

# 中国特有植物地理成分及其与气候因素关系<sup>\*</sup>

黄继红<sup>1,2</sup> 马克平<sup>1</sup> 应俊生<sup>3</sup>

(1 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室,北京 100093;

2 中国科学院植物研究所文献与信息管理中心,北京 100093;

3 中国科学院植物研究所系统与进化植物学国家重点实验室,北京 100093)

**摘要** 本研究旨在揭示含有中国特有植物属的地理成分随着纬度和主要气候因素的变化规律。参照属的3大分布型和15种分布型,基于中国特有种子植物所隶属的1664属在28省(区)的分布,我们将全国分成四个纬度区,分析了含有中国特有种子植物属的地理分布格局与纬度和气候因素的关系。结果表明:热带分布属所占比例随着纬度增加而减少,而温带分布属植物则随着纬度增加而增加,世界广布属的比例随着纬度升高逐渐缓慢增加。在北纬35°到40°之间,热带和温带分布属的比例分别呈现降低和增加变缓的现象;在北纬25°线,热带和温带分布型的比例相当。这种变化缓慢现象和均值现象在其他气候因素上也对应地出现。因此,含有中国特有种子植物属的地理成分组成变化与纬度和气候因素梯度呈现明显一致的规律性变化。

**关键词** 生物地理学,特有,植物区系,纬度梯度,种子植物

## 1 引言

中国植物物种丰富,特有程度较高,且第三纪孑遗植物种类较多(应俊生和张玉龙,1994)。同时,中国几乎有各种森林植被类型分布,且这些森林植被类型几乎呈现连续的纬向森林植被带(吴征镒,1980; Qian *et al.*, 2003)。该森林植被带主要分布在中国东部季风区域,南起海南岛(约18°23'N),北抵中国最北部的黑龙江省漠河县(约53°31'N),从北到南,跨36个纬度。由于覆盖了多个气温带,因而植被替代明显,包括寒温带针叶林、温带针阔叶混交林、暖温带落叶阔叶林、亚热带常绿阔叶林和热带雨林等。北半球大陆这种纬向连续的森林植被带在更新世冰期是普遍存在的,但由于更新世以后大陆冰川的屡次侵蚀和覆盖,欧洲和北美洲的生物类群因而大量绝灭(Pielou, 1991),而东亚,尤其是中国的东部季风区几乎没有遭受到大陆冰川的侵害,因此,中国东部季风区保存着现今世界上唯一的各种森林植被类型纬向连续带。另外,植物学家们认为这一森林植被类型连续带的南部,即中国的西南地区,包含了被子植物的起源和分化中心(Takhtajan, 1969; Raven & Axelrod, 1974; Wolfe, 1975; 吴征镒, 1980; Tiffney 1985a, b)。近些年的研究发现,最早的被子植物大化石(早侏罗纪被子植物)出现在中国的辽宁省北票县(Sun *et al.*, 1998),同样也位于该植被类型连续带内。因此,在生态学和生物地理学上,中国特有的纬向植被连续带为植物多样性纬向分布格局的成因和维持机理的研究提供了独特的素材。

\* 资金项目:中国博士后科学基金(2011M500439)和国家自然科学基金(2007BAC03A08-8)

中国植被的纬向梯度分布格局主要是晚第三纪气候转凉的结果。在早第三纪,北半球以相对均一、温暖的气候为主(Tiffney, 1985a)。此间,一个相对连续、均质的以热带和亚热带成分为主的植物区系(即所谓的北热带植物群(boreotropical flora)(Wolfe, 1975)),占据着当前的北极地区,并覆盖了整个欧亚和北美大陆(Latham & Ricklefs, 1993)。随着中、晚第三纪向更新世过渡期间气候转凉,迫使植物南移(Wolfe, 1975; Tiffney, 1985a),比较均一的北热带植物群逐渐过渡为混交的湿生林,且出现片段化。当气候冷期来临,北热带植物群中不耐寒的植物种类要么向低纬度迁移,要么未能及时南迁而灭绝,而耐寒的植物种类则可在原地适应并进化(Leopold & MacGinitie, 1972; Wolfe, 1975; Tiffney, 1985a; Xiang & Soltis, 2001)。同样地,热带地区新进化而来的类群也有可能向温带地区扩散,但是这种扩散非常困难,因为它首先需要具备抗冻的能力(Latham & Ricklefs, 1993)。由于被子植物起源于热带,且不同植物家系耐寒性不同,因此,在热带到北极的连续纬向梯度中,热带成分逐渐减少,而温带成分逐渐增加。另外,中国地处欧亚大陆东部,欧亚大陆与非洲相连,且在地质历史时期通过白令陆桥与北美洲相连接,北美连接南美;而南非、南美和澳大利亚都是冈瓦纳古陆的组成部分。这种当前和过去不同大陆的连接以及中国和世界其他地区的联系很可能导致了中国和世界其他地区在不同纬度上植物区系关系的变化。

