

车八岭山地常绿阔叶林群落结构特征 与微地形条件的关系

马旭东¹, 张苏峻², 苏志尧^{1,*}, 区余端¹, 刘刚¹

(1. 华南农业大学林学院, 广州 510642; 2. 广东省生态公益林管理中心, 广州 510173)

摘要:以车八岭国家级自然保护区南亚热带常绿阔叶林 2 hm²样地调查数据为基础, 根据样方排列、海拔梯度变化及水分梯度理论潜在值从低到高的趋势将样地划分为 5 条样带, 在由山脊至山谷的微地形变化范围内对群落结构进行全面分析, 探讨群落内部结构变化规律及其影响因子。研究结果表明, 海拔、坡位、坡向、坡度等山地微地形条件对群落结构及物种分布影响显著。从山脊至谷底变化过程中, 各样带平均树高、平均胸径以及较大高度级和胸径级的物种个体比例减少, 物种多样性呈现增加趋势。多响应置换过程(MRPP)分析表明各样带之间物种组成存在极显著差异($P < 0.0001$), 且样带主要物种及密度发生明显变化。通过物种与地形因子的典范对应分析(CCA)知, 在同一区域内, 物种随地形因子表现出不同的分布趋势, 米锥(*Castanopsis carlesii*)、甜锥(*Castanopsis eyrei*)、石栎(*Lithocarpus glaber*)等喜光的阳性树种在上坡位分布较多, 枫香(*Liquidambar formosana*)、樟叶槭(*Acer cinnamomifolium*)等喜温暖湿润气候的物种则在下坡位样带为优势物种。揭示了山地常绿阔叶林群落特征对微地形变化的响应, 对于区域生物多样性保护和植被恢复具有重要的理论和实践意义。

关键词:车八岭国家级自然保护区; 微地形; 群落结构; 多响应置换过程(MRPP); 典范对应分析(CCA)

Community structure in relation to microtopography in a montane evergreen broadleaved forest in Chebaling National Nature Reserve

MA Xudong¹, ZHANG Sujun², SU Zhiyao¹, OU Yudian¹, LIU Gang¹

1 College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2 Guangdong Administrative Center for Non-commercial Ecological Forests, Guangzhou 510173, China

Abstract: Microtopographic factors have a great effect on species composition and diversity patterns of forest communities. Understanding the relationship between microtopographic factors and species patterns will have significant implications for forest conservation and sustainable management. Based on field data collected within a 2-hm² permanent plot (50 subplots) in the lower subtropical evergreen broadleaved forest in Chebaling National Nature Reserve, Guangdong, China, variations in community structure in response to microtopographic changes were analyzed in five transects from the ridge to the valley that were divided according to sample plot layout, elevational difference, and moisture potential gradient. With contiguous grid quadrat sampling method, species were censused by height, abundance, and percent cover for the understory layer and by height and diameter at breast height (DBH) for the tree layer. Microtopographic attributes including elevation, slope position, aspect and slope degree were also recorded on a subplot basis. The results showed that microtopographic factors had a strong influence on community structure and species distribution. Transect-based mean height and DBH and the proportion of individuals belonging to larger height and DBH class decreased from the ridge to the valley, while species diversity increased gradually. Multi-response permutation procedures (MRPP) indicated that species composition among various transects varied significantly ($P < 0.0001$), and the presence of dominant species and their density also differed greatly. Although tree density varied, both *Castanopsis carlesii* and *Styrax suberifolia* were dominant species on all transects.

基金项目:广东省 2009 年度“森林生态科技研究和推广”项目; 广东省科技计划项目(2008A020100013)

收稿日期:2010-02-08; **修订日期:**2010-07-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zysu@scau.edu.cn

Canonical correspondence analysis(CCA) further confirmed that species had an obvious distribution trend with topographic condition. Photophilous species including *Castanopsis carlesii*, *Castanopsis eyrei*, and *Lithocarpus glaber* tended to distribute on the upslope, while species adapting to warm and humid habitats such as *Liquidambar formosana*, and *Neolitsea chuii* became dominant on the valley transects. The *Castanopsis eyrei* distribution reflected habitat conditions of a higher elevation, whereas the position of *Liquidambar formosana* and *Acer cinnamomifolium* in the CCA ordination diagram had an obvious shorter distance to the centroid of downslope. Species including *Castanopsis carlesii* and *Styrax suberifolia*, which were widely distributed in the sample plots, occupied important positions in the center of the diagram, indicating the variation in distribution was not obvious with the change of environmental gradient. This study elaborated the response of community composition and structure of a montane evergreen broadleaved forest to microtopographic changes, and will have significant implications both theoretically and in practice for regional biodiversity conservation and vegetation restoration.

