裸子植物保护范围, 发现85%的物种集中分布区与5%国土面积的保护区域几乎一致, 两者的重合度为96.4%(表1)。这部分区域可以定义为中国裸子植物多样性中心或重点保护区。它们集中分布在6个相对隔离的地区(图2)。各中心的裸子植物物种组成见表2。

(1)东喜马拉雅—横断山脉—秦岭(EHHQ): 核心在横断山脉, 西南方沿雅鲁藏布江河谷深入到南迦巴瓦峰北坡, 东北方向连续分布至秦岭山脉中西段。整个区域面积 $3.94\times 10^5\text{ km}^2$, 是面积最大、物

表1 按包含物种数百分比划分的裸子植物丰富度区域与按占国土面积百分比划分的丰富度区域之间的重合度
Table 1 The overlap ratios of the richness regions defined by percentage of gymnosperm species over those defined by percentage of land area

		裸子植物物种数百分比 Percentage of gymnosperm species					
		70%	75%	80%	85%	90%	95%
国土面积百分比 Percentage of land area	1%	0.304 (-)	0.276 (-)	0.255 (-)	0.193 (-)	0.143 (-)	0.122 (-)
	5%	0.658	0.724	0.786	0.964 (-)	0.713 (-)	0.612 (-)
	10%	0.329	0.362	0.393	0.519	0.702	0.817

括号内的“-”号表示按国土面积比例划分的丰富度区域的面积比按物种百分比划分的丰富度区域的面积小; 反之亦然。
The minus sign “-” in the brackets indicates that the area of the richness regions defined by percentage of gymnosperm species is smaller than the area of those defined by percentage of land area, and vice versa.

表2 中国6个裸子植物多样性中心的物种组成
Table 2 Species composition of the six gymnospermous diversity centers of China

	物种数 Number of species						
	EHHQ	DQGN	HZ	HSWY	HNIs	CBMt	全国 China
三尖杉科 Cephalotaxaceae	7	6	4	3	2	0	8
柏科 Cupressaceae	24	10	12	7	1	5	39
苏铁科 Cycadaceae	1	11	0	2	3	0	17
麻黄科 Ephedraceae	6	0	0	0	0	0	12
银杏科 Ginkgoaceae	0	0	1	1	0	0	1
买麻藤科 Gnetaceae	2	6	0	4	2	0	7
松科 Pinaceae	54	19	22	9	2	10	93
罗汉松科 Podocarpaceae	2	6	3	3	7	0	12
红豆杉科 Taxaceae	6	5	5	5	0	1	13
总计 Total	102	63	47	34	17	16	202

EHHQ: 东喜马拉雅—横断山脉—秦岭; DQGN: 滇黔桂—南岭; HZ: 华中山地; HSWY: 黄山—武夷山脉; HNIs: 海南岛南部山地; CBMt: 长白山(甑峰山附近)。

EHHQ, Eastern Himalaya–Hengduan Mountains–Qinling Mountains; DQGN, The joint area of Yunnan–Guizhou–Guangxi and the South Mountain Ranges; HZ, Central China Mountains; HSWY, Huangshan Mountain–Wuyi Mountains; HNIs, Mountains in southern Hainan Island; CBMt, central part of Changbai Mountains.

