

喀斯特山区植物物种丰富度的空间变异分析

周应书¹, 罗林², 何兴辉³, 谢永贵¹, 王敏¹, 吴明艳¹

(1. 贵州省毕节地区林业科学研究所, 贵州 毕节 551700; 2. 贵州省毕节地区水土保持办公室, 贵州 毕节 551700;

3. 贵州省林业调查规划院, 贵阳 550003)

摘要: 应用地统计学对地处滇黔桂连片喀斯特腹地的贵州省毕节地区植物物种丰富度的海拔空间变异进行分析。结果表明, 乔木物种丰富度的半变异函数最佳理论模型为球状模型, 灌木、草本为线性有基台模型。乔木物种丰富度的空间异质比为 0.0052, 具有强烈的海拔空间相关性, 主要受随海拔梯度变化的自然性控制因素的影响; 灌木、草本物种丰富度的空间异质比分别为 3.15、34.55, 海拔梯度的空间相关性很弱, 受随机因素作用较大。乔木物种丰富度的变程为 177.37 m, 受因素影响的海拔范围较宽; 灌木和草本物种丰富度的变程分别为 73.02 m 和 49.97 m, 受因素影响的海拔范围较窄。灌木、草本物种丰富度的 Moran's I 系数随海拔梯度变化的趋势相类似, 但乔木的差别较大。

关键词: 喀斯特; 植物; 物种丰富度; 海拔; 地统计学; 空间变异

中图分类号: Q948.15

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2008)06-0516-05

Analysis on Spatial Variability of Plant Species Richness in Karst Mountaines Area

ZHOU Ying-shu¹, LUO Lin², HE Xing-hui³, XIE Yong-gui¹, WANG Min¹, WU Ming-yan¹

(1. Bijie Institute of Region Forestry Science, Guizhou Province, Bijie 551700, China;

2. Bijie Region Water and Soil Conservation Office, Guizhou Province, Bijie 551700, China;

3. Institute of Guizhou Forestry Survey and Planning, Guiyang 550003, China)

Abstract: The spatial variability of plant species richness was analyzed using geostatistics in the Karst area of Bijie, Guizhou Province, which presents wide altitudinal range in southwest China. The optimal semivariogram theoretical model fitted for arbor species richness was spherical model, and the linear sill model for shrub and herb. The arbor species richness was highly related to altitudinal gradient with a spatial heterogenous rate of 0.0052, which mainly affected by natural controlling factors with altitudinal variation. Shrub and herb species were mainly affected by random factors, which showed very weak relationship with altitudinal gradient and their spatial heterogenous rates were 3.15 and 34.55, respectively. The altitudinal range of arbor species richness was 177.37 m, which indicated a wide altitude range affected by random factors. The altitudinal range of species richness of shrub and herb were 73.02 m and 49.97 m, respectively, which indicated a narrow altitude range affected by random factors. The changes of Moran's I index of shrub and herb species along altitudinal gradient were similar, that were different from that of arbor species.

Key words: Karst; Plant; Species richness; Altitudinal; Geostatistics; Spatial variability

物种丰富度的海拔梯度分布格局是生物多样性研究的重要内容。喀斯特山区由于其地质地貌、土壤和水资源的特殊性, 物种丰富度受不同海拔空间尺度的自然因素、生物因素和人为因素直接或间

接控制。这些因素既存在随机性, 也存在系统性和地域性。分析其物种丰富度的空间变异, 揭示其分布规律, 对于喀斯特山区生物多样性保护、生态恢复与石漠化综合防治具有十分重要的指导意义。