Key Words: Chebaling National Nature Reserve; microtopography; community structure; multi-response permutation procedures (MRPP); canonical correspondence analysis (CCA)

探讨物种丰富度和生物多样性的时空分布格局及其成因,分析群落组成和环境因子间关系并揭示这种关系的生态学意义,是群落生态学研究的主要问题和目的之一^[1-3]。对植物群落多样性的研究有助于进一步了解某区域生物多样性的空间分布特征,从而为制定区域生物多样性保护对策提供理论依据^[4]。大量研究表明,物种分布及其多样性格局受多种因素影响,包括经纬度^[5]、海拔^[6]、样地所在的地形如坡度与坡向^[7-9]、群落所处的演替阶段^[8]等。

在某一气候区域内,地形是影响植被分布格局的最重要因素^[10]。地形是一个包括海拔、坡向、坡度等的多维变量,但植物分布的空间梯度并不限于海拔一方面^[11],尤其是在山地群落中,物种分布格局与微地形因子密切相关^[7,10]。山地地形控制了太阳辐射和降水的空间再分配,即使在极有限区域内也会对风、雪、降水等气候因子造成明显影响,改变土壤厚度和养分的分布,进而造成环境条件的异质性^[12-13]。目前,在群落和景观尺度上,地形因子对植物分布的作用已引起广泛的关注。目前的研究多是集中在不同海拔或群落设置多个样地分析地形因子对群落结构的影响^[2,14-15],而对于较小海拔变化梯度范围内群落内部物种组成及多样性差异变化的研究并不多见。

我国亚热带常绿阔叶林群落类型丰富,生物多样性较高,对保护环境、维持全球性碳循环平衡和人类可持续发展都具有极其重要的作用^[16]。车八岭国家级自然保护区位于广东省东北部的始兴县,是南亚热带边缘面积较大、分布较集中、保护较完整的中亚热带常绿阔叶林^[17-18]。本文以在该保护区内米锥群落设置的 2 hm²样地为基础,对其群落结构进行深入分析,在由山脊至谷底的小梯度范围内探讨群落结构变化规律及影响因子,为保护区乃至区域性植被群落恢复和物种多样性保护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

车八岭国家级自然保护区地处广东省东北部(114°09'04"—14°16'46"E, 24°40'29"—24°46' 21"N), 面积 7 545 hm²。地质构造上属华南褶皱系,地势西北高东南低,最高峰天平架海拔 1 256 m,最低处樟栋水海拔 330 m。该地区属亚热带季风型气候区,全年热量充分,冷暖交替明显,年平均气温 19.6 °C,年平均降水量 1 500 mm^[17]。保护区地质构造复杂,地貌类型多样,土壤深厚肥沃,平均土厚深 80—100 cm^[18],基带土壤为红壤。地带性典型植被为亚热带常绿阔叶林,动植物资源丰富,是南岭南缘保存较完整且原生性较强的中亚热带常绿阔叶林^[17]。

1.2 样地设计及调查

2009 年 8 月,在车八岭自然保护区山地常绿阔叶林群落内设置面积为 2 hm²的固定样地。该群落所在山体海拔 497 m,位于自然保护区核心区域,人为干扰少,植被原生性较强。样地从山体的脊处延伸至谷底,垂

直梯度变化在 100 m 以内,谷底有溪流经过。在调查时,将样地划分为 50 个 20 m × 20 m 的样方,根据山体走势在同一海拔梯度设置 7—12 个样方不等,共计 5 个梯度。采用相邻格子法进行调查,记录每个样方的海拔、坡度、坡向、坡位以及群落郁闭度等,对样地内胸径 1.0 cm 以上的乔木进行每木检尺,记录植物种名、胸径、树高等。由于山地树高准确测量难度较大,高度以目测为主,调查前先用树高测量仪在样地不同地点选取高度不等的树木进行测量,获取准确高度数据以作为调查人员目测的参考标准。

1.3 数据统计与分析

在进行数据处理时,根据样方排列、海拔梯度变化及水分梯度理论潜在值从低到高的趋势^[19],将海拔相同的样方归为一条样带,共划分为 5 条,从山脊至谷底依次为 I, II, III, IV, V, 以样带为基础进行各项数据分析。

1.3.1 重要值计算

$$\text{重要值 } IV = (\text{相对密度} + \text{相对频度} + \text{相对优势度}) / 3$$

1.3.2 物种多样性指数

群落物种多样性采用丰富度指数 S (即物种数)、均匀度指数 E 和多样性指数 H ^[20-21]:

$$\text{Shannon-Weiner 多样性指数} \quad H = - \sum (P_i \times \ln P_i)$$

$$\text{Pielou 均匀度指数} \quad E = H / \ln S$$

式中, S 为物种数, P_i 是样本中属于 i 种的所有个体占总个体数的比例。各样带群落物种多样性是否存在差异采用 Kruskal-Wallis 检验和 ANOVA 分析。

1.3.3 多响应置换过程分析

群落样带之间物种组成的差异性采用多响应置换过程 (multi-response permutation procedures, MRPP) 分析进行检验^[12]。MRPP 是一个用于两组或者多个多元数据矩阵差异性分析的非参数程序,不要求数据的正态分布和方差齐性,在群落生态学研究备受推崇^[22-23]。本研究以样带为标准进行组别划分,用欧氏距离系数计算距离矩阵。

