

高黎贡山种子植物物种丰富度沿海拔梯度的变化

王志恒 陈安平 朴世龙 方精云*

(北京大学环境学院生态学系, 北京大学生态学研究教育中心, 北京大学地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 物种丰富度沿海拔梯度的分布格局成为生物多样性研究的热点。为探讨中尺度区域物种丰富度沿海拔梯度的分布, 本文以高黎贡山为研究对象, 利用该地区的地方植物志资料, 结合通过 GIS 生成的区域数字高程模型 (DEM) 数据, 分析了该区域全部种子植物和乔木、灌木、草本三种生活型种子植物物种丰富度的垂直分布格局以及物种密度沿海拔梯度的变化特征。结果表明: (1) 全部种子植物和不同生活型植物物种丰富度随着海拔的升高呈现先增加后减小的趋势, 最大值出现在海拔 1500 - 2000 m 的范围; (2) 物种密度与海拔也呈现单峰曲线关系; (3) 物种丰富度和物种密度分布格局的形成主要受海拔所反映的水、热状况组合以及物种分布的边界影响。

关键词: 物种丰富度, 物种密度, 生活型, 垂直格局, 海拔梯度, 地形

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005 - 0094(2004)01 - 0082 - 07

Pattern of species richness along an altitudinal gradient on Gaoligong Mountains, Southwest China

WANG Zhi-Heng, CHEN An-Ping, PIAO Shi-Long, FANG Jing-Yun*

Department of Ecology, College of Environmental Sciences, Center for Ecological Research & Education, and Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871

Abstract: Patterns of species richness along altitudinal gradients have become a focus of ecological research. We explored the patterns of seed plants richness along an altitudinal gradient on Gaoligong Mountains, Southwest China. Information on seed plants and their distribution ranges was collected from *Flora of Gaoligong Mountains*, and the DEM (Digital Elevation Model) was derived from a topographical map of this region. Using these datasets, altitudinal patterns of richness and species density of all seed plant species and plants of three different life forms (trees, shrubs and herbaceous plants), as well as their relationship with topographic parameters were studied. The results are summarized as follows: (1) the species richness increased rapidly first and then decreased with increasing elevation, peaking at the altitudes of between 1500 m and 2000 m; (2) similar to the altitudinal pattern of species richness, species, genus and family densities (number of taxa per unit area) also showed a humped pattern along the altitudinal gradient. Species density reached a maximum between 1500 m and 2000 m, with an average of 1653 m, while genus and family densities peaked between 900 - 1500 m, with an average of 1089 m and (3) energy and moisture represented by elevation, as well as hard boundaries of species distribution were possible factors determining the patterns of species richness and density.

Key words: species richness, species density, life form, altitudinal pattern, altitudinal gradient, topography

物种丰富度 (species richness) 及其分布格局是生物多样性研究的一个重要内容 (贺金生, 马克平, 1997)。理解物种丰富度的分布格局及其影响因素

对于生物多样性保护具有指导意义, 因而一直是生态学家们感兴趣的领域。

近年来, 物种丰富度沿海拔梯度的分布格局受

* 基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (49971002 和 39830050)

收稿日期: 2003 - 06 - 12; 接受日期: 2003 - 09 - 10

作者简介: 王志恒, 男, 1978 年出生, 生态学专业硕士生, 主要研究方向为植被生态学。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jyfang@urban.pku.edu.cn

到越来越多的关注。很多研究者认为,海拔是影响物种丰富度格局的决定性因素之一(Stevens, 1992; Lieberman *et al.*, 1996; Lomolino, 2001; Brown, 2001)。研究表明,海拔对物种丰富度垂直格局的影响是随着区域位置和植物分类群的不同而存在较大差异的。例如,Whittaker & Niering (1975) 对美国亚利桑那州的 Santa Catalina 山的研究发现,物种多样性在中海拔地段最高。Ohsawa (1991, 1995) 对亚洲湿润季风区的 7 个山地的物种丰富度垂直分布格局进行了研究,并对比了热带山地和温带山地物种丰富度分布格局的差异,结果发现热带山地物种丰富度随海拔升高而迅速降低,而温带山地的物种丰富度随海拔升高的变化很小。Kessler (2000) 研究了玻利维亚的安第斯山爵床科(Acanthaceae)、天南星科(Araceae)、凤梨科(Bromeliaceae)、仙人掌科(Cactaceae)、野牡丹科(Melastomataceae)以及蕨类植物物种丰富度的垂直分布格局,发现不同分类群植物的物种丰富度随海拔升高的变化趋势是不同的,主要有三种形式:单调下降、先下降后升高(inverse hump-shaped curves)以及先升高后降低(hump-shaped curves)。在国内,沈泽昊等(2000, 2001) 对大老岭和贡嘎山的物种丰富度格局进行了研究;王国宏(2002)、江明喜等(2002) 分别对中国西北部的祁连山和中部的香溪河流域进行了研究,发现随海拔的升高,物种丰富度呈现先增大后减小,也即中海拔地区物种丰富度最高的趋势。但是,对于物种丰富度的垂直格局,目前还没有形成一致的结论(Lomolino, 2001),因此对不同区域、不同山体以及不同分类群物种丰富度分布格局的个案研究,对阐明物种丰富度与海拔的关系是十分重要的。