中国植物区系的特有现象,已经引起许多植物学家和保护生物学家的重点关注(Raven & Axelrod, 1974; 应俊生和张志松, 1984; 王荷生, 1985, 1989; 李锡文, 1994; 应俊生和张玉龙, 1994; 应俊生, 1996; 杨亲二和左家哺, 1998)。中国特有植物区系呈现出明显的规律性分布。从特有类群丰富度的地理空间分布来看,基于中国行政区为基本空间分析单元的中国特有属的分布格局的研究表明:中国西南,主要是云南省,分布有180个中国种子植物特有属,远较华中和华东地区特有属丰富;西北和东北地区,特有属最为贫乏(王荷生, 1992)。中国特有现象的分布在属、种不同分类等级的空间分布格局一致(Huang *et al.*, 2011)。此外,中国种子植物特有属的物种丰富度随着纬度的增加而降低(Huang *et al.*, 2011)。关于特有现象中心的成因,应俊生和张玉龙(1994)认为地形分异和气候差异是特有中心形成的主要原因。Hamilton(1976)也强调了气候的重要性,认为足够的湿润是特有现象形成的主要成因。在干旱的冰期,一些地区能够维持足够的湿润,这些湿润地区恰恰都是特有现象分布中心。然而,近年来有研究者认为,特有现象分布中心形成的气候因素,主要是由于一些地区具有长期稳定的气候所致,而与该地区的干湿程度无关(Lovett & Friis, 1996)。

综上所述,尽管中国具有上述独特的纬向连续植被带分布和复杂的区系组成,而且相关研究也对特有现象的分布格局和成因提出了推论性的解释,但就中国特有种子植物区系组成沿着这一连续的纬向梯度植被带的变化,以及特有物种丰富度与环境变化关系的讨论甚少。因此,本研究针对中国特有种子植物进行研究,旨在揭示含有中国特有植物属的区系成分随着纬度和主要气候因子的变化规律。

## 2 数据和方法

在本研究中,以行政区(自治区)为基本空间分析单元。根据28个省(4个直辖市归入相应的省中;23个省和5个自治区,统称为省)的中央纬度值范围,将全国分成四个纬度区,即低于北纬24°,北纬24°至32°之间,北纬32°至40°之间和高于北纬40°,各省的纬度分布及各纬度

区包含的省分别见图 1 和表 1。

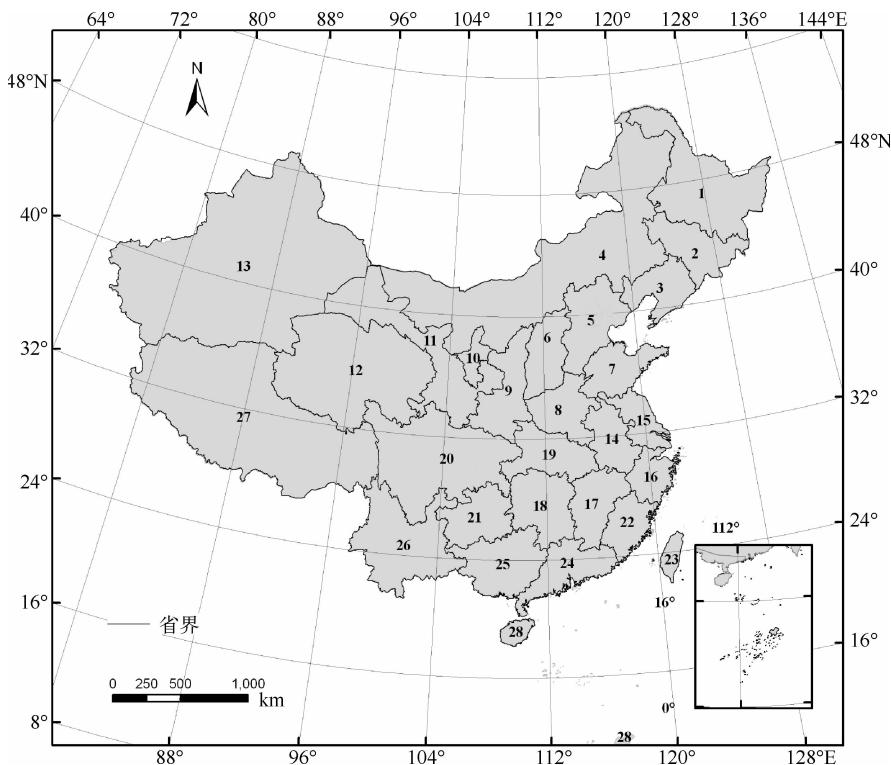


图 1 28 个行政区对应四个纬度带的分布图,代码对应的省名称见表 1

Fig. 1 Map showing the overall study area and the twenty-eight regions used in the study. Codes for regions are shown in Table 1

地图数据从“国家基础地理信息中心”下载;由 ArcGIS 9.0 绘图

表 1 中国 28 个行政区的地理参数

Table 1 Geographical parameters for each of the twenty-eight regional floras of China in this study

省代码 Province code	省 Province	纬度区 Lat.	面积(km <sup>2</sup> ) Area(km <sup>2</sup> )	纬度(度) Lat.	经度(度) Long.	最高海拔(m) Elev. (m)
1	黑龙江 Heilongjiang	>40°N	53,690	48. 48°N	128. 14°E	1617
2	吉林 Jilin	>40°N	20,910	43. 06°N	126. 47°E	2565
3	辽宁 Liaoning	>40°N	15,140	41. 11°N	122. 31°E	1244
4	内蒙古 Neimenggu	>40°N	128,180	45. 37°N	111. 62°E	3304
5	河北 Hebei	32°—40°N	22,290	39. 33°N	116. 65°E	2711
6	山西 Shanxi	32°—40°N	15,810	37. 66°N	112. 39°E	2983
7	山东 Shangdong	32°—40°N	14,920	36. 40°N	118. 75°E	1378
8	河南 Henan	32°—40°N	15,940	33. 88°N	113. 50°E	2268
9	陕西 Shaanxi	32°—40°N	20,150	35. 65°N	108. 37°E	3594
10	宁夏 Ningxia	32°—40°N	5,150	37. 31°N	105. 97°E	3430