1.3.4 典范对应分析

通过典范对应分析 (canonical correspondence analysis, CCA) 对物种与环境因子的关系进行排序,用蒙特卡罗 (Monte Carlo) 检验度量各个环境变量与物种之间关系是否显著。在进行 CCA 作图时,坡度与海拔等连续环境变量用带有箭头的实线表示,箭头连线与排序轴的夹角表示该环境因子与排序轴相关性的大小,箭头所指的方向为该因子的发展趋势。坡位与坡向为非连续变量,不同梯度以其分布中心质点表示^[24]。将坡位分为 3 个等级:上坡位,中坡位和下坡位,鉴于样地坡向在 EN-E-ES 范围内变化较小,将其概分为东北 (EN),东 (E) 和东南 (ES) 3 个方向。

使用软件 PC-ORD 5.0 完成物种重要值、多样性指数计算以及 MRPP 分析,Statistica 7.0 进行方差分析,Canoco For Windows 4.5 进行典范对应分析。

2 结果与分析

2.1 各样带群落树高与胸径变化

对各样带群落结构进行比较 (表 1), 可知由山脊至谷底样带乔木层密度无明显变化,平均高度和胸径则呈现出减小趋势。各样带最大树高差异较小,但谷底样带乔木最大胸径明显大于山脊样带。样带乔木物种树高及胸径级分布比例如图 1、图 2,各样带间没有表现出明显的变化趋势。但整体而言,谷底样带群落分布于树高级 1—5 m 及胸径级 1—10 cm 个体占样带总个体数的比例高于山脊处样带,在较大树高及胸径级分布个体占样带总个体数的比例则略低于山脊处的样带。

2.2 各样带群落物种多样性的变化

Kruskal-Wallis 检验表明,各样带物种丰富度无显著差异 ($Kw-H(4,50) = 2.4084, P = 0.6611$), 多样性指数则存在显著性差异 ($E: Kw-H(4,50) = 13.5210, P = 0.0109; H: Kw-H(4,50) = 11.2483, P = 0.0239$)。从图

3 可以看出,多样性指数随海拔降低呈增加趋势,从山脊至谷底,由于光照、水分、土壤厚度等环境条件变化,群落物种多样性逐渐增加。但在微地形尺度上,这种变化趋势差异性的统计学意义并不十分明显,ANOVA 分析结果显示样带间物种多样性差异主要存在于位于山脊处的 I 样带与其它各样带间。

表 1 各样带群落结构比较表
Table 1 Comparisons of stand structure among belt transects

样带 Belt transect	平均高度 Mean height/m	最大高度 Max. height/m	平均胸径 Mean DBH/cm	最大胸径 Max. DBH/cm	密度 Individual density/(ind·hm ⁻²)
I	7.7	25	9.9	67	2275
II	8.1	28	8.7	71.2	2385
III	7.3	27	8.1	90	2225
IV	6.9	28	7.3	81.1	2227
V	6.3	29.5	6.8	91	2332