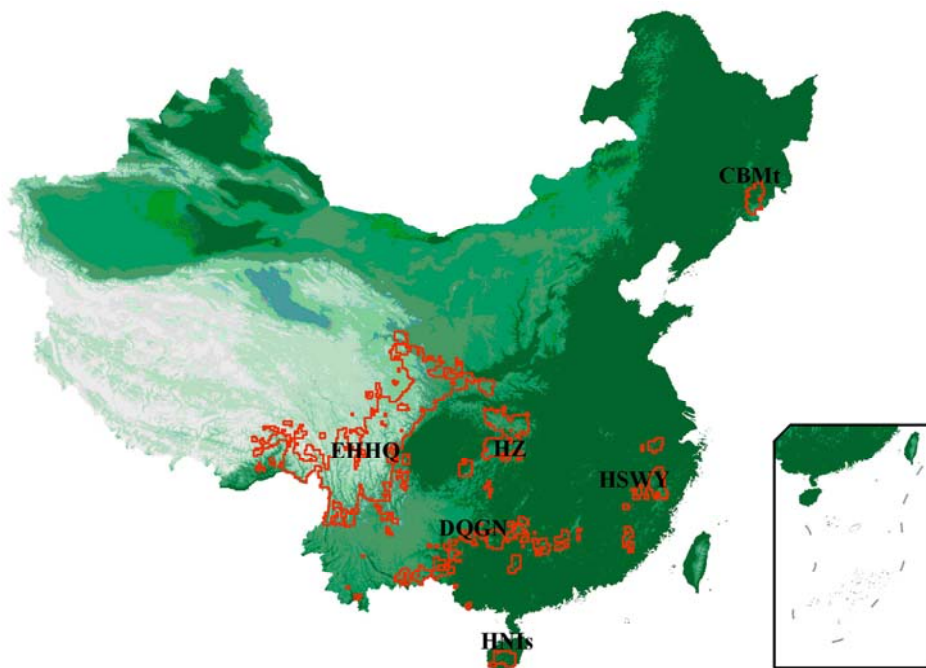


图2 中国裸子植物多样性中心(包括中国85%的裸子植物物种, 总共占国土面积5%)。6个中心的代号同表2。

Fig. 2 Diversity centers of gymnosperm in China (containing 85% of overall gymnosperm of China, and covering 5% of land area of China). The codes for the six diversity centers follow Table 2.

种最多的一个多样性中心。该区域包含除银杏(*Ginkgo biloba*)以外的其他8科23属102种植物, 其中中国特有种70种。松科、柏科、三尖杉科的物种丰富度非常高, 尤其是三尖杉科植(87.5%)物在该区域都有分布。另外, 该区域松科的特有化程度很高, 54种松科植物中45种为中国特有种, 占83.3%。

(2)滇黔桂—南岭(DQGN): 从滇东南屏边、马关开始, 沿云贵高原东南缘东沿至南岭, 面积约 $2.1 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。该中心共计有裸子植物7科24属63种, 中国特有种比例达50.8%。科的丰富度为各中心最高。该区域是喜温热物种的聚集区, 特别是买麻藤科、苏铁科、三尖杉科植物, 占相应的科物种之比例均大于50%。此外, 该区域的苏铁科植物具有很强的特有性。

(3)华中山地(HZ): 核心区位于渝东鄂西。该中心被长江南北分割, 包括大巴山脉东段、巫山和武陵山脉, 向南延伸至梵净山和金佛山等地, 面积约 $6.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。共分布有裸子植物种6科24属47种, 中国特有种比例达72.3%, 为各中心最高。其中松科、柏科物种尤为丰富。

(4)黄山—武夷山脉(HSWY): 包含皖南山区和

武夷山脉, 面积约 $3.18 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。该区域物种组成与前几个分布中心差异明显, 包含除麻黄科以外的8科22属34种, 中国特有种达58.8%。松柏类成分较少, 但分布的9种松科植物均为中国特有种。买麻藤科(主要在武夷山)的丰富度较高。

(5)海南岛南部山地(HNIs): 是面积最小的中心, 仅 $9.8 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。分布有6科8属17种裸子植物, 中国特有种虽仅占29.4%, 但几乎都是海南岛特有的濒危种, 包括葫芦苏铁(*Cycas changjiangensis*)与海南苏铁(*C. hainanensis*)。松柏类植物比例也较小, 却是罗汉松科的一个主要分布中心。

(6)长白山(甑峰山附近)(CBMt): 面积为 $1.5 \times 10^4 \text{ km}^2$, 分布有3科9属16种裸子植物, 中国特有种比例为31.3%, 全部属于松科。喜凉湿气候的松柏类植物丰富度较高, 是唯一位于温带的多样性中心。

2.4 中国裸子植物多样性中心相似性分析

6个裸子植物多样性中心的物种构成的Sørensen指数结果见表3。

华中山地中心的物种构成与横断山脉中心、滇黔桂—南岭中心、黄山—武夷山脉中心都较为接近。由于地理位置居中, 华中山地中心处于南北、

表3 6个多样性中心物种组成的Sørensen指数(SI)
Table 3 The similarity matrix of the six diversity centers according to Sørensen index (SI)

	多样性中心 The diversity centers				
	DQGN	HZ	HSWY	HNI	CBMt
HHQ	0.303	0.362	0.191	0.067	0.033
DQGN		0.436	0.515	0.325	0.000
HZ			0.519	0.063	0.127
HSWY				0.157	0.000
HNI					0.000

6个中心的代号同图2。 The codes for the six diversity centers follow Fig. 2.