续表

省代码 Province code	省 Province	纬度区 Lat.	面积(km <sup>2</sup> ) Area(km <sup>2</sup> )	纬度(度) Lat.	经度(度) Long.	最高海拔(m) Elev. (m)
11	甘肃 Gansu	32°—40°N	41,030	37.69°N	100.74°E	5709
12	青海 Qinghai	32°—40°N	70,980	35.44°N	96.24°E	6619
13	新疆 Xinjiang	>40°N	174,400	41.76°N	84.94°E	7822
14	安徽 Anhui	32°—40°N	13,180	32.03°N	117.26°E	1680
15	江苏 Jiangsu	32°—40°N	9,860	32.90°N	119.13°E	535
16	浙江 Zhejiang	24°—32°N	8,910	29.12°N	120.49°E	1784
17	江西 Jiangxi	24°—32°N	15,100	27.28°N	116.03°E	2040
18	湖南 Hunan	24°—32°N	19,180	27.38°N	111.52°E	1976
19	湖北 Hubei	24°—32°N	17,340	31.16°N	112.25°E	2962
20	四川 Sichuan	24°—32°N	52,840	30.18°N	103.77°E	7213
21	贵州 Guizhou	24°—32°N	15,770	26.92°N	106.59°E	2600
22	福建 Fujian	24°—32°N	10,480	25.94°N	118.28°E	1993
23	台湾 Taiwan	<24°N	2,990	23.85°N	121.95°E	3743
24	广东 Guangdong	<24°N	14,830	22.87°N	113.48°E	1723
25	广西 Guangxi	<24°N	20,570	23.64°N	108.27°E	1971
26	云南 Yunnan	24°—32°N	33,690	25.20°N	101.86°E	5956
27	西藏 Xizang	24°—32°N	113,300	31.67°N	88.75°E	8191
28	海南 Hainan	<24°N	2,710	20.18°N	109.82°E	1721

依据中国特有种子植物名录(Huang *et al.*, 2011), 提取含有中国特有种子植物属的名录。参照吴征镒(2006)对中国种子植物科属分布型的划分, 整理出中国特有种子植物属的地理分布型信息。特有种子植物属被分为三个大类型, 即世界广布、热带分布和温带分布。根据属的地理分布相似性, 热带分布又可细分为泛热带、东亚(热带、亚热带)及热带南美间断、旧世界热带、热带亚洲及热带大洋洲、热带亚洲至热带非洲和热带亚洲六种类型; 同样, 温带分布具体又可分为北温带、东亚及北美间断、旧世界温带、温带亚洲、地中海区—西亚至中亚、中亚、东亚和中国特有八种类型。

运用卡方分析(Chi-square analysis)(Zar, 1984)来检验特有植物属的不同地理成分在四个纬度带的比例是否一致。无度量多维标定排序(Non-metric multi-dimensional scaling, NMDS)用来提取区系梯度。运行 NMDS 时, 数据要求是每属在每省有无分布, 即 0/1 值矩阵; 用 Jaccard 相关系数来测度相异性。Person's 相关系数用于检验 NMDS 提取出的区系梯度与纬度之间的相关性。特有植物属的组成和区系地理成分在地区水平的相关性使用典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)(ter Braak, 1986)进行分析。CCA 的运行, 基于每省属的丰富度矩阵和属的地理成分组成比例的矩阵。Mantel 置换检验( $n=999$ )用于估计经 NMDS 分析和 CCA 分析结果的显著性(Legendre & Legendre, 1998)。在 R2.10.0(R Development Core Team, 2009)下运行 NMDS(R 软件 MASS 包中的 isoMDS 函数)和 CCA(R 软件 vegan 包中的 cca 函数)排序分析及 Monte Carlo 检验(R 软件 ape4 包中的 mantel.rtest 函数)。

另外, 对全国 671 个气象站点 1970—2000 年的插值数据(于贵瑞等, 2004), 共计 83 个数

据层,进行转化得到 28 个省区各主要气候指标值。最终提取相关的 6 个气候变量,即年均温、1 月均温、7 月均温、年降雨量、生长旺季降雨量、年辐射(表 2)。DEM 高程数据下载自美国地质勘测局(USGS)的共享数据网(<http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/hydro/>)。以上数据在进行分析处理前,均在 ArcGIS 9.0(ESRI, 2004)环境下,利用其区域统计功能(zonal statistics),以行政区为基本的空间分析单元,将相应的栅格数据转换为以省为基本单元的数据,从而得到各省对应的环境变量。

表 2 基于 28 个省区划分出的各纬度带的气候和地形变量统计值(平均值±标准偏差)

Table 2 Summarized data (mean ± standard deviation) for climatic and geographical variables of the twenty-eight regional floras according to latitudinal zone.