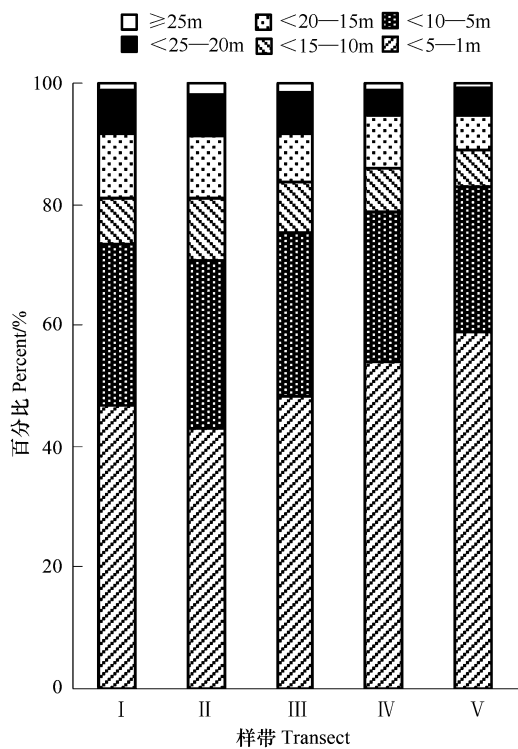


图 1 不同样带群落物种树高级分布
Fig. 1 Height distribution in different transect communities

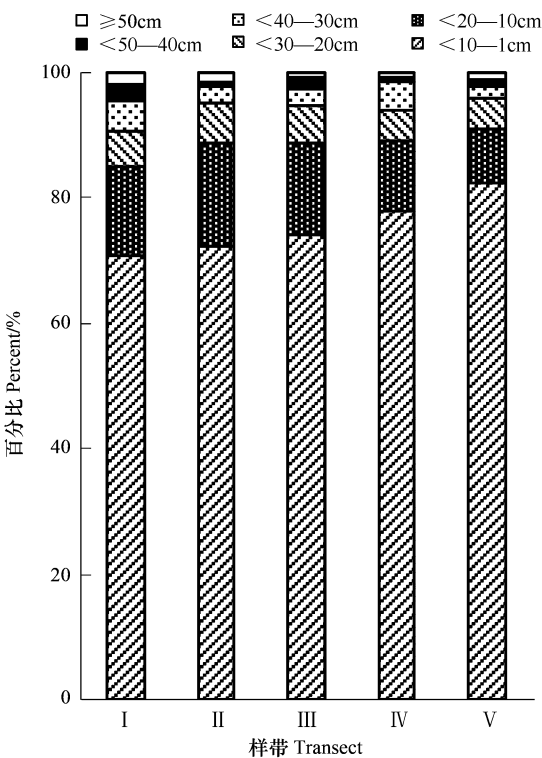


图 2 不同样带群落物种径级分布
Fig. 2 DBH distribution in different transect communities

2.3 各样带群落物种组成的差异

用 MRPP 分析检验样带间物种组成的差异性,其零假设为被比较数组之间在组成上没有差异,差异显著的结果指示了数组内部的聚集关系^[19],为检验上述数量分析中群落之间物种组成是否具有差异提供了一个有效的方法。MRPP 组间检验结果如表 2, $A = 0.1317$, $P < 0.0001$,表明样带间物种组成存在极显著差异。

同时,组间配对 (Pairwise comparisons) 检验结果显示,样带 I 与 IV ($A = 0.1261$, $P = 0.0022$)、V ($A = 0.2007$, $P < 0.0001$);样带 II 与 IV ($A = 0.0667$, $P = 0.0209$)、V ($A = 0.1435$, $P < 0.0001$);样带 III 与 IV ($A = 0.0646$, $P = 0.0334$)、V ($A = 0.1656$, $P < 0.0001$) 之间的物种组成存在显著差异。为进一步检验各样带间物种组成差异的具体表现,对其物种结构及密度进行分析。鉴于样地中出现乔木种类较多,共计 110 种,故仅选择各样带重要值前 10 位的物种进行对比,共包括 20 种植物。各样带主要物种及密度结构如表 3 所示。

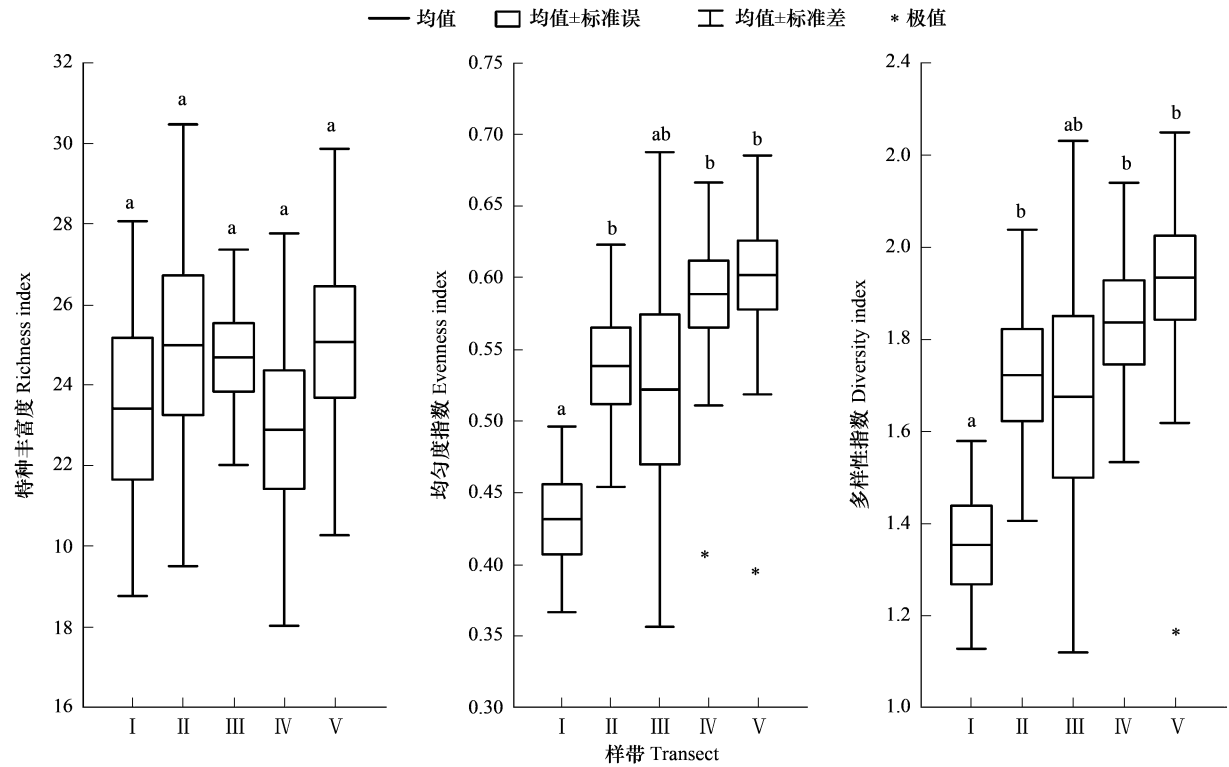


图3 不同样带群落的物种丰富度、均匀度和多样性指数,同一指数不同样带间不同字母表示差异显著($P < 0.05$)