东西方向裸子植物区系交流与过渡的枢纽位置, 因此与其他中心有较多的相似成分。华中山地中心与黄山—武夷山脉中心物种构成相似程度最高($SI = 0.519$), 相似性的科顺序为: 三尖杉科>罗汉松科>柏科>红豆杉科>松科, 且这两个区域均有银杏分布; 与东喜马拉雅—横断山脉—秦岭中心物种构成相似性的科顺序为: 红豆杉科=三尖杉科>柏科>罗汉松科>松科; 与滇黔桂—南岭中心物种构成相似性的科顺序为: 红豆杉科=三尖杉科>柏科=罗汉松科>松科。可见华中与周围几个中心的裸子植物区系联系主要在三尖杉科、红豆杉科、柏科。

黄山—武夷山脉中心和滇黔桂—南岭中心具有十分相近的裸子植物物种构成($SI = 0.515$)。其中, 前者分布的物种绝大部分也可分布到后者。物种具体构成的相似性为: 买麻藤科>柏科>三尖杉科=罗汉松科>红豆杉科>松科。买麻藤科物种丰富是二者最大的共同点, 另外, 柏科、红豆杉科和罗汉松科的物种也都较为丰富。

东喜马拉雅—横断山脉—秦岭中心除与华中山地中心、滇黔桂—南岭中心的物种构成较为相似外($SI > 0.3$), 与其他几个中心的相似程度并不高。其最大的特点是松柏科的种类丰富度远远高于其他几个中心, 独具麻黄科, 而缺乏热带属性的买麻藤科、罗汉松科、苏铁科的物种。

海南岛中心与其他几个中心的裸子植物构成相似性均较低, 仅与滇黔桂—南岭中心相似($SI = 0.325$), 这与空间距离和气候环境相似性都有关系。海南岛裸子植物共有17种, 其中13种同时也分布于滇黔桂—南岭中心。

长白山中心的物种构成最特殊。其物种特有性很高, 仅松科、柏科有4个物种在横断山脉和华中地

区有出现, 而与其他中心之间无共有种。作为唯一一个位于温带的裸子植物多样性中心, 长白山脉与其他几个中心之间的空间距离和气候条件差异最大, 因此物种构成的差异也最明显。

3 讨论

中国地域广阔, 气候条件多样, 为不同习性的裸子植物提供了合适的生境。总体格局上, 越往南, 科丰富度越高(图1c)), 这是由各科植物纬度分布的特点决定的。苏铁科、买麻藤科和罗汉松科植物喜暖热, 主要分布在热带和亚热带地区。三尖杉科和红豆杉科植物生长对热量要求也较高, 绝大部分物种分布在暖温带以南地区。松科和柏科植物分布最为广泛, 遍及南北。而北部和西北部广大的温带草原、温带荒漠和青藏高原高寒植被区缺乏适宜大多数裸子植物生长的环境条件, 仅有麻黄科植物可以生长。而单种属的银杏科分布范围狭窄, 对裸子植物总体格局影响小。因此, 由于不同科分布北界的差异明显, 而越往南, 各科分布区域的重叠度增加, 科丰富度格局呈现由北向南递增的趋势。

中国裸子植物分布格局存在几块面积很大的低值区, 分别位于东北平原、华北平原、长江中下游平原、四川盆地、塔里木盆地和青藏高原中西部。平原、盆地裸子植物贫乏, 一方面因为这些地区的环境较为均一单调, 不能满足一些物种特殊的生境要求; 另一方面由于长期而强烈的人类干扰, 大量物种可能曾遭受多次区域性灭绝(Medley *et al.*, 1995; Fuller, 2001)。

科的丰富度格局体现了更多地质历史时期环境格局的影响, 而属和种的丰富度格局更能反映现代环境因子对植物区系发育的影响。裸子植物在漫长的地球生存历史中经历了多次冰期/间冰期循环。冰期北方地区遭受冰川覆盖, 植物向低纬地区迁移(或部分灭绝), 在间冰期又向北迁移。对于中国裸子植物, 不同分类阶元的丰富度格局差异明显, 从科到属到种, 丰富度高值区域分布的面积逐渐缩小, 高值中心逐渐北移, 并集中到横断山脉。