	纬度带 Latitudinal zone			
	<24°N (n=4)	24°—32°N (n=10)	32°—40°N (n=9)	>40°N (n=5)
<b>气候 Climate</b>				
年均温 Annual mean temperature	19.6±4.1	13.2±5.8	9.5±5.3	4.3±2.3
1 月均温 January mean temperature	13.3±3.3	2.8±6.2	-4.9±5.6	-15.5±4.0
7 月均温 July mean temperature	24.6±5.6	22.7±5.9	22.3±5.5	21.3±1.5
年降雨量 Annual precipitation	1676.9±141.8	1279.8±399.4	655.0±322.3	466.8±242.9
6—9 月降雨量 Precipitation in June to September	2077.5±349.1	1481.6±330.8	1048.0±347.5	871.8±469.0
年辐射 Annual radiation	5154.0±571.9	4743.9±697.6	5381.1±418.8	5251.6±479.7
<b>地理 Geography</b>				
面积 Area(×1000 km <sup>2</sup> )	10.3±8.9	31.8±33.5	62.9±19.4	78.5±70.0
纬度 Latitude(°N)	22.6±1.7	28.3±2.3	22.9±2.3	44.0±3.0
最高海拔 Maximum elevation(×10 m)	402.2±278.1	1316.9±1481.6	35.8±1250.1	778.1±715.7

### 3 结果与讨论

特有种子植物(包含亚种和变种)共归属 1,664 属。其中 1,046 个属(占 63%)在低于北纬 24° 的区域有分布。这些属中,有 211 属的特有植物仅分布在北纬 24° 以南(表 3)的地区。有 307 个属的特有植物出现在北纬 40° 以北,其中 47% 的属也分布到北纬 24° 以南的地区(表 3)。

表 3 四个纬度带中各纬度带出现的属数及每两个纬度带共有属数

Table 3 Number of genera in each of the four latitudinal zones (diagonal) and number of genera shared between a pair of zones

纬度区 Latitude zone	<24°N	24°—32°N	32°—40°N	>40°N
<24°N	1046			
24°—32°N	835	1364		
32°—40°N	447	662	722	
>40°N	145	229	255	307

NMDS 排序分析的第一、二、三维度的值分别是 52.4, 4.8 和 2.7, 这表明第一维度捕获了 28 个特有植物属区系单元的区系关系的大部分信息。图 2 显示了世界广布属、热带分布属和温带分布属的相对出现频度随气候及地形因子变化的趋势。在所有提取的变量中, 三大分布类型的相对出现频度随纬度梯度的变化表现出最为明显的规律性。在最南端大约北纬 20°附近(即海南岛), 热带分布成分约占总数的 75%, 向北迅速下降, 在北纬 45°至 50°, 其接近 0%。相比之下, 在海南岛, 温带分布成分约占总数的 20%, 往北其所占比例迅速增多, 在北纬 35°, 约占 80%, 而后, 随着纬度增加, 其值趋于平稳。世界广布属的比例随着纬度升高逐渐增加, 在北纬 20°, 仅占 5%; 在北纬 50°, 增至 21%。三个分布类型沿着温度、降水和辐射梯度的变化或多或少呈现出与沿着纬度梯度变化类似或相对应的变化趋势(图 2a-d)。不同的是, 它们沿温度梯度的变化是其沿纬度梯度的镜像分布模式。例如, 热带和温带地理成分在北纬 35°至 40°的频度分布变化与其在 10°C 的频度分布变化镜像对应(图 2a,b)。