Fig.3 Comparison of community richness, evenness and diversity indices between different transects, the different letters within each index indicate significant difference between different transects at 5% significance level

表2 样带组间物种组成的多响应置换过程分析

Table 2 MRPP for species compositions among different transects

组别 Group	预测值 Observed delta	观测值 Expected delta	方差 Variance	偏度 Skewness	T	P	A
样带 Transect	0.5000	0.4341	0.0000	-0.5974	-6.2049	<0.0001	0.1317

表3 不同样带主要物种密度(株/hm²)结构表

Table 3 Density of dominant species in different transects

主要物种 Dominant species	I ^a	II ^a	III ^a	IV ^b	V ^b
米锥 <i>Castanopsis carlesii</i>	607	590	515	334	233
鸭公青 <i>Neolitsea chuii</i>	186	160	123	143	121
荷木 <i>Schima superba</i>	114	115	53	48	90
栓叶安息香 <i>Styrax suberifolia</i>	57	100	73	127	167
微毛山矾 <i>Symplocos wikstroemiiifolia</i>	125	95	75	107	—
毛棉杜鹃 <i>Rhododendron moultmainense</i>	204	163	110	—	—
石栎 <i>Lithocarpus glaber</i>	138	103	—	—	—
香楠 <i>Randia canthioides</i>	64	83	—	—	—
甜锥 <i>Castanopsis eyrei</i>	71	—	—	—	—
广西杜英 <i>Elaeocarpus duclouxii</i>	61	—	—	—	—
红背锥 <i>Castanopsis fargesii</i>	—	85	98	82	—
中华楠 <i>Machilus chinensis</i>	—	43	—	—	—
华南樟 <i>Cinnamomum austro-sinensis</i>	—	—	123	186	225
黑桉 <i>Eurya macartneyi</i>	—	—	175	159	194
谷木冬青 <i>Ilex memecylifolia</i>	—	—	85	—	—
枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	—	—	—	7	15
闽楠 <i>Phoebe bournei</i>	—	—	—	157	—
节梗大参 <i>Macropanax rosthornii</i>	—	—	—	—	156
香港四照花 <i>Dendrobenthamia hongkongensis</i>	—	—	—	—	96
樟叶槭 <i>Acer cinnamomifolium</i>	—	—	—	—	79

a,b:MRPP 分析组间配对检验中物种组成存在显著差异的组别

由表 3 可看出,从 I 至 V 样带,各样带主要物种组成差异明显。在整个群落中占重要地位的米锥 (*Castanopsis carlesii*)、鸭公青 (*Neolitsea chunii*)、荷木 (*Schima superba*) 和栓叶安息香 (*Styrax suberifolia*) 虽然在各个样带均为主要物种,但密度有明显变化。如米锥从 I 样带的 607 株/ hm^2 减小到 V 样带的 233 株/ hm^2 ,栓叶安息香在下坡位密度增加至 167 株/ hm^2 。另外,甜锥 (*Castanopsis eyrei*)、毛棉杜鹃 (*Rhododendron moulmianense*)、石栎 (*Lithocarpus glaber*) 等较多分布在上坡位,桔梗大参 (*Macropanax rosthornii*)、香港四照花 (*Dendrobenthamia hongkongensis*)、樟叶槭 (*Acer cinnamomifolium*) 等喜温暖湿润物种则在下坡位的分布占据主要地位。

2.4 物种分布与地形因子相关性的典范对应分析

上述结果暗示出微地形条件对群落物种分布有明显影响,故进一步采用排序方法对物种分布进行分析。以调查所获得的植物种类组成及环境因子构成数据矩阵,应用典范对应分析 (CCA) 方法,输出 CCA 二维排序图 (图 4)。分析时,可以作出某物种与连续环境因子连线的垂直线,垂直线与环境因子连线相交点离箭头头越近,表示物种分布的最适值与该环境因子的正相关性越大;物种与非连续变量质心的距离表示其在该环境中的分布数量及趋势,距离越短,物种在该生境条件下适应性越强,相对分布数量较多。

各环境变量与排序轴的相关系数、特征值及累积贡献率如表 4 所示,第一排序轴与海拔、坡位相关性较大,基本上反映植物所在环境海拔与坡位的变化趋势,即沿 CCA 第一轴从左到右,逐渐由谷底向山脊过渡。第二排序轴与坡度、坡向的相关性较大,基本上表现出植物所在环境坡度与坡向的变化趋势,即沿 CCA 第二轴从上到下,生境由阴坡向阳坡过渡。前两个排序轴的累积贡献率达到 60.7%,已经能较好地解释群落物种的分布趋势及对其影响的地形因子。