高黎贡山所在的横断山南段是我国 17 个具有全球意义的生物多样性关键区域之一(《中国生物多样性国情研究报告》编写组, 1998),也是全球 25 个生物多样性保护的热点(hot spots)之一(Myers *et al.*, 2000)。本研究区大部分处于该关键区范围内,同时,因其山体相对高差大,为研究生物多样性的垂直分布格局提供了良好的自然条件。详细记载植物物种分布资料的地方植物志(李恒等, 2000)的出版,使该地区植物物种多样性垂直格局的研究成为可能。本文利用高黎贡山地区的植物志资料,对该地区物种丰富度的垂直分布格局进行了初步研

究,试图揭示:(1)全部物种以及乔木、灌木和草本三种生活型物种和特有种的物种丰富度的垂直分布格局,并初步探讨影响这种分布格局的生态因子;(2)物种密度沿海拔梯度的变化趋势,以及地形等因子的作用;(3)以地方植物志为数据来源,探讨山地生物多样性规律的可能方法和思路。

1 研究区概况

高黎贡山位于中缅交界地带,地处横断山区南段,介于 24°40' - 28°30' N 和 97°30' - 99°00' E 之间,其范围是中国怒江(萨尔温江)和缅甸恩梅开江(伊洛瓦底江的上游)之间的分水山脉和山地两侧地域(李恒等, 2000)。区域北部位于中国西藏自治区境内,东部和南部位于云南省境内,而西部位于缅甸北部的克钦邦境内,行政区域包括我国云南龙陵县北部、腾冲县全境,保山、泸水、福贡、贡山县的西部、察隅南部以及缅甸北部克钦邦(李恒等, 2000),总面积有 35 452 km²(图 1)。

受来自印度洋的西南季风的影响,高黎贡山地区在总体上属于季风气候类型,但南北部差异较明显:南部地区具有明显的干湿季,而北部地区四季的降水分配较均匀(图 1)。区域内地形起伏剧烈,多高山深谷,有很多 4000 m 以上的高山,同时孕育了平均深度达 2000 m 的世界第二大峡谷——怒江大峡谷,这些高山深谷成了物种传播和交流的天然障碍,对高黎贡山地区的植物区系的形成和发展有巨大的作用。

高黎贡山物种资源丰富,区域内共有种子植物 4294 种,隶属于 201 科 1103 属,其中乡土植物 4187 种,隶属于 193 科 1050 属;栽培植物 107 种,隶属于 50 科 92 属(表 1)。

种子植物的各科中以兰科(Orchidaceae)的物种丰富度最高(李恒, Bruce, 1999),有 264 种 74 属,这与中国大部分地区以禾本科和菊科物种丰富度最高相比具有明显的特色。

高黎贡山特有种(endemic species,在本文中指分布仅限于高黎贡山这一自然单元内的植物种)非常丰富,共有 434 种,隶属于 88 科 205 属,其中以杜鹃花科(Ericaceae)种数最多,达 50 种。