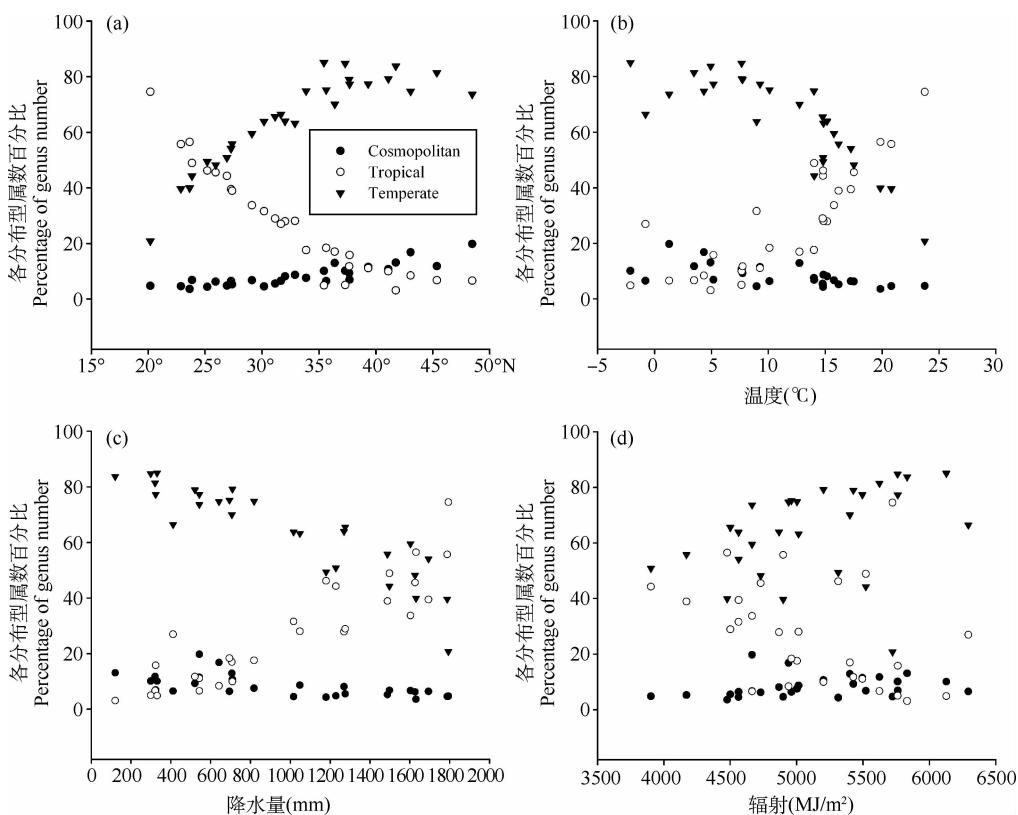


图 2 中国特有种子植物隶属的属的世界分布、热带分布和温带分布类型组成比例与气候和地形因子的关系:(a)纬度,(b)年均温,(c)年降雨和(d)年总辐射

Fig. 2 Relationships between the proportions of cosmopolitan, tropical and temperate genera of endemic seed plants, and (a) latitude (b) temperature (c) precipitation and (d) radiation

各热带和温带地理成分比例随纬度梯度的变化详见表 4。随着纬度逐渐升高, 15 种地理成分的比例均呈现出单一的递增或递减趋势。其中, 六种热带成分随纬度增加逐渐降低, 泛热带、古热带和热带亚洲分布在北纬 24°以南分别占总数的 16.3%, 9% 和 20%; 而在北纬 40°以

北,它们所占的比例均接近0(表4)。从低纬度到高纬度,北温带分布和温带欧洲分布属所占比例显著增加,而北温带分布类型增加尤其显著,增值达31%。其余地理成分随纬度梯度变化,其组成百分比虽没有达到统计学上的显著水平,但它们均呈现出一定的趋势分布。东亚—北美间断、东亚和中国特有分布型比例在中纬度带偏高,其峰值落在北纬24°和32°之间。温带亚洲、地中海区—西亚至中亚和中亚分布均呈现出随纬度升高,逐渐增加的趋势(表4)。

表4 中国特有种子植物属的在4个纬度带(基于28个省)中15个地理成分所占比例(%,平均值±标准偏差)

Table 4 The proportion (% , mean  $\pm$  Standard deviation) of the genera across the fifteen geographical elements for each of the four latitudinal zones based on the twenty-eight regional floras used in this study.

地理分布型 Geographical element	纬度带 Latitudinal zone				Chi-square test
	<24°N (n=4)	24°—32°N (n=10)	32°—40°N (n=9)	>40°N (n=5)	
世界分布 Cosmopolitan	4.9±1.4	5.8±1.5	9.2±2.1	14.5±3.6	n. s.
泛热带 Pantropical	16.3±3.2	11.3±3.9	5.3±2.6	2.7±1.2	* *
东亚(热带、亚热带)及热带南美间断 Trop. &. Subtr. E. Asia & (S.) Trop. Amer. Disjuncted	2.7±0.5	2.4±0.6	1.3±0.8	0.3±0.5	n. s.
旧世界热带 Old World Tropics	8.5±2.3	4.6±2.4	1.9±1.2	0.8±0.5	* *
热带亚洲及热带大洋洲 Trop. Asia to Trop. Australasia Oceania	9.0±1.2	4.5±2.6	2.0±0.8	2.0±1.0	n. s.
热带亚洲及热带非洲 Trop. Asia to Trop. Africa	2.5±0.6	2.1±0.6	1.4±0.3	1.7±0.5	n. s.
热带亚洲 Trop. Asia	19.9±5.7	11.5±5.7	2.5±2.4	0.0±0.0	* *
北温带 N. Temp	11.3±5.7	19.0±5.8	32.5±4.9	42.1±3.5	* * *
东亚及北美间断 E. Asia & N. Amer. disjuncted	5.1±1.4	6.9±2.0	5.8±2.0	2.9±0.9	n. s.
旧世界温带 Old World Temp.	3.5±1.6	7.2±2.6	15.2±2.8	16.1±1.7	* *
温带亚洲 Temp. Asia	0.4±0.3	1.2±0.7	3.2±0.8	4.2±0.9	n. s.
地中海区、西亚至中亚 Medit. , W. to C. Asia	0.2±0.0	0.2±0.2	2.0±2.1	3.6±4.2	n. s.
中亚 C. Asia	0.0±0.0	0.6±0.9	1.8±2.1	3.2±3.7	n. s.
东亚 E. Asia	9.3±2.1	14.2±3.7	10.2±2.6	4.0±1.5	n. s.
中国特有 Endemic to China	6.5±2.7	8.5±2.5	5.6±2.1	1.8±1.8	n. s.

\* \* \*  $P<0.001$ , \*\*  $P<0.01$ , \*  $P<0.05$ , and n. s. =not significant( $P\geq 0.05$ ).