在物种丰富度分布格局的研究方面, Whittaker^[1]、Ohsawa^[2-3]、Kessler^[4]分别对美国亚利桑那州的 Santa Catalina Mountains、亚热带季风区、玻利维亚安第斯山的植物物种丰富度垂直分布格局进行了研究。目前,从不同角度对祁连山、长白山白坡、高黎贡山、北京东灵山、独龙江地区的植物物种丰富度垂直分布格局进行了研究^[5-9]。但喀斯特山区植物物种丰富度空间变异方面的研究未见报道。为此,选择地处滇黔桂连片喀斯特山区腹地,滇东高原向黔中低山丘陵过渡斜坡地带的贵州省毕节地区,利用地统计学的半变异函数和空间自相关分析,研究植物物种丰富度的海拔空间相关关系与相互依赖的变异特征、尺度和演变过程,以揭示经典统计方法难以发现的规律,更深刻、全面地理解喀斯特山地植物群落物种丰富度的海拔空间格局。

1 研究区概况

贵州省毕节地区地处滇黔桂连片喀斯特腹地,滇东高原向黔中低山丘陵过渡的斜坡地带,从东向西分布有低山、低中山、中山、高中山和高原5种地貌,海拔范围457~2 900 m,总土地面积26 853 km²,其中山地、丘陵占总面积的93%。形成的喀斯特发育区总面积为19 693 km²,占全区总面积的73.3%。分布有黄壤、黄棕壤、紫色土、石灰土、棕壤、山地草甸土、水稻土等土壤类型。气候属亚热带季风气候,多年平均降雨量850~1 444 mm^[10]。因经济文化落后,水土流失严重,石漠化加剧,生态环境恶化,是国务院批准成立的“开发扶贫、生态建设”试验区。

毕节喀斯特山区生长有维管植物197科715属1 925种,其中蕨类植物43科104属362种,裸子植物7科17属23种,被子植物147科594属1 540种^[10]。分布的森林植被主要有以云南樟(*Cinnamomum glanduliferum*)、香樟(*C. camphora*)、猴樟(*C. bodinieri*)、丝栗栲(*Castanopsis fargesii*)、瓦山栲(*C. ceratocantha*)、小果润楠(*Machilus microcarpa*)、宜昌润楠(*M. ichangensis*)、黑壳楠(*Lindera megaphylla*)、灰背高山栎(*Quercus senescens*)、青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)、硬斗石栎(*Lithocarpus hancei*)、深山含笑(*Michelia maudiae*)组成的中亚热带常绿阔叶林;伴有滇杨(*Populus yunnanensis*)、响叶杨(*P. adenopoda*)、领春木(*Euptelea pleiospermum*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)、麻栎(*Q. acutissima*)、亮叶桦(*Betula*

luminifera)等落叶树种和马尾松(*Pinus massoniana*)、华山松(*P. armandii*)、云南松(*P. yunnanensis*)、滇油杉(*Keteleeria evelyniana*)等针叶树种的山地常绿落叶阔叶混交林和针叶阔叶混交林。灌木主要由火棘(*Pyacantha fortuneana*)、马桑(*Coriaria sinica*)、红果蔷薇(*Rosa maisei* var. *plurijaga*)、香叶树(*Lindera communis*)、黄荆(*Vitex negundo*)、刺异叶花椒(*Zanthoxylum dimorphophyllum*)、马桑(*Coriaria sinica*)、十大功劳(*Mahonia confusa*)、月月青(*Itea ilicifolia*)、金花小檗(*Berberis wilsonae*)、平枝栒子(*Cotoneaster horizontalis*)、黄葛树(*Ficus virens*)、灰毛浆果楝(*Cipadessa cinerascens*)、铁仔(*Myrsine africana*)、山苍子(*Litsea cubeba*)、胡桃(*Juglans regia*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)等种类组成。草本主要由白茅(*Imperata cylindrical* var. *major*)、四脉金茅(*Eulalia quadrinervis*)、野青茅(*Deyeuxia sylvatica*)、蜈蚣草(*Pteris vittata*)、萁草(*Arthraxon hispidus*)、野百合(*Lilium rosthocnii*)、三脉叶紫菀(*Aster ageratoides*)、酢浆草(*Oxalis corniculata*)、金丝梅(*Hypericum patulum*)、黑穗画眉草(*Eragrostis nigr*)、萎陵菜(*Potentilla chinensis*)、知风草(*Eragrostis ferruginea*)、皱叶狗尾草(*Setaria excurrens*)、马料草(*Carex thibetica*)、火棘(*Pyacantha fortuneana*)、酢浆草(*Oxalis corniculata*)、青蒿(*Artemisia japonica*)、贯众(*Cyrtomium fortunei*)、雀麦(*Bromus japonicus*)等种类组成。