横断山区作为裸子植物丰富度最高的区域, 该地区气候梯度显著、地形复杂。随着第三纪末青藏高原的抬升, 环境的演变和空间隔离促进了物种的分化(李锡文, 1989); 同时由于其南北走向的地形特点, 便于热带亚热带区系成分与温带区系成分混

合,成为两大区系物种迁徙交流的通道,从而保留了大量的孑遗植物,增加了物种组成的复杂度。

横断山区也是我国裸子植物种系分化最强烈的区域,特别是松科和柏科。这一结果与应俊生(1989)和李楠(1995)对松科的研究一致,也与中国种子植物丰富度的整体格局一致(李锡文和李捷,1993;李锡文,1996)。一般认为其成因主要与第四纪青藏高原隆起及冰期/间冰期的气候波动有关(Zhang *et al.*, 2002),这又被称为生态成因(应俊生,2001)。比较而言,滇黔桂—南岭中心、黄山—武夷山脉中心和海南岛具有较高的科丰富度和较低的种系分化率,表明其高的物种丰富度更多源自高的科丰富度,体现了更强的历史残遗。

本文数据表明,在现代的气候条件下,中国大陆中部亚热带山地,甚至长白山的温带湿润气候条件更适合于裸子植物的种系分化。这一结果不支持 Chown 和 Gaston(2000)对全球尺度上物种丰富度纬度梯度的成因论断,即认为热带既是物种的发源地,又是物种的陈列馆,因而具有最高的丰富度。尽管中国大陆的热带区域狭窄,但通过藏、滇、桂与印度和中南半岛的直接地理联系,中国植物区系仍具有明显的热带亲缘(吴征镒,1964),而这并没有影响裸子植物丰富度的现存格局。从图2来看,尽管东喜马拉雅南坡具有与横断山脉近似的地形梯度和地质发展历史,且水热条件更为优越,热带亚热带属性的裸子植物如买麻藤科、罗汉松科、红豆杉科的成分甚至高于滇西北,但裸子植物种系分化率和总的种丰富度低于滇西北,主要是因为松科和柏科的分化率低于后者。这一方面反映了松科和柏科的现代进化条件在横断山脉地区达到最佳,另一方面,至少对于裸子植物来讲,现代的种系分化中心远离热带环境,这一结果与李楠(1995)的结论一致。横断山脉与东喜马拉雅在这方面的差异,至少部分和二者与温带环境和温带植物区系的联系远近有关,而这个问题值得进一步探讨。

出乎意料的是,我国第一大岛台湾岛没有表现为裸子植物分布中心。根据《台湾植物志》第二版提供的数据,台湾全岛的裸子植物非常丰富且特有,共分布有裸子植物8科17属27种,其中台湾特有7科10属13种,超过海南岛和长白山两个中心的数量。但根据本文采用的基于县域分布的统计数据,台湾的裸子植物丰富度没有排到全国前5%面积的

水平。这一方面由于《台湾植物志》第二版第一卷出版时间较早(1994年),有数据不足带来的不确定性,另一方面,台湾与大陆隔离的时间较海南岛为久,不排除因气候变化造成的局部灭绝效应较强。因而,台湾裸子植物构成及其与大陆的关联仍是一个值得进一步研究的问题。

本文提出的中国裸子植物丰富度最高的6个多样性中心,应当也是裸子植物多样性保护最重要的区域。以历史成因为主的海南岛山地、横断山脉、滇黔桂—南岭、武夷山脉以及台湾岛等区域,主要分布残遗成分,在全球变暖的环境背景下,其种质资源保存的迫切性尤为突出。

致谢: 感谢费松林博士和两位审稿专家对文稿提出的建设性的修改意见!