由于相对高差大且基带纬度低,区域内发育了完整的垂直植被带谱,自下而上依次是热带季雨林

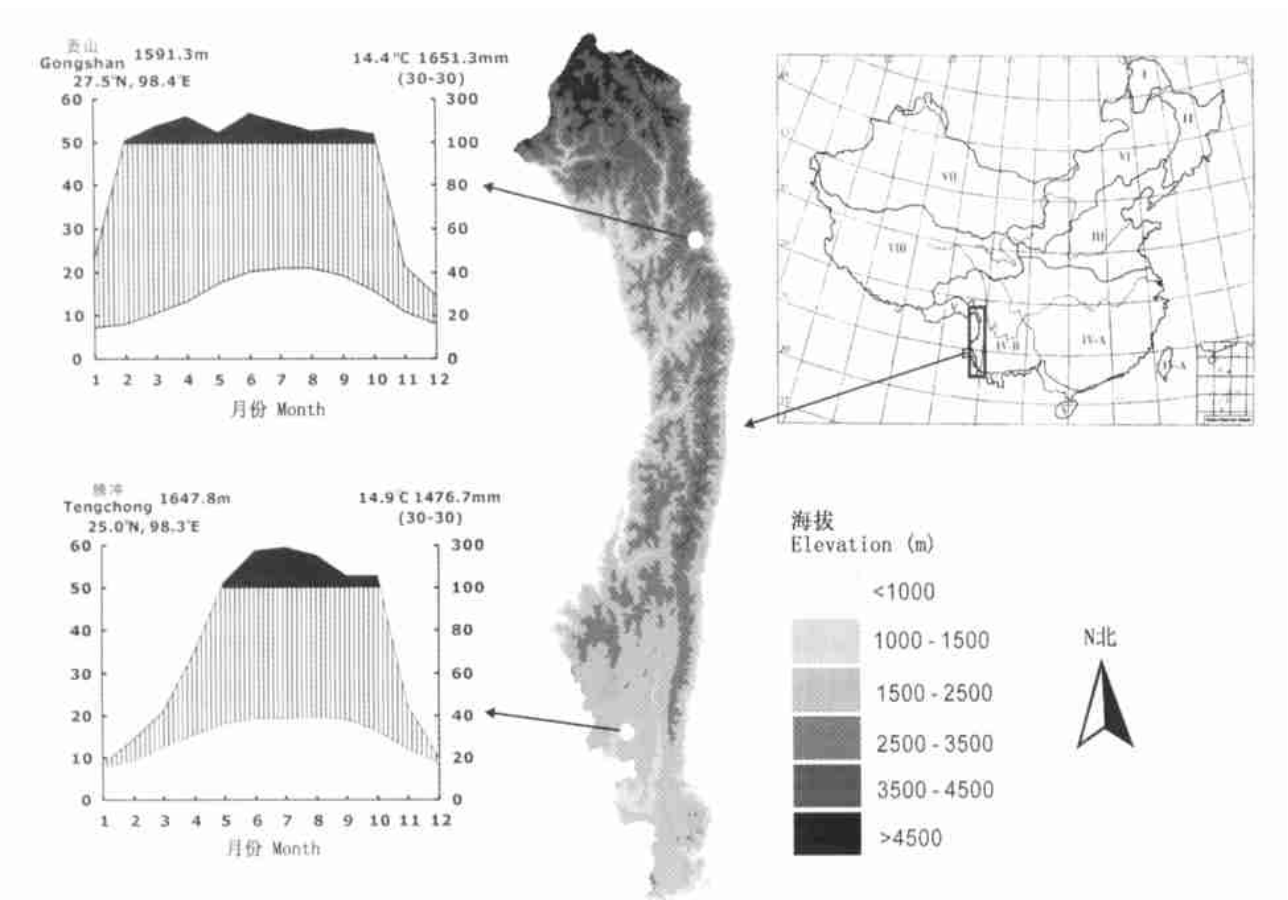


图 1 高黎贡山的位置、地形和生态气候图
Fig. 1 Location, topography and climate diagrams of Gaoligong Mountains
I: 寒温带针叶林区域; II: 温带针阔叶混交林区域; III: 暖温带落叶阔叶林区域; IV: 亚热带常绿阔叶林区域; V: 热带季雨林、雨林区域; VI: 温带草原区域; VII: 温带荒漠区域; VIII: 青藏高原高寒植被区域 (区划方案根据中国植被图编辑委员会, 2001)
I, cold temperate needleleaf forest region; II, temperate needleleaf and broadleaf forest region; III, warm temperate deciduous broadleaf forest region; IV, subtropical evergreen broadleaf forest region; V, tropical monsoon forest and rain forest region; VI, temperate steppe region; VII, temperate desert region; VIII, Qinghai-Xizang Plateau high-cold vegetation region (Based on Editorial Board of Vegetation Map of China, 2001)