特有植物属的组成和区系地理成分在地区水平的相关性分析结果用CCA排序的前两个坐标轴表示如图3所示。第一、二和三坐标轴的特征向量值分别为0.412, 0.246和0.223。前两坐标轴的特征值明显不同( $P<0.05$ ),且属的组成与地理成分的关系与第一坐标轴显著相关( $P<0.05$ )。六个热带地理成分所占比例与CCA第一坐标轴显著负相关(表5),且主要分布在北纬32°以南的省区(图3)。相对而言,世界分布和北温带地理成分与CCA第一坐标轴显著正相关(内部相关系数分别为0.80和0.97,表5),且主要分布在北纬32°以北的省区,聚集中在北纬40°以北(图3)。东亚—北美间断分布与CCA第二坐标轴正相关(表5),且在北纬32°以南为主分布区。温带欧洲、温带亚洲,地中海区—西亚至中亚和中亚成分都与CCA第一坐标轴正相关,主要分布在北纬32°和40°之间的纬度带(图3),但前两者为正相关;后两者虽也为正相关,但相关程度不高。东亚和中国特有成分主要分布在北纬24°至32°的中低纬度地区(图3)。CCA分析结果同样证实了含中国特有种子植物属的地理成分随纬度梯度的明显的变化趋势。

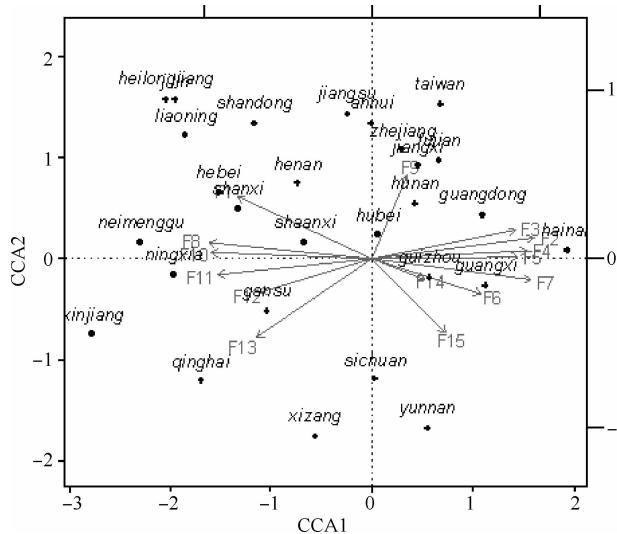


图3 中国特有种子植物属的15个区系地理成分(带箭头及数字编号)28省的CCA数字代码分别代表:F1=世界分布,F2=泛热带,F3=东亚(热带、亚热带)及热带南美间断,F4=旧世界热带,F5=热带亚洲及热带大洋洲,F6=热带亚洲及热带非洲,F7=热带亚洲,F8=北温带,F9=东亚及北美间断,F10=温带欧亚,F11=温带亚洲,F12=地中海区及西亚至中亚,F13=中亚,F14=东亚和F15=中国特有

Fig. 3 Biplot based on canonical correspondence analysis (CCA) of the twenty-eight regional floras of China in relation to the fourteen geographical elements (represented by numerical codes). Numerical codes are: F1 = Cosmopolitan, F2 = Pantropical, F3 = Trop. & Subtr. E. Asia & (S.) Trop. Amer. Disjuncted, F4 = Old World Tropics, F5 = Trop. Asia to Trop. Australasia Oceania, F6 = Trop. Asia to Trop. Africa, F7 = Trop. Asia, F8 = N. Temp., F9 = E. Asia & N. Amer. disjuncted, F10 = Old World Temp., F11 = Temp. Asia, F12 = Medit. , W. to C. Asia, F13 = C. Asia, F14 = E. Asia and F15 = Endemic to China

表5 中国28个省特有种子植物属地理成分组成比例与CCA前两个轴的对应相关系数

Table 5 Canonical correlations of geographical elements with the first two axes of canonical correspondence analysis (CCA) using the floristic data of the twenty-eight regions in China

地理分布型 Geographical element	组内相关性 Intraset correlation		组间相关性 Interset correlation	
	Axis 1	Axis 2	Axis 1	Axis 2
世界分布 Cosmopolitan	0.802	0.402	0.802	0.401
泛热带 Pantropical	-0.953	0.081	-0.952	0.081
东亚(热带、亚热带)及热带南美间断 Trop. & Subtr. E. Asia & (S.) Trop. Amer. Disjuncted	-0.749	0.2	-0.748	0.2
旧世界热带 Old World Tropics	-0.911	0.073	-0.91	0.073
热带亚洲及热带大洋洲 Trop. Asia to Trop. Australasia Oceania	-0.852	0.041	-0.851	0.041
热带亚洲及热带非洲 Trop. Asia to Trop. Africa	-0.675	-0.246	-0.674	-0.245
热带亚洲 Trop. Asia	-0.948	-0.089	-0.947	-0.089

续表

地理分布型 Geographical element	组内相关性 Intraset correlation		组间相关性 Interset correlation	
	Axis1	Axis2	Axis1	Axis2
北温带 N. Temp	0.973	0.122	0.972	0.122
东亚及北美间断 E. Asia & N. Amer. disjuncted	-0.212	0.464	-0.212	0.463
旧世界温带 Old World Temp.	0.958	0.061	0.957	0.061
温带亚洲 Temp. Asia	0.916	-0.04	0.915	-0.04
地中海区、西亚至中亚 Medit., W. to C. Asia	0.694	-0.152	0.694	-0.151
中亚 C. Asia	0.677	-0.416	0.676	-0.415
东亚 E. Asia	-0.332	-0.241	-0.332	-0.24
中国特有 Endemic to China	-0.427	-0.473	-0.426	-0.471