参考文献

- Cheng WC (郑万钧), Fu LK (傅立国) (1978) *Florae Reipublicae Popularis Sinicae* (中国植物志), Vol. 7. Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Chown SL, Gaston KJ (2000) Areas, cradles and museums: the latitudinal gradient in species richness. *Trends in Ecology and Evolution*, **15**, 311–315.
- Contreras-Medina R, Morron JJ, Vega IL (2001) Biogeographic methods identify gymnosperm biodiversity hotspots. *Naturwissenschaften*, **88**, 427–430.
- Crane PR, Lidgard S (1989) Angiosperm diversification and paleolatitudinal gradients in cretaceous floristic diversity. *Science*, **246**, 675–678.
- Editorial Committee of Flora of Taiwan (1994) *Flora of Taiwan*, Vol. I. 2nd edn. Taiwan University, Taipei.
- Farjón A (2001) *World Checklist and Bibliography of Conifers*, 2nd edn. Royal Botanic Gardens, Kew, England.
- Farjón A (2005) *A Bibliography of Cupressaceae and Sciadopitys*. Royal Botanic Gardens, Kew, England.
- Fuller DO (2001) Forest fragmentation in Loudoun County, Virginia, USA evaluated with multitemporal landsat imagery. *Landscape Ecology*, **16**, 627–642.
- Fu LK (傅立国) (1991) *China Plant Red Data Book*, Vol. I (中国植物红皮书第一册). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Fu LK (傅立国), Hong T (洪涛) (2002) *Higher Plants of China*, Vol. III (中国高等植物第三卷). Qingdao Press, Qindao. (in Chinese)
- Li N (李楠) (1995) Studies on the geographic distribution, origin and dispersal of the family Pinaceae Lindl. *Acta Phytotaxonomica Sinica* (植物分类学报), **33**, 105–130. (in Chinese with English abstract)
- Li XW (李锡文) (1996) Floristic statistics and analyses of seed plants from China. *Acta Botanica Yunnanica* (云南植物研究), **18**, 363–384. (in Chinese with English abstract)

- Li XW (李锡文), Li J (李捷) (1993) A preliminary floristic study on the seed plants from the region of Hengduan Mountain. *Acta Botanica Yunnanica* (云南植物研究), **15**, 217–231. (in Chinese with English abstract)
- Li XW (李锡文) (1989) The geographical distribution of Labiatae in Hengduan Mountains. *Bulletin of Botanical Research* (植物研究), **9**, 103–122. (in Chinese with English abstract)
- Medley KE, Okey BW, Barrett GW, Lucas MF, Renwick WH (1995) Landscape change with agricultural intensification in a rural watershed, southwestern Ohio, USA. *Landscape Ecology*, **10**, 161–176.
- Moles AT, Webb CO, Ackerly DD, Tweddle JC, Dickie JB, Westoby M (2005) A brief history of seed size. *Science*, **307**, 576–580.
- Mutke J, Barthlott W (2005) Patterns of vascular plant diversity at continental to global scales. *Biologiske Skrifter*, **55**, 521–531.
- Stohlgren TJ, Barnett D, Flather C, Fuller P, Peterjohn B, Kartesz J, Master LL (2006) Species richness and patterns of invasion in plants, birds, and fishes in the United States. *Biological Invasions*, **8**, 427–447.
- Tan LP (檀丽萍), Chen ZF (陈振峰) (2001) Taxus resources in China. *Journal of Northwest Forestry* (西北林学院学报), **21**, 113–117. (in Chinese with English abstract)
- Tang ZY, Wang ZH, Zheng CY, Fang JY (2006) Biodiversity in China's mountains. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **4**, 347–352.
- The Team of Integrated Scientific Expedition to Qinghai-Xizang Plateau of the Chinese Academy of Sciences (中国科学院青藏高原综合科学考察队) (1993) *Vascular Plants of the Hengduan Mountains*, Vol. I (横断山区维管植物上册). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Wu ZY (吴征镒) (1964) The tropical kindred of Chinese flora. *Symposium for the Beijing Science Conference in 1964* (1964年北京科学研讨会论文集), pp. 127–137. (in Chinese)
- Xiang QP (向巧萍) (2001) A preliminary survey on the distribution of rare and endangered plants of *Abies* in China. *Guihaia* (广西植物), **21**, 113–117. (in Chinese with English abstract)
- Ying TS (应俊生) (2001) Species diversity and distribution pattern of seed plant in China. *Biodiversity Science* (生物多样性), **9**, 393–398. (in Chinese with English abstract)
- Ying TS (应俊生) (1989) Areography of the gymnosperms of China (1): distribution of the Pinaceae of China. *Acta Phytotaxonomica Sinica* (植物分类学报), **27**, 27–38. (in Chinese with English abstract)
- Ying TS, Chen ML, Chang HC (2004) *Atlas of the Gymnosperms of China*. China Science and Technology Press, Beijing.
- Yu YF (于永福) (1995) Origin, evolution and distribution of Taxodiaceae. *Acta Phytotaxonomica Sinica* (植物分类学报), **33**, 362–389. (in Chinese with English abstract)
- Zhang B, Cai XD, LI BL, Yao YH (2002) Biodiversity and conservation in the Tibetan Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, **12**, 135–143.
- Zhang WH (张文辉), Xu XB (许晓波), Zhou JY (周建云), Sun YL (孙玉玲), Xie ZQ (谢宗强) (2004) Distribution and bio-ecological characteristics of *Abies chensiensis*, an endangered plant. *Biodiversity Science* (生物多样性), **12**, 419–426. (in Chinese with English abstract)