表 1 高黎贡山种子植物物种的组成 *
Table 1 Composition of seed plants in Gaoligong Mountains

	乡土植物 Native plants	栽培植物 Cultivated plants	总计 Total
科数 No. of families	193	50	201
属数 No. of genera	1050	92	1103
种数 No. of species	4187	107	4294
裸子植物 Gymnosperm	31	2	33
双子叶植物 Dicotyledon	3314	75	3389
单子叶植物 Monocotyledon	842	30	872

*据李恒等(2000)整理 Based on *Flora of Gaoligong Mountains* (Li et al., 2000)

带、亚热带常绿阔叶林带(包括季风常绿阔叶林、湿性常绿阔叶林、半湿性常绿阔叶林、中山湿性常绿阔叶林)、落叶阔叶林、针叶林、灌丛、草丛和草甸植被, 其中亚热带常绿阔叶林是其地带性植被类型(李恒等,2000)。

2 资料来源与分析方法

2.1 资料来源

植物物种以及各种植物分布的海拔范围资料是本研究的基础,这些数据主要来自《高黎贡山植物》(李恒等,2000)。

利用研究区的 DEM(Digital Elevation Model)来表现研究区内的地形特征。所使用的 DEM 来自于根据中国 1:1 000 000 地形图建立的全国范围的 DEM,分辨率为 0.5 km ×0.5 km。

2.2 分析方法

2.2.1 物种信息数据库的建立

根据《高黎贡山植物》(李恒等,2000)中提供的高黎贡山地区种子植物名录,将每种植物的相关信息,包括其种名和所属科、属的名称、生活型(乔木/灌木/草本)、分布海拔范围、是否为本地区系植物、是否为特有种等信息,输入计算机中建立数据库。

2.2.2 地形特征的计算

首先,将高黎贡山地区由低到高分成若干个海拔段。分段时尽量均匀,基本上以每 500 m 为一个海拔段。由于区域内低海拔地区只存在于少数河谷地带,面积很小,因此将 600 m 以下地区作为一个海拔段,虽然区域内最高海拔在 5000 m 以上,不过由于这些高海拔地区面积较小,同时海拔 4600 m 以上的物种数量很少,因而将 4600 m 以上作为一个海拔段。分段情况见表 2。

然后,利用 DEM 计算各个海拔段的面积(投影面积)以及平均海拔。其中,面积的计算是根据各个海拔段的海拔范围,利用 GIS 软件对区域 DEM 进行插值运算,得到各个海拔段的象元数,再利用象元

数与每个象元代表的实际陆地面积相乘而得到每一个海拔段的实际面积。

2.2.3 物种丰富度沿海拔梯度的变化

根据上述每一海拔段的海拔范围以及每种植物分布的海拔范围,统计每一个海拔段内种子植物的科、属、种的数量以及乔木、灌木、草本三种不同生活型植物的种数。

2.2.4 物种密度沿海拔梯度的变化

一个地区的物种丰富度受该地区面积的影响很大(Arrhenius,1921; MacArthur & Wilson, 1963; He *et al.*,1996)。为了消除这种面积的影响,使用下式计算物种密度(species density)(Qian, 1998):

$$D = S / \ln A$$

其中,*D* 为物种密度,*S* 为区域内物种丰富度,*A* 为区域面积。与此相类似,还计算了属的密度(genus density)和科的密度(family density)。有研究表明,在 30°N 以北,物种密度由高纬度向低纬度呈现逐步增加的趋势,并发现物种密度的分布格局与地形有密切关系(Körner, 2000)。本文根据各海拔段的物种数量以及相应的面积,计算高黎贡山各个海拔段的物种密度(包括属的密度和科的密度),并依此研究物种密度沿海拔梯度的变化。

3 结果与讨论

3.1 地形沿海拔梯度的变化

在本文中,用不同海拔段的面积和平均海拔来描述区域的地形特征。各个海拔段的面积随海拔梯度的变化如图 2 所示。可以看出,区域的面积随着海拔的升高呈现先增大后减小的趋势,其中在海拔 2000 - 2500 m 的地段(平均海拔为 2184 m)面积最大。

3.2 分类群丰富度沿海拔梯度的变化

图 3 显示了区域内各个海拔段的分类群丰富度沿海拔梯度的变化趋势。分类群的丰富度分别在科、属和种三个水平上衡量。可以看出,在低海拔地区,随海拔升高,三个分类群的丰富度都是先迅速增大,后缓慢下降。也就是说,中海拔地区(1500 - 2000 m,平均海拔为 1653 m)的分类群丰富度最高。出现最大值的海拔段的植被类型是该地区的地带性植被——亚热带常绿阔叶林(主要分布在海拔 2500 m 以下)。这一地段并不是区域内面积最大的海拔段,说明分类群丰富度并不只受区域面积的影响,其他因素也影响物种丰富度的大小。