表 4 环境因子与 CCA 排序轴之间的相关系数、特征值和累积贡献率

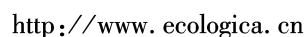
Table 4 Correlations of environmental variables with axes, eigenvalues and cumulative percentages of variance explained from CCA ordinations

环境因子 Environmental variables	轴 1 Axis1	轴 2 Axis2	轴 3 Axis3	轴 4 Axis4	总计 Total
坡度 Slope	-0.4284	0.6244	0.1507	0.2120	
海拔 Elevation	0.6205	0.3734	0.2208	0.3137	
上坡 Upslope	0.7279	0.1679	0.1070	-0.3321	
中坡 Middleslope	-0.1545	0.2428	-0.4793	0.5057	
下坡 Downslope	-0.5614	-0.4066	0.3719	-0.1770	
东向 East	-0.1221	-0.0288	0.4841	-0.1013	
东北向 Northeast	-0.2595	0.5867	-0.4318	-0.3712	
东南向 Southeast	0.3264	-0.5772	0.1806	0.4283	
特征根 Eigenvalue	0.211	0.087	0.058	0.055	2.723
累积贡献率 Cumulative percentage/%	43.0	60.7	72.6	83.8	49.1

由图 4 可以看出,表 3 中 I、II 样带的主要物种如甜锥在第四象限分布,反映生境条件为海拔较高的阳坡;出现在 IV、V 样带的主要物种如枫香、樟叶槭等到下坡位质心的距离明显短于其它物种,主要分布在下坡位。米锥、荷木等在整个样地群落占据重要地位的物种则分布排序图的中心部分,说明其在样地中分布较为广泛,随环境因子变化的趋势并不明显。

3 讨论

在区域至全球尺度上,地带性气候条件是决定植物种类、生活型或植被类型分布的主导因素;而在景观及群落尺度上,非地带性的环境因子 (微生境、土壤养分等) 主导着植被的格局^[25]。尤其在山区,地形往往是局部生境温、湿度的良好指示,并影响土壤的发育过程及其强度,进而直接影响不同地形部位地貌的差异及其对群落的物种构成、结构和动态的作用^[26]。



由文中分析可知,在海拔梯度变化较小的微地形尺度下,车八岭自然保护区米锥群落结构发生了明显变化。从山脊至谷底,各样带平均树高、胸径呈现减小趋势,但上坡位样带最大树高及胸径小于下坡位样带。有研究表明,土壤养分如有机质、氮、磷等与海拔和坡度呈显著正相关^[27],在本研究中海拔变化范围较小,土壤养分与海拔的相关性主要表现为与坡位的相关性。在微地形环境因子中,坡度与地表水土运动速率直接相关,与坡位结合反映了生境的干燥度、土壤厚度及相应的水分、养分条件,也反映了不同地形部位的自然干扰与林窗动态的差异^[28]。该研究样地中下坡位样带水分及土壤养分条件优于上坡位样带,且谷底受到风速、雨雪等自然灾害干扰的概率及强度较小,出现最大胸径及树高大于上坡位样带的现象。然而由于谷底受光不如山脊充分,以及样带中超高、超大个体占据群落上层,冠层结构受自然干扰强度小,不易破坏,导致下坡位样带中下层群落受光条件越来越差,光照成为低层乔木生长的主要限制因子,因此样带较大树高及胸径级分布个体所占比例比上坡位样带小。

物种分布趋势与生境具有显著的相关性^[1],在同一地区,不同样方的环境往往是异质的,分布的植物种类也常常具有差异^[2]。本研究所调查的山地群落中,上坡位光照充分,热量充足,有利于米锥、甜锥、石栎等喜光的阳性树种在群落中占据优势地位。谷底样带温暖湿润,枫香、节梗大参、香港四照花、樟叶槭等适应性强或耐阴的物种既能够在幼树时期适应林下环境,进入主林层后水热充足的条件亦利于其生长,因而成为下坡位群落主要物种。同时,林下荫蔽潮湿的环境适宜阴生植物生长,群落垂直结构丰富,物种多样性略优于上坡位样带。

生物多样性的空间格局受到局部地形因子的强烈影响,坡位、坡度、坡向和海拔反映的局部生境光、热、水分条件综合地影响着植被 α 多样性的水平和空间分布,加上群落内部的相互作用,使群落在微地形区域内表现出不同的多样性格局^[28-29]。有研究指出海拔作用的方向与通常所说热量梯度的影响并不吻合,表明生物多样性与该环境因子相关性的实质是与坡位的相关性^[29],与本研究结果较为一致。坡位尺度的差异主要与局部生境的光照、温度、湿度、土壤厚度与结构及林窗干扰的发生概率相联系^[28,30],即从山脊部位到沟谷底部,水分、光照、土壤养分及温度条件存在明显差异,进而发育了不同的植物类型,导致群落物种组成及多样性的差异。