(责任编辑: 周玉荣)

附录I 分析所用的202种裸子植物名称(物种名参照Farjón, 2001, 2005)

Appendix I The 202 native gymnosperm species in China that used for analysis in this paper (Farjón, 2001, 2005)

(<http://www.biodiversity-science.net/qikan/manage/wenzhang/08327.pdf>)

附录I 分析所用的202种裸子植物名称(物种名参照Farjón, 2001, 2005)

Appendix I The 202 native gymnosperm species in China that used for analysis in this paper (Farjón, 2001, 2005)

Family	Genus	Species
Cephalotaxaceae	<i>Cephalotaxus</i>	<i>Cephalotaxus fortunei</i>
		<i>Cephalotaxus fortunei</i> var. <i>alpina</i>
		<i>Cephalotaxus hainanensis</i>
		<i>Cephalotaxus lanceolata</i>
		<i>Cephalotaxus latifolia</i>
		<i>Cephalotaxus mannii</i>
		<i>Cephalotaxus oliveri</i>
		<i>Cephalotaxus sinensis</i>
Cupressaceae	<i>Calocedrus</i>	<i>Calocedrus macrolepis</i>
	<i>Chamaecyparis</i>	<i>Chamaecyparis formosensis</i>
		<i>Chamaecyparis obtusa</i> var. <i>formosana</i>
	<i>Cupressus</i>	<i>Cupressus chengiana</i>
		<i>Cupressus chengiana</i> var. <i>jiangensis</i>
		<i>Cupressus duclouxiana</i>
		<i>Cupressus funebris</i>
		<i>Cupressus gigantea</i>
		<i>Cupressus torulosa</i>
	<i>Fokienia</i>	<i>Fokienia hodginsii</i>
	<i>Juniperus</i>	<i>Juniperus chinensis</i> var. <i>chinensis</i>
		<i>Juniperus chinensis</i> var. <i>sargentii</i>
		<i>Juniperus communis</i> var. <i>saxatilis</i>
		<i>Juniperus convallium</i> var. <i>convallium</i>
		<i>Juniperus convallium</i> var. <i>microsperma</i>
		<i>Juniperus formosana</i>
		<i>Juniperus indica</i>
		<i>Juniperus komarovii</i>
		<i>Juniperus pingii</i> var. <i>pingii</i>
		<i>Juniperus pingii</i> var. <i>wilsonii</i>
		<i>Juniperus przewalskii</i>
		<i>Juniperus pseudosabina</i>
		<i>Juniperus recurva</i>
		<i>Juniperus rigida</i>
		<i>Juniperus sabina</i> var. <i>davurica</i>
		<i>Juniperus sabina</i> var. <i>sabina</i>
		<i>Juniperus saltuaria</i>
		<i>Juniperus semiglobosa</i>
		<i>Juniperus squamata</i>
		<i>Juniperus tibetica</i>
	<i>Juniperus</i>	<i>Juniperus chinensis</i> var. <i>tsukusiensis</i>
	<i>Platycladus</i>	<i>Platycladus orientalis</i>
	<i>Thuja</i>	<i>Thuja koraiensis</i>
		<i>Thuja sutchuenensis</i>
	<i>Cryptomeria</i>	<i>Cryptomeria japonica</i>
	<i>Cunninghamia</i>	<i>Cunninghamia lanceolata</i>
	<i>Glyptostrobus</i>	<i>Glyptostrobus pensilis</i>
	<i>Metasequoia</i>	<i>Metasequoia glyptostroboides</i>
	<i>Taiwania</i>	<i>Taiwania cryptomerioides</i>
Cycadaceae	<i>Cycas</i>	<i>Cycas balansae</i>
		<i>Cycas changjiangensis</i>
		<i>Cycas debaoensis</i>
		<i>Cycas ferruginea</i>