表 2 区域内各个海拔段的海拔范围
Table 2 Altitudinal ranges divided in the study area

序号 No.	海拔范围 Altitudinal range (m)
1	< 600
2	600 - 900
3	900 - 1500
4	1500 - 2000
5	2000 - 2500
6	2500 - 3000
7	3000 - 3500
8	3500 - 4000
9	4000 - 4600
10	> 4600

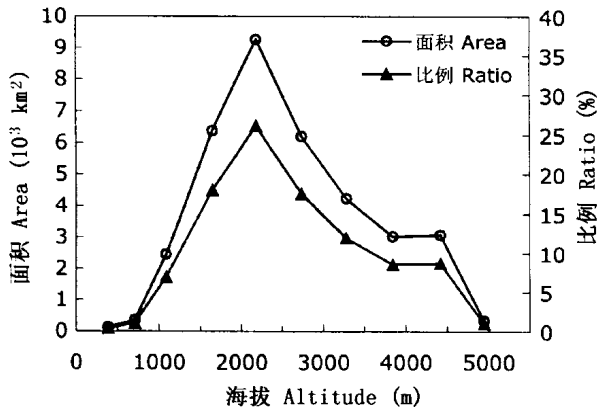


图2 高黎贡山不同海拔段的面积及其所占总面积的比例随海拔的变化

Fig. 2 Area and its proportion of different altitude ranges on the Gaoligong Mountains

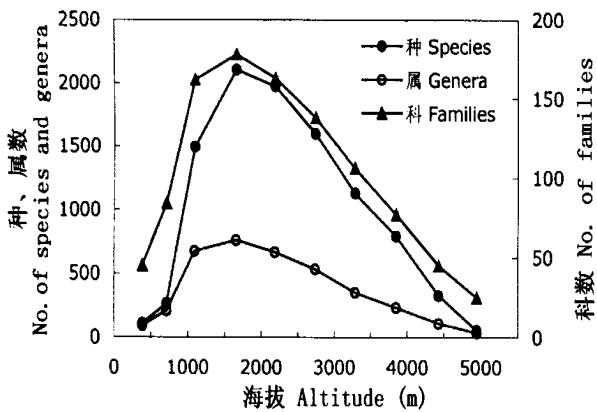


图3 科、属、种丰富度随海拔梯度的变化

Fig. 3 Patterns of family, genus and species richness along an altitudinal gradient

3.3 不同生活型植物的物种丰富度沿海拔梯度的变化

研究表明,不同生活型植物对海拔的敏感程度不同,因而其物种丰富度可能具有不同的海拔梯度格局 (Hamilton & Perrott, 1981; Wang *et al.*, 2002)。图 4a 反映了乔木、灌木和草本三种不同生活型植物的物种丰富度沿海拔梯度的变化趋势。可以看出,随着海拔的升高,乔木、灌木和草本植物物种丰富度的变化趋势是相同的,这与 Hamilton & Perrott (1981) 的研究结果不同。随着海拔的升高,三种生活型植物的物种丰富度均呈现先增大后减小的趋势,最高值出现在海拔 1500 - 2000 m (平均海拔 1653 m) 的地段,偏向于低海拔地区,也即物种丰富度与海拔呈偏峰曲线关系。这与高黎贡山地区植物总体的物种丰富度沿海拔梯度的分布格局是一致

的。图 4b 是各个海拔段范围内,乔、灌、草三种生活型植物的种数占该海拔段植物总数的比例沿海拔梯度的变化趋势。可以看到,在各个海拔段,草本植物种数所占的比例均是最高,其次是灌木植物,乔木植物种数所占比例最低。三种不同生活型植物所占比例沿海拔梯度的变化趋势都可以分成两个部分:在海拔低于 2500 m 的区域,三种生活型植物的比例随海拔升高的变化不大;而在高于 2500 m 的区域,随着海拔的升高,草本植物所占的比例逐渐上升,而灌木和乔木植物所占的比例逐渐下降,到了最高的海拔段(即海拔 4600 m 以上)乔木植物所占比例已经降到 0。三种生活型植物所占比例的这种变化与区域内的植被垂直带谱的变化是相对应的:在海拔 3000 m 以下,主要是亚热带常绿阔叶林和落叶阔叶林,部分为针叶林和热带季雨林以及灌丛和草丛植被;而在海拔 3000 m 以上地区,高山、亚高山草甸开始大量出现,而森林植被和灌丛植被逐渐减少(但还有部分地段为寒温性针叶林、桦木林或寒温性阔叶灌丛植被)。因此,随海拔升高,形成草本植物比例逐渐升高而乔木和灌木比例逐渐降低的格局。