但环境因子对森林群落的影响还有群落内灌、草本层结构诸方面,对群落格局现状产生影响的还有土壤基质、气候、植物之间的相互作用等各方面,所以这里的分析对象只是群落与环境一部分特征的对应关系,相关研究有待于进一步深入。另外,人为干扰也是影响群落结构变化的重要因素,本研究样地常绿阔叶林因保护较好受人为影响小,故未对该因素予以深入分析。多尺度研究生物多样性不同组分关系的变化是生态学家面临的一大挑战^[30],微地形尺度上分析地形因子对群落分布格局的影响可以更深入了解群落物种多样性变化的控制因子,进而提出有效的保护策略和措施,对生物多样性保育和退化生境的恢复重建具有很重要意义。

References:

- [1] Philips O L, Vargas N P, Monteagudo A L, Cruz A P, Zans M C, Sanchez W G, Yli-halla M, Rose S. Habitat association among Amazonian tree species: a landscape-scale approach. *Journal of Ecology*, 2003, 91: 757-775.
- [2] Yu S L, Ma K P, Xu C B, Jin S F, Song X B, Chen L Z. The species diversity characteristics comparison of *Quercus mongolica* community along environmental gradient factors. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2932-2939.
- [3] Zhang B, Zhang J T, Suriguga, Zhang Q D, Cheng J J, Tian S G. A comparison of co-inertia analysis and canonical correspondence analysis in plant community ordination. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33 (5): 842-851.
- [4] Ma K P, Huang J H, Yu S L, Chen L Z. Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China II. species richness, evenness and species diversity. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15 (1): 268-277.
- [5] He J S, Chen W L. A review of gradient changes in species diversity of land plant communities. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17 (1): 91-99.
- [6] Zhang L, Li Z K, Su Z Y, Chen B G. Quantitative classification and ordination of forestry communities in Nanling National Nature Reserve. *Journal of South China Agricultural University*, 2007, 28(3): 71-75.
- [7] Hara M, Hirata K, Fujihara M. Vegetation structure in relation to micro-landform in an evergreen broad-leaved forest on Amami Ohshima Island,

- south-west Japan. *Ecological Research*, 1996, 11: 325-337.
- [8] Oliver A M, Hix D M. Influence of aspect and stand age on ground flora of southeastern Ohio forest ecosystems, *Plant Ecology*, 1998, 139: 177-187.
- [9] Mujuru L, Kundhlande A. Small-scale vegetation structure and composition of Chirinda Forest, southeast Zimbabwe. *African Journal Ecology*, 2007, 45: 624-632.
- [10] Palmer M W, Dixon P M. Small-scale environmental heterogeneity and the analysis of species distributions along gradients. *Journal of Vegetation Science*, 1990, 1: 57-65.
- [11] Shen Z H, Zhang X S, Jin Y X. An analysis of the topographical patterns of the chief woody species at Dalaoling Mountain in the Three Gorges region. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(5): 581-589.
- [12] Barberis I M, Batista W B, Pire E F, Lewis J P, Leon R J C. Woody population distribution and environmental heterogeneity in a Chaco forest, Argentina. *Journal of Vegetation Science*, 2002, 13: 607-614.
- [13] Klug-Pfimpel B. Effects of microrelief on species distribution and phytomass variations in a *Caricetum curvulae* stand. *Vegetation*, 1982, 48: 249-254.
- [14] Li G Q, Wang X S, Guo H, Zhu Z H. Effects of ecological factors on plant communities of Ziwoing Mountain, Shanxi Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6): 2463-2471.
- [15] Ou Y D, Wang H N, Zhang L, Su Z Y. Topographic correlates of understory plant species distribution in Nanling National Nature Reserve, Guangdong. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2009, 27(1): 41-46.
- [16] Lai J S, Zhang M, Xie Z Q. Structure and distribution pattern of dominant populations in the evergreen broad-leaved forest in Three Gorges Reservoir Area. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 1073-1079.
- [17] Xu Y Q. A comprehensive report of surveys in Chebaling National Nature Reserve // Xu Y Q ed. A Collection of Research Papers on the Investigation of Chebaling National Nature Reserve. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1993: 1-7.
- [18] Li S Z. Some basic features of National Nature Reserve of Cheba-Hill. *Ecologic Science*, 1991, (1): 41-45.
- [19] Dai L M, Tang L N, Cao Y M, Wang S Z, Zhou L, Wang Q L. Quantitative classification and ordination aiming to realize ecological land classification for the mountainous region in Eastern Liaoning Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(3): 6-12.
- [20] Ma K P. Measurement of biotic community diversity I. measurement of α diversity(I). *Chinese Biodiversity*, 1994, 2(3): 162-168.
- [21] Ma K P, Liu Y M. Measurement of biotic community diversity I. measurement of α diversity(II). *Chinese Biodiversity*, 1994, 2(3): 231-239.
- [22] Stallins J A. Dune plant species diversity and function in two barrier island biogeomorphic systems. *Plant Ecology*, 2002, 165: 183-196.
- [23] Ou Z Y, Su Z Y, Ye Y C, Zhu J Y, Liu S S. Ground vegetation as indicators of topsoil chemical properties in Dongguan, South China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 984-992.
- [24] Leps J, Smilauer P. Multivariate Analysis of Ecological Data using CANOCO. New York: Cambridge University Press, 2003: 149-167.
- [25] Woodward F I, McKee I F. Vegetation and climate. *Environment International*, 1991, 17: 535-546.
- [26] Swanson F J. Land form effects on ecosystem patterns and processes. *Bioscience*, 1988, 38: 92-98.
- [27] Qing S, Fan Y, Liu H B, Wang Z Y. Studying the relations between topographical factors and the spatial distributions of soil nutrients. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(4): 275-279.
- [28] Shen Z H, Zhang X S, Jin Y X. Spatial pattern analysis and topographical interpretation of species diversity in the forest of Dalaoling in the region of the Three Gorges. *Acta Botanica Sinica*, 2000, 42(6): 620-627.
- [29] Ma B X, Li J X. A study on diversity of plant community in Dongling Mountain. *Journal of Northwest Forestry University*, 2006, 21(6): 47-49.
- [30] Zhang Y X, Ma K M, Qi J, Feng Y, Zhang J Y. Multi-scale analysis of plant species diversity of Oak (*Quercus liaotungensis*) forest at Donglingshan Mountain, Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(5): 2179-2185.