附录I (续) Appendix I (continued)

Family	Genus	Species
Ephedraceae	<i>Ephedra</i>	<i>Cycas hainanensis</i>
		<i>Cycas micholitzii</i>
		<i>Cycas taitungensis</i>
		<i>Cycas multipinnata</i>
		<i>Cycas panzhihuaensis</i>
		<i>Cycas pectinata</i>
		<i>Cycas revoluta</i>
		<i>Cycas segmentifida</i>
		<i>Cycas sexseminifera</i>
		<i>Cycas simplicipinna</i>
		<i>Cycas szechuanensis</i>
		<i>Cycas taiwaniana</i>
		<i>Cycas tonkinensis</i>
		<i>Ephedra equisetina</i>
		<i>Ephedra gerardiana</i>
		<i>Ephedra glauca</i>
		<i>Ephedra intermedia</i>
		<i>Ephedra likiangensis</i>
		<i>Ephedra minuta</i>
		<i>Ephedra monosperma</i>
Ginkgoaceae	<i>Ginkgo</i>	<i>Ginkgo biloba</i>
		<i>Gnetum catasphaericum</i>
Gnetaceae	<i>Gnetum</i>	<i>Gnetum gnemon</i>
		<i>Gnetum hainanense</i>
		<i>Gnetum luofuense</i>
		<i>Gnetum montanum</i>
		<i>Gnetum parvifolium</i>
		<i>Gnetum pendulum</i>
		<i>Abies beshanzuensis</i>
		<i>Abies chensiensis</i>
Pinaceae	<i>Abies</i>	<i>Abies chensiensis</i> subsp. <i>salouenensis</i>
		<i>Abies delavayi</i>
		<i>Abies delavayi</i> var. <i>motuoensis</i>
		<i>Abies fabri</i>
		<i>Abies fanjingshanensis</i>
		<i>Abies fargesii</i>
		<i>Abies fargesii</i> var. <i>faxoniana</i>
		<i>Abies forrestii</i>
		<i>Abies forrestii</i> var. <i>ferreana</i>
		<i>Abies forrestii</i> var. <i>georgei</i>
		<i>Abies forrestii</i> var. <i>smithii</i>
		<i>Abies holophylla</i>
		<i>Abies kawakamii</i>
		<i>Abies nephrolepis</i>
		<i>Abies recurvata</i>
		<i>Abies recurvata</i> var. <i>ernestii</i>
		<i>Abies sibirica</i>

附录I (续) Appendix I (continued)

Family	Genus	Species
		<i>Abies spectabilis</i>
		<i>Abies squamata</i>
		<i>Abies yuanbaoshanensis</i>
		<i>Abies ziyuanensis</i>
	<i>Cathaya</i>	<i>Cathaya argyrophylla</i>
	<i>Keteleeria</i>	<i>Keteleeria davidiana</i>
		<i>Keteleeria davidiana</i> var. <i>davidiana</i>
		<i>Keteleeria davidiana</i> var. <i>formosana</i>
		<i>Keteleeria evelyniana</i>
		<i>Keteleeria fortunei</i>
	<i>Larix</i>	<i>Larix gmelinii</i>
		<i>Larix gmelinii</i> var. <i>olgensis</i>
		<i>Larix griffithii</i> var. <i>griffithii</i>
		<i>Larix griffithii</i> var. <i>speciosa</i>
		<i>Larix mastersiana</i>
		<i>Larix potaninii</i>
		<i>Larix potaninii</i> var. <i>chinensis</i>
		<i>Larix potaninii</i> var. <i>macrocarpa</i>
		<i>Larix sibirica</i>
	<i>Nothotsuga</i>	<i>Nothotsuga longibracteata</i>
	<i>Picea</i>	<i>Picea abies</i> var. <i>abies</i>
		<i>Picea asperata</i>
		<i>Picea aurantiaca</i>
		<i>Picea brachytyla</i>
		<i>Picea crassifolia</i>
		<i>Picea jezoensis</i> var. <i>jezoensis</i>
		<i>Picea jezonensis</i> subsp. <i>jezoensis</i> var. <i>komarovii</i>
		<i>Picea koraiensis</i>
		<i>Picea likiangensis</i>
		<i>Picea likiangensis</i> var. <i>hirtella</i>
		<i>Picea likiangensis</i> var. <i>linzhiensis</i>
		<i>Picea likiangensis</i> var. <i>montigena</i>
		<i>Picea likiangensis</i> var. <i>rubescens</i>
		<i>Picea meyeri</i>
		<i>Picea morrisonicola</i>
		<i>Picea neveitchii</i>
		<i>Picea purpurea</i>
		<i>Picea retroflexa</i>
		<i>Picea schrenkiana</i>
		<i>Picea spinulosa</i>
		<i>Picea wilsonii</i>
	<i>Pinus</i>	<i>Pinus armandii</i>
		<i>Pinus armandii</i> var. <i>dabeshanensis</i>
		<i>Pinus armandii</i> var. <i>mastersiana</i>
		<i>Pinus bungeana</i>
		<i>Pinus densata</i>
		<i>Pinus densiflora</i>
		<i>Pinus fenzeliana</i>
		<i>Pinus henryi</i>
		<i>Pinus kesiya</i>
		<i>Pinus koraiensis</i>
		<i>Pinus latteri</i>