2 研究方法

2.1 数据采集

在毕节地区喀斯特山地,利用1/10000地形图并结合森林资源清查资料,从东部低海拔的低山地貌到西部高海拔的高原地貌,按海拔高程50 m左右的间距,在有代表性的植物群落分布地段选择一个点,用测绳从这一点设置互相垂直的两条线,在两条线上,草本按0.5 m,灌木按1 m,乔木按2 m的间距,再作垂直线相接,连接成按间距逐步扩大的样地,统计按各间距扩大样地的植物物种数,样地逐步扩大到基本不再增加新的物种为止。绘制物种数-面积曲线,得出植物物种丰富度和最小表现面积。因各海拔高程植物物种丰富度的最小表现面积有变化,故用转换后的物种丰富度^[11]表示:

$$TSP = \frac{N}{\lg(S)}$$

式中, N 为最小表现面积的植物物种数; S 为最小

取样面积。

调查的样地数为 41 个,分布在低山地貌到高原地貌海拔 540 ~ 2 610 m 的范围。乔木样地最小表现面积在 376 ~ 438 m²,灌木在 26 ~ 32 m²,草本 3.7 ~ 4.3 m²之间。

2.2 空间变异分析

地统计学是在经典统计学基础上发展起来的空分分析方法,可有效揭示属性量在空间上的分布、变异和相关特征。对毕节喀斯特山地植物物种丰富度海拔空间梯度的变异分析主要进行变异函数分析和空间自相关分析,计算用 SPSS12.0 和 GS+ 7.0 统计软件完成^[12-15]。

2.2.1 变异函数分析

半变异函数是地统计学的基本工具,为区域变量 $z(x_i)$ 和 $z(x_i + h_i)$ 增量平方的数学期望,即区域化变量的方差。其通式为

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)_i} \sum_{i=1}^{N(h)_i} [z x_i - z(x_i + h)]^2$$

式中, $\gamma(h)$ 为变异函数; h 为步长,是分类样点的海拔空间间隔高程; $N(h)$ 为间隔高程为 h 时的样点对数; $z(x_i)$ 和 $z(x_i + h)$ 分别为变量 z 在海拔空间位置 x_i 和 $x_i + h$ 的取值。

为使半变异函数真实地描述变量的变化规律,用球形模型、指数模型、高斯模型和线性有基台模型等多种理论模型分别进行拟合,按决定系数(R^2)和 F 检验值选出最优拟合模型,通过块金值(C_0)、基台值($C_0 + C$)、变程(a)、空间异质比 [$C_0/(C_0 + C)$] 等模型参数定量地分析乔木、灌木、草本物种丰富度的海拔空间变化规律。空间变异主要由空间自相关和随机变异组成,块金值(C_0)表示由实验误差和小于最小取样尺度引起的随机变异;基台值($C_0 + C$)表示包括结构性变异和随机性变异的系统内总变异,反映了植物物种丰富度随海拔梯度异质化程度;变程是变异函数达到基台值($C_0 + C$)所对应的距离,表明属性因子空间自相关范围的大小,它与观

测尺度以及在取样尺度上影响植物群落结构各层次物种的相互作用过程有关。在变程之内,空间自相关存在,反之则不存在; $C_0/(C_0 + C)$ 表示随机部分空间变异占总空间变异性的程度,反映了随机误差引起植物物种丰富度的海拔空间变异,其值越低,空间自相关引起的空间变异越强;反之,随机误差引起的空间变异起主要作用。

2.2.2 空间自相关分析

空间自相关是变量观测值因观测点在空间上邻近而形成的相关性,与空间格局存在着对应关系,只要变量在空间上表现出一定的规律性,则存在空间自相关。空间自相关可分为全局空间自相关和局部空间自相关,本文用 Moran's I 系数进行全局空间自相关分析,计算公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