3.4 分类群密度沿海拔梯度的变化

为了消除面积效应对于物种丰富度分布格局的影响,本文中使用了分类群密度,包括种的密度、属的密度以及科的密度指标。计算结果显示,各个海拔段种、属和科的密度随着海拔梯度的变化呈现出相同的分布格局,也即随着海拔的升高,三个水平的密度在总体上均呈现先上升后下降的趋势,并且最高值出现的位置偏向于低海拔,也即物种密度与海拔呈现偏峰关系(图 5)。其中,种和属密度的最高值出现在 1500 - 2000 m (平均海拔 1653 m) 的海拔段;而科密度的最高值出现在 900 - 1500 m 的海拔段。

3.5 植物分布格局的解释

人们很早就观察到了海拔因素对物种丰富度分布格局的影响,不过这一问题至今仍未有形成普遍接受的结论。尽管许多研究表明中海拔水平拥有最高的物种丰富度 (Gentry, 1988; Lieberman *et al.*, 1996),但也有一些研究表明物种丰富度与海拔梯度呈现负相关或者物种丰富度随海拔的升高没有明显变化 (Ohsawa, 1991, 1995)。在本文中,物种丰富度(在全部物种以及不同生活型物种水平上)随海

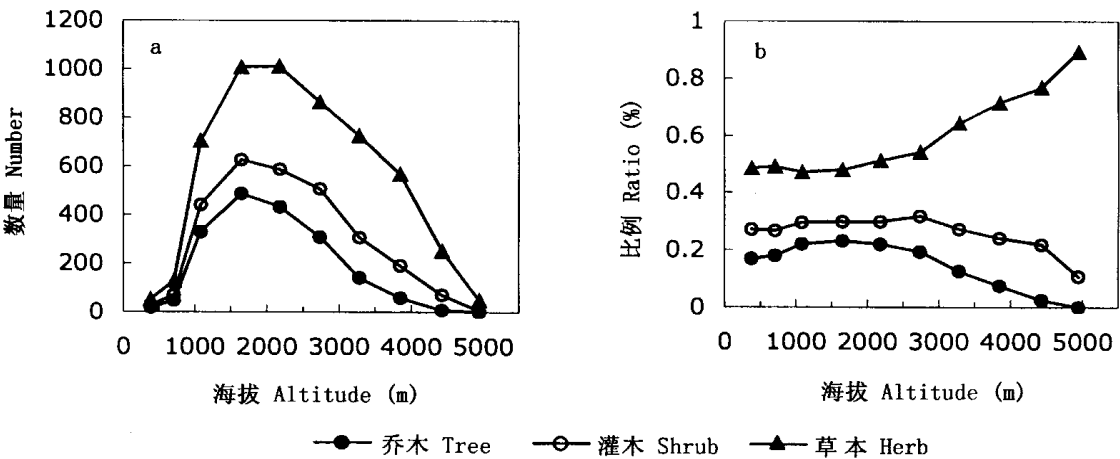


图 4 乔、灌、草三种生活型植物物种丰富度及其所占比例沿海拔梯度的变化
Fig. 4 Changes in richness and ratio of trees, shrubs and herbs along an altitudinal gradient

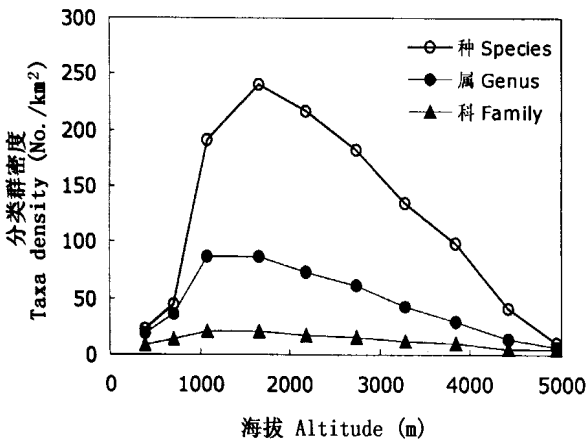


图 5 科、属、种密度沿海拔梯度的变化
Fig. 5 Changes in density of family, genus and species along an altitudinal gradient