附录I (续) Appendix I (continued)

Family	Genus	Species
Podocarpaceae		<i>Pinus massoniana</i>
		<i>Pinus pumila</i>
		<i>Pinus sibirica</i>
		<i>Pinus squamata</i>
		<i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>
		<i>Pinus tabuliformis</i>
		<i>Pinus taiwanensis</i>
		<i>Pinus taiwanensis</i> var. <i>damingshanensis</i>
		<i>Pinus wallichiana</i>
		<i>Pinus wangii</i>
		<i>Pinus yunnanensis</i>
		<i>Pinus yunnanensis</i> var. <i>pygmaea</i>
	<i>Pseudolarix</i>	<i>Pseudolarix amabilis</i>
	<i>Pseudotsuga</i>	<i>Pseudotsuga sinensis</i>
		<i>Pseudotsuga sinensis</i> var. <i>brevifolia</i>
		<i>Pseudotsuga sinensis</i> var. <i>gaussenii</i>
		<i>Pseudotsuga sinensis</i> var. <i>sinensis</i>
	<i>Tsuga</i>	<i>Tsuga chinensis</i>
		<i>Tsuga chinensis</i> var. <i>chinensis</i>
		<i>Tsuga chinensis</i> var. <i>oblongisquamata</i>
		<i>Tsuga dumosa</i>
		<i>Tsuga forrestii</i>
	<i>Dacrycarpus</i>	<i>Dacrycarpus imbricatus</i>
	<i>Dacrydium</i>	<i>Dacrydium pectinatum</i>
	<i>Nageia</i>	<i>Nageia fleuryi</i>
		<i>Nageia nagi</i>
	<i>Podocarpus</i>	<i>Nageia wallichiana</i>
		<i>Podocarpus annamiensis</i>
		<i>Podocarpus fasciculus</i>
		<i>Podocarpus macrophyllus</i>
		<i>Podocarpus macrophyllus</i> var. <i>macrophyllus</i>
		<i>Podocarpus macrophyllus</i> var. <i>piliramulus</i>
		<i>Podocarpus neriifolius</i>
		<i>Podocarpus pilgeri</i>
Taxaceae	<i>Amentotaxus</i>	<i>Amentotaxus argotaenia</i>
		<i>Amentotaxus argotaenia</i> var. <i>brevifolia</i>
		<i>Amentotaxus formosana</i>
		<i>Amentotaxus yunnanensis</i>
	<i>Taxus</i>	<i>Taxus chinensis</i> var. <i>chinensis</i>
		<i>Taxus cuspidata</i>
		<i>Taxus wallichiana</i>
		<i>Taxus wallichiana</i>
	<i>Torreya</i>	<i>Torreya grandis</i>
		<i>Torreya grandis</i> var. <i>fargesii</i>
		<i>Torreya grandis</i> var. <i>jiulongshanensis</i>
		<i>Torreya grandis</i> var. <i>yunnanensis</i>
		<i>Torreya jackii</i>