式中, x_i 和 x_j 分别是变量 x 在海拔调和相邻空间点 i 和 j 上的取值; w_{ij} 是相邻权重; n 是空间单元数; I 系数取值在 $(-1, 1)$ 之间; $I = 0$ 表示空间不相关,正值为正相关,负值为负相关。

3 结果和分析

3.1 描述性统计分析

对植物乔木、灌木、草本转换后的物种丰富度的描述性统计结果见表 1。乔木、灌木、草本物种丰富度的平均值均大于中位数,但都相差不大。变异系数最低的是灌木,最高的是乔木。对植物物种丰富度的样本转换数据作 K-S 检验,均达到 5% 显著水平,符合正态分布,可进行地统计学分析。

3.2 半变异函数分析

用变异函数计算出乔木、灌木和草本物种丰富度的实验变异函数值后,再用理论模型进行拟合,得出乔木的最优理论模型为球状模型,灌木和草本均为线性有基台模型,理论模型与实验函数值的决

表 1 物种丰富度的描述性统计特征

Table 1 Descriptive statistics characters of species richness

	最小值 Min. (%)	最大值 Max. (%)	平均值 Mean (%)	中位数 Mediam (%)	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of varition	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	K-S
乔木 Arbor	0.17	1.00	0.37	0.33	0.24	0.63	0.892	-0.180	0.249
灌木 Shrub	0.46	9.56	4.51	4.10	2.13	0.47	0.339	0.315	0.157
草本 Herb	0.72	12.26	5.33	5.05	2.77	0.52	0.245	-0.210	0.193

定系数(R^2)分别为 0.776、0.689 和 0.657, F 检验值均达到显著水平, 拟合效果能很好地反映植物物种丰富度的海拔空间变异特征, 拟合结果和相关参数见表 2。

从表 2 可知, 乔木、灌木和草本的块金效应均为正值, 说明存在着由采样误差、短距离变异、随机和固有变异引起的各种正基底效应, 是由随海拔梯度变化的地形、土壤、气候等自然因素引起的变异, 草本的变异程度最大, 其次是灌木和乔木。根据 Cambardella 等提出的区域化变量空间相关程度分级标准^[16], 乔木的 $C_0/(C_0+C)$ 值小于 0.25, 具有强烈

的海拔空间相关性; 灌木和草本的 $C_0/(C_0+C)$ 值大于 0.75, 空间相关性很弱。表明植物群落乔木、灌木和草本物种丰富度除了受到随海拔梯度变化的地质地貌、土壤、气候等引起的变异结构性因素作用外, 随机因素也起到很大作用。其中乔木物种丰富度受海拔梯度结构性因素的控制性最大, 受随机因素的作用小; 而草本和灌木物种丰富度受随机因素作用大, 海拔梯度的空间相关性很弱, 且差别也很大。乔木、灌木和草本物种丰富度很难向均一化方向发展。

表 2 物种丰富度的变异函数模型及其参数

Table 2 Optimal semivariogram theoretical model and corresponding parameters of species richness

	理论类型 Theoretical model	块金值 Nugget	基台值 Sill	空间异质比 Rate of nugget to sill	变程 Range (m)	R^2	F
乔木 Arbor	球状模型 Spherical model	0.03	5.05	0.0052	177.37	0.776	20.88
灌木 Shrub	线性有基台模型 Linear sill model	2.76	0.88	3.15	73.02	0.689	13.26
草本 Herb	线性有基台模型 Linear sill model	6.45	0.19	34.55	49.97	0.657	11.51

变程提供了研究某种属性相似范围的一种测度, 变程大小可以表示空间异质性尺度。表 2 中乔木的变程最大, 灌木次之, 草本最小, 乔木与灌木和草本的海拔空间自相关范围存在很大差别, 说明影响乔木、灌木和草本物种丰富度的因素在不同的尺度上起作用。