参考文献:

- [2] 于顺利, 马克平, 徐存宝, 金淑芳, 宋晓兵, 陈灵芝. 环境梯度下蒙古栎群落的物种多样性特征. *生态学报*, 2004, 24(12): 2932-2939.
- [3] 张斌, 张金屯, 苏日古嘎, 张钦弟, 程佳佳, 田世广. 协方差分析与典范对应分析在群落排序中的应用比较. *植物生态学报*, 2009, 33(5): 842-851.
- [4] 马克平, 黄建辉, 于顺利, 陈灵芝. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II. 物种丰富度、均匀度和物种多样性. *生态学报*, 1995, 15(1): 268-277.
- [5] 贺金生, 陈伟烈. 陆地植物群落物种多样性的梯度变化特征. *生态学报*, 1997, 17(1): 91-99.
- [6] 张璐, 李镇魁, 苏志尧, 陈北光. 南岭国家级自然保护区森林群落的数量分类与排序. *华南农业大学学报*, 2007, 28(3): 71-75.

- [11] 沈泽昊, 张新时, 金义兴. 三峡大老岭地区主要木本植物的分布格局. 植物生态学报, 2000, 24(5): 581-589.
- [14] 李国庆, 王孝安, 郭华, 朱志红. 陕西子午岭生态因素对植物群落的影响. 生态学报, 2008, 28(6): 2463-2471.
- [15] 区余端, 王华南, 张璐, 苏志尧. 南岭国家级自然保护区林下植被分布的地形相关性. 武汉植物学研究, 2009, 27(1): 41-46.
- [16] 赖江山, 张谧, 谢宗强. 三峡库区常绿阔叶林优势种群的结构和格局动态. 生态学报, 2006, 26(4): 1073-1079.
- [17] 徐燕千. 车八岭国家级自然保护区调查研究综合报告//徐燕千主编. 车八岭国家级自然保护区调查研究论文集. 广州: 广东科技出版社, 1993: 1-7.
- [18] 李石周. 车八岭自然保护区的特点及初步评价. 生态科学, 1991(1): 41-45.
- [19] 代力民, 唐立娜, 曹玉明, 王顺忠, 周莉, 王庆礼. 辽东生态土地分类中的植物群落数量分析. 林业科学, 2008, 44(3): 6-12.
- [20] 马克平. 生物群落多样性的测度方法 I. α 多样性的测度方法(上). 生物多样性, 1994, 2(3): 162-168.
- [21] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 I. α 多样性的测度方法(下). 生物多样性, 1994, 2(3): 231-239.
- [23] 欧芷阳, 苏志尧, 叶永昌, 朱剑云, 刘颂颂. 东莞地表植被对表层土壤化学特性的指示作用. 生态学报, 2009, 29(2): 984-992.
- [27] 秦松, 樊燕, 刘洪斌, 王正银. 地形因子与土壤养分空间的分布的相关性研究. 水土保持研究, 2007, 14(4): 275-279.
- [28] 沈泽昊, 张新时, 金义兴. 三峡大老岭地区森林植被的空间格局分析及其地形解释. 植物学报, 2000, 42(6): 620-627.
- [29] 马宝霞, 李景侠. 东灵山植物群落(乔木)物种多样性与微地形的研究. 西北林学院学报, 2006, 21(6): 47-49.
- [30] 张育新, 马克明, 祁建, 冯云, 张洁瑜. 北京东灵山辽东栎林植物物种多样性的多尺度分析. 生态学报, 2009, 29(5): 2179-2185.