含中国特有种子植物属的地理成分组成自南向北呈现明显的纬向梯度变化,其与种子植物属在纬向上的分布格局完全一致(Qian *et al.*, 2003)。这种纬向梯度变化可能主要是由于热带成分由北向南逐渐增加所致(Qian *et al.*, 2003)。热带地区被认为是被子植物的起源地(Takhtajan, 1969; Raven & Axelrod, 1974; 吴征镒, 1980),热带和亚热带亚洲(包括中国大部分在内)也被认为是被子植物的分化中心之一(Takhtajan, 1969; 吴征镒, 1980)。由于早第三纪到早始新世全球气候变暖,热带地区进化的类群从低纬度向高纬度散布,因此形成了随着纬度升高,热带成分组成逐渐降低的分布格局(Qian *et al.*, 2003)。植物化石证据表明分布于高纬度地区的第三纪北热带植物群中包含了大量的热带植物类群(Qian *et al.*, 2003),且它们与当前低纬度地区的亚热带植物区系亲缘关系密切(Latham & Ricklefs, 1993)。中国特有种子植物隶属的很多属,局限分布于热带和暖温带,而第三纪时,它们也是高纬度地区的北热带植物群的组成部分,如八角枫属(*Alangium*)、栗属(*Castanea*)、南蛇藤属(*Celastrus*)、山胡椒属(*Lindera*)、水杉属(*Metasequoia*)和檫木属(*Sassafras*)等。

在始新世早期和中期,气候明显变冷(Graham, 1999)阻碍了大多数物种的进化。由于几乎所有的热带植物都是不耐寒的(Lomolino *et al.*, 2006),而且许多被子植物很难适应气候的突然变化(Tiffney, 1985a),致使北半球的北热带植物群中常绿和不耐冻的植物被迫南移(Tiffney, 1985b)。因此,随着纬度升高,对寒冷适应的进化过程很可能导致热带分布成分比例降低(Qian *et al.*, 2003)。从热带分布属随纬度梯度的变化来看,在北纬35°到40°之间,热带分布型所占比例随纬度升高而降低的速率开始减缓(图2a)。在对东亚植物区系的研究中,钱宏(2003)首先发现分布型随纬度梯度变化速率在北纬40°附近发生相对明显的改变,并提出北纬40°可能是植物适应寒冷气候的一个比较特殊的生物学阈值。中国特有种子植物所隶属的属的速率降低点的纬度值稍低于整个植物区系的对应值,这可能是由于我们研究的是特有类群,其分布范围相对更加局限的结果。与中国主要气候因子的等值线分布图(刘明光, 1998)对照来看,北纬35°大致与年均温14℃的等值线相对应。由图2b可见,年均温14℃附近是热带成分比例降低速率减缓和温带成分比例增加速率加快的点。此温度可能是植物适应寒冷气候的一个比较特殊的生物学阈值,可能对于中国特有种子植物的纬度梯度分布格局起到关键作用。中国有大量的植物属或种分布到此线更北,其中许多(例如,木兰属*Magnolia*, 山胡椒属*Lindera*等)植物的北界分布范围与东部季风区域的界线一致。从各地理分布型的组成变

化与降水量的关系来看(图 2c),各地理成分随年降水量的变化的突变速率约为年降水量 700 mm 处。此外,从各地理分布型的组成变化与年辐射量的关系来看(图 2d),各地理成分随年辐射量的突变速率约为 5000 MJ/m<sup>2</sup>,且其规律性相对纬度、温度和降水要弱。综合以上气候因子等值线分布来看,地理成分比例变化较快的对应气候值,在南北向大致均位于北纬 35°附近,与秦岭山脉对应,它是中国植物地理分布的天然界线,基本对应着中国亚热带常绿阔叶林的北界(吴征镒,1980)。由此可见,特殊的地形地貌可能是限制特有植物属级分类群分布的主要原因。

由图 2 还可以看出,在北纬 25°附近温带分布属与热带分布属相当。在年均温 18℃,年降水量 1300 mm 和年辐射 4,500 MJ 处,温带分布属和热带分布属的比例相当。这些平衡值可能分别是热带植物适应温带气候的生物学阈值,这可能对常绿阔叶林向落叶阔叶林的演化起到决定性的作用。

### 参 考 文 献

- 李锡文. 1994. 中国特有种子植物属在云南的两大生物多样性中心及其特征. 云南植物研究, **16**: 221-227.
- 刘明光主编. 1998. 中国自然地理图集(第二版). 北京: 中国地图出版社.
- 王荷生主编. 1992. 植物区系地理. 北京: 科学出版社.
- 王荷生. 1985. 中国种子植物特有属的数量分析. 植物分类学报, **23**: 241-258.
- 王荷生. 1989. 中国种子植物特有属起源的探讨. 云南植物研究, **11**: 1-16.
- 吴征镒, 周哲昆, 孙航, 李德铢, 彭华主编. 2006. 种子植物分布类型及其起源和分化. 昆明: 云南科技出版社.
- 吴征镒主编. 1980. 中国植被. 北京: 科学出版社.
- 杨亲二, 左家哺. 1998. 高等植物的特有现象及其研究方法. 见: 宋延龄, 杨亲二, 黄永青(主编). 物种多样性研究与保护. 杭州: 浙江科学技术出版社, 79-87.
- 应俊生, 张玉龙. 1994. 中国种子植物特有属. 北京: 科学出版社.
- 应俊生, 张志松. 1984. 中国植物区系中的特有现象——特有属的研究. 植物分类学报, **22**: 259-268.
- 应俊生. 1996. 中国种子植物特有属的分布区学研究. 植物分类学报, **34**: 479-485.
- 于贵瑞, 何洪林, 刘新安, 牛栋, 王秋凤, 任传友, 李正泉主编. 2004. 中国陆地生态系统空间化信息研究图集——气候要素分卷. 北京: 气象出版社.
- Axelrod D I, Al-Shehbaz I, and Raven P H. 1996. History of the modern flora of China. In Zhang, A. L. and Wu S G, eds. *Floristic Characteristics and Diversity of East Asian Plants*. Beijing: China Higher Education Press, 43-55.
- ESRI. 2004. ArcGIS 9.0. New York: ESRI Press.
- Graham A. 1999. *Late Cretaceous and Cenozoic History of North American Vegetation, North of Mexico*. New York: Oxford University Press.
- Hamilton A C. 1976. The significance of patterns of distribution shown by forest plants and animals in Tropical Africa for the reconstruction of upper Pleistocene palaeoenvironments: A review. *Paleoecology of Africa*, **9**: 63-97.
- Huang J, Chen J, Ying J, and Ma K. 2011. Features and distribution patterns of Chinese endemic seed plant species. *Journal of Systematics and Evolution*, **49**: 81-94.
- Latham R E and Ricklefs R E. 1993. Continental comparisons of temperate-zone tree species diversity. In Ricklefs R E and Schlüter D, eds. *Species Diversity in Ecological Communities: Historical and Geographical Perspectives*. Chicago: University of Chicago Press, 294-314.
- Legendre P and Legendre L. 1998. *Numerical Ecology*. Amsterdam: Elsevier.