拔的升高呈现偏峰曲线关系,也即中海拔物种丰富度水平最高(图 3、4)。科、属水平的丰富度也显示了相同的趋势(图 3)。科、属、种的密度也随海拔的升高呈偏峰曲线关系(图 5)。海拔梯度实际上反映了水热状况的梯度变化(Marrs *et al.*, 1988),因此海拔的影响实际反映了气候因子的综合影响(Whittaker, 1960)。很多情况下,在低海拔地段,植物生长季节时所需热量充足而水分常常不足;在高海拔地段,水分充足而热量可能成为植物分布的限制因子。相对于低海拔和高海拔,在中海拔地段可能是热量和水分组合最好的生境,从而使得资源的可利用率较高(王国宏, 2002)。高黎贡山地区相对高差很大,上述现象表现得非常明显,这可能是中海拔地区

科、属、种数量和密度最高的原因之一。

导致物种丰富度和物种密度与海拔呈现偏峰关系的另一个可能原因是物种的分布存在一个不可逾越的边界(hard boundary)(Colwell & Lees, 2000)。在山区,物种的分布存在上、下两个边界,上界一般是指由于温度、降水或海拔不够高等条件形成的限制物种进一步向高处分布的界线,而下界一般是由于山地的基带限制了物种进一步向下分布形成的。一般情况下,边界地区物种丰富度会降低。Grytnes & Vetaas(2002)对喜马拉雅山地区物种丰富度沿海拔梯度的格局进行了研究,并且通过模型模拟发现,物种分布的边界对于物种丰富度与海拔之间的偏峰曲线关系的形成具有重要的作用。植物分布的这种边界在高黎贡山地区也同样存在的,这可能也是造成高黎贡山地区物种丰富度和物种密度与海拔之间呈现偏峰曲线关系的一个原因。

4 结论

以上分析结果表明,高黎贡山植物多样性的垂直分布格局具有以下特征:

- (1) 高黎贡山地区全部种子植物的物种丰富度以及乔、灌、草三种生活型植物物种丰富度沿海拔梯度的分布格局具有相同的特征,均与海拔之间呈现偏峰曲线关系,其最大值均出现在海拔 1500 - 2000 m 之间。
- (2) 随海拔的升高,物种密度先增大后减小,最大值出现的位置偏向于低海拔,也即物种密度与海