- Leopold E B and MacGinitie H D. 1972. Development and affinities of Tertiary floras in the Rocky Mountains. In Graham A. ed. *Floristics and Paleofloristics of Asia and Eastern North America*. Amsterdam: Elsevier, 147-200.
- Lomolino M V, Riddle B R, and Brown J H. 2006. *Biogeography 3rd edn*. Massachusetts: Sinauer Associates.
- Lovett J C and Friis I. 1996. Patterns of endemism in the woody flora of north-east and east Africa. In Van der Maesen L J G, van der Burgt X M and van Medenbach de Rooy J M, eds. *The Biodiversity of Africa Plants*. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 582-601.
- Pielou E C. 1991. *After the Ice Age*. Chicago: University of Chicago Press.
- Qian H, Song J, Krestov P, Guo Q F, Wu Z M, Shen X S, and Guo X S. 2003. Large-scale phytogeographical patterns in East Asia in relation to latitudinal and climatic gradients. *Journal of Biogeography*, **30**: 129-141.
- R Development Core Team. 2009. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- Raven P H and Axelrod D I. 1974. Angiosperm biogeography and past continental movements. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, **61**:539-673.
- Sun G, Dilcher D L, Zheng S, and Zhou Z. 1998. In search of the first flower: A Jurassic angiosperm, archaefructus, from northeast China. *Science*, **282**:1692-1695.
- Takhtajan A L. 1969. *Flowering Plants: Origin and Dispersal*. Edinburgh: Oliver & Boyd, Edinburgh.
- ter Braak C J F. 1986. Canonical Correspondence-Analysis—A new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology*, **67**:1167-1179.
- Tiffney B H. 1985a. The Eocene North Atlantic land bridge: Its importance in Tertiary and modern phytogeography of the Northern Hemisphere. *Journal of the Arnold Arboretum*, **66**:243-273.
- Tiffney B H. 1985b. Perspectives on the origin of the floristic similarity between eastern Asia and eastern North America. *Journal of the Arnold Arboretum*, **66**:73-94.
- Wolfe J A. 1975. Some aspects of plant geography of the Northern Hemisphere during the late cretaceous and tertiary. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, **62**:264-279.
- Xiang Q Y and Soltis D E. 2001. Dispersal-vicariance analyses of intercontinental disjuncts: Historical biogeographical implications for angiosperms in the Northern Hemisphere. *International Journal of Plant Sciences*, **162**:S26-S39.
- Zar J H. 1984. *Biostatistical Analysis*, 2nd edn. New Jersey: Prentice Hall.

## Phytogeographical Patterns of Genera of Endemic Seed Plants and Their Relationship with Climatic Gradients in China

HUANG Jihong<sup>1, 2</sup>, MA Keping<sup>1</sup> and YING Junsheng<sup>3</sup>

- (1. State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China;  
2. Center for Documentation and Information, Institute of Botany,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China;  
3. State Key Laboratory of Systematic and Evolutionary Botany, Institute of Botany,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

**Abstract** We divided the landmass of China into four latitudinal zones by an interval of c. 8°, and analyzed the phytogeographical patterns of the genera with Chinese endemic seed plants and detected the relationships between the plants and main climatic factors, based on the 1664 indigenous genera of Chinese endemic seed plant species grouped into fifteen geographical elements, belonging to three major categories (cosmopolitan, tropical and temperate) in 28 provinces in China. Our results showed that the proportion of the tropical genera decreased with the increase of latitude, but the proportion of the temperate genera increased, as well as a slow increase of the cosmopolitan genera. However, the decrease of the tropical genera and the increase of the temperate genera showed a slow trend from latitude 35°N to 40°N. In addition, the tropical genera and the temperate genera had the similar proportion at latitude c. 25°N. These changes of proportions about the different genera also occurred in other corresponding climate factors. We conclude that the composition of the genera with Chinese endemic seed plants is strongly related to latitude and climatic variables.

**Key words** biogeography, endemic, floristics, latitudinal gradients, seed plants