拔呈现偏峰曲线关系。

(3) 物种丰富度和物种密度垂直分布格局的形成与海拔所反映的水、热状况以及物种分布的界限(hard boundary)有关。

参考文献

- Arrhenius, O. 1921. Species and area. *Journal of Ecology*, **9** (1): 95 - 99.
- Brown, J. H. 2001. Mammals on mountain sides: elevational patterns of diversity. *Global Ecology and Biogeography*, **10**: 101 - 109.
- Colwell, R. K. and Lees, D. C. 2000. The mid-domain effect: geometric constraints on the geography of species richness. *Trends in Ecology and Evolution*, **15**: 70 - 76.
- Editorial Board of Vegetation Map of China (中国植被图编辑委员会). 2001. Vegetation Atlas of China (中国植被图集). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Gentry, A. H. 1988. Changes in plant community diversity floristic composition on environmental and geographical gradients. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, **75**: 1 - 34.
- Grytnes, J. A. and Vetaas, O. R. 2002. Species richness and altitude: a comparison between Null Models and interpolated plant species richness along the Himalayan altitudinal gradient, Nepal. *American Naturalist*, **159**: 294 - 304.
- Hamilton, A. C. and Perrott, R. A. 1981. A study of altitudinal zonation in the montane forest belt of Mt. Elgon, Kenya/Uganda. *Vegetatio*, **45**: 107 - 125.
- He, F., Legendre, P. and LaFrankie, J. V. 1996. Spatial pattern of diversity in a tropical rain forest in Malaysia. *Journal of Biogeography*, **23**: 57 - 74.
- He, J. S. (贺金生) and Ma, K. P. (马克平). 1997. Species diversity. In: Jiang, Z. G. (蒋志刚), Ma, K. P. (马克平) and Han, X. G. (韩兴国) (eds.), *Conservation Biology (保护生物学)*. Zhejiang Science and Technology Press, Hangzhou, 20 - 33. (in Chinese)
- Jiang, M. X. (江明喜), Deng, H. B. (邓红兵), Tang, T. (唐涛) and Cai, Q. H. (蔡庆华). 2002. On spatial pattern of species richness in plant communities along riparian zone in Xiangxi River watershed. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, **22** (5): 629 - 635. (in Chinese)
- Kessler, M. 2000. Elevational gradients in species richness and endemism of selected plant groups in the central Bolivian Andes. *Plant Ecology*, **149**: 181 - 193.
- Korner, C. 2000. Why are there global gradients in species richness? Mountains might hold the answer. *Trends in Ecology & Evolution*, **15**: 513 - 514.
- Li, H. (李恒), Guo, H. J. (郭辉军) and Dao, Z. L. (刀志灵). 2000. *Flora of Gaoligong Mountains (高黎贡山植物)*. Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Li, H. (李恒) and Bruce, B. 1999. The diversity of Orchidaceae in Gaoligong Mountains, Yunnan. *Acta Botanica Yunnanica (云南植物研究)*, **6** (Suppl.): 65 - 78. (in Chinese)
- Lieberman, D., Lieberman, M., Peralta, R. and Hartshorn, G. 1996. Tropical forest structure and composition on a large scale altitudinal gradient in Costa Rica. *Journal of Ecology*, **84**: 137 - 152.
- Lomolino, M. V. 2001. Elevational gradients of species-density: historical and prospective views. *Global Ecology & Biogeography*, **10**: 3 - 13.
- MacArthur, H. R. and Wilson, O. E. 1963. An equilibrium theory of insular zoogeography. *Evolution*, **37**: 373 - 387.
- Marrs, R. H., Proctor, J., Heaney, A. and Mountfied, M. D. 1988. Changes in soils, nitrogen mineralization and nitrification along an altitudinal transect in tropical rain forest in Costa Rica. *Journal of Ecology*, **76**: 466 - 482.
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., Fonseca, G. A. B. and Kent, J. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, **403**: 853 - 858.
- Ohsawa, M. 1991. Structural comparison of tropical montane rain forests along latitudinal and altitudinal gradients in South and East Asia. *Vegetatio*, **97**: 1 - 10.
- Ohsawa, M. 1995. Latitudinal comparison of altitudinal changes in forest structure, leaf-type, and species richness in humid monsoon Asia. *Vegetatio*, **121**: 3 - 10.
- Qian, H. 1998. Large-scale biogeographic patterns of vascular plant richness in North America: an analysis at the genera level. *Journal of Biogeography*, **25**: 829 - 836.
- Shen, Z. H. (沈泽昊), Fang, J. Y. (方精云), Liu, Z. L. (刘增力) and Wu, J. (伍杰). 2001. Patterns of biodiversity along the vertical vegetation spectrum of the east aspect of Gongga Mountain. *Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报)*, **25** (6): 721 - 732. (in Chinese)
- Shen, Z. H. (沈泽昊), Zhang, X. S. (张新时) and Jin, Y. X. (金义兴). 2000. Spatial pattern analysis and topographical interpretation of species diversity in the forests of Dalaoling in the region of the Three Gorges. *Acta Botanica Sinica (植物学报)*, **42** (6): 620 - 627. (in Chinese)
- Stevens, G. C. 1992. The elevational gradient in altitudinal range: an extension of Rapoport's latitudinal rule to altitude. *American Naturalist*, **140**: 893 - 911.
- The Compilation Group of China's biodiversity (《中国生物多样性国情研究报告》编写组). 1998. *China's Biodiversity: A Country Study (中国生物多样性国情研究报告)*. China Environmental Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Wang, G. H. (王国宏). 2002. Species diversity of plant communities along an altitudinal gradient in the middle section of northern slope of Qilian Mountains, Zhangye, Gansu, China. *Biodiversity Science (生物多样性)*, **10** (1): 7 - 14. (in Chinese)
- Wang, G. H., Zhou, G. S., Yang, L. M. and Li, Z. Q. 2002. Distribution, species diversity and life-form spectra of plant communities along an altitudinal gradient in the northern slopes of Qilianshan Mountains, Gansu, China. *Plant Ecology*, **165**: 169 - 181.
- Whittaker, R. H. and Niering, W. A. 1975. Vegetation of the Santa Catalina Mountains, Arizona. V. Biomass, production and biodiversity along an elevational gradient. *Ecology*, **56**: 771 - 790.
- Whittaker, R. H. 1960. Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California. *Ecological Monographs*, **30** (3): 279 - 338.

(责任编辑: 时意专)