3.3 空间自相关分析

用 Moran's I 系数定量描述物种丰富度在海拔空间上的依赖关系。从图 1 植物群落乔木、灌木和草本 3 个层次物种丰富度海拔相隔高程变化的 Moran's I 系数可知, 乔木物种丰富度分别在相隔高程 188 ~ 544 m (海拔高程 728 ~ 1 084 m), 643 ~ 785 m (海拔高程 1 183 ~ 1 325 m) 和相隔高程 1 986 m (海拔高程 2 526 m) 以上; 灌木物种丰富度分别在 340 m (海拔高程 880 m) 以下, 894 ~ 1 405 m (海拔高程 1 434 ~ 1 495 m) 和相隔高程 1 980 m (海拔高程 2 520 m) 以上; 草本物种丰富度分别在 340 m (海拔高程 880 m) 以下, 967 ~ 1 420 m (海拔高程 1 507 ~ 1 960 m) 和相隔高程 1 587 ~ 1 801 m (海拔高程 2 127 ~ 2 341 m) 之间表现出较强的正相关, 主要随海拔梯度变化的变异结构性因素的作用。在其它海拔梯度范围表现为较强的负相关, 主要是随机因素包括外在人为因素的作用。并且

灌木和草本的 Moran's I 系数随海拔梯度变化的趋势类似。

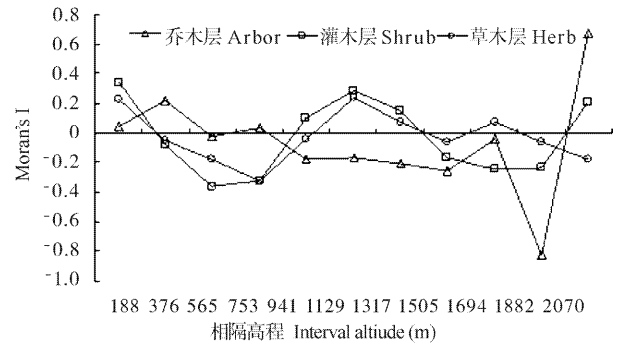


图 1 物种丰富度的 Moran's I 系数

Fig. 1 Moran's I coefficient of species richness

4 结语

植物群落物种丰富度的海拔空间异质性是喀斯特山地生态系统的重要特征, 地统计学为研究这种空间异质性提供了一个有效的工具, 可以定量描述海拔空间自相关作用对海拔梯度变量总变异的贡献, 并揭示这种自相关格局的空间尺度, 为分析海拔空间格局与生态过程的关系, 揭示其分布规律奠定了基础。

通过对毕节地区喀斯特山地植物群落乔木、灌木和草本物种丰富度的空间变异分析, 乔木物种丰

富度的半变异函数最优理论模型为球状模型, 灌木和草本物种丰富度为线性有基台模型。乔木物种丰富度具有强烈的空间相关性, 主要受到随海拔梯度变化的自然性控制因素, 如地质地貌、土壤、气候等; 灌木、草本物种丰富度的空间相关性很弱, 受垦殖、干扰等随机因素的影响较大。乔木、灌木和草本物种丰富度在大部分区域均存在随机因素的作用, 但灌木和草本受随机因素的影响易于逆转, 乔木随海拔梯度的变异具有较强稳定性。从 Moran's I 系数的全局空间自相关分析结果看, 灌木、草本物种丰富度的空间自相关随海拔梯度变化的趋势相类似, 而乔木与灌木、草本的差别较大。

在喀斯特山地植被恢复上, 要根据植物群落乔木、灌木和草本物种丰富度海拔梯度的这种结构性因素和随机因素作用规律, 科学、合理地进行立地类型划分, 选择适宜的栽种物种, 制订相应技术措施和管理措施, 开展高效林灌草植物群落的营建和封育管护, 才能使喀斯特山地生态恢复达到费省效宏的效果。

参考文献

- [1] Whittaker R H, Niering W A. Vegetation of the Santa Catalina Mountains, a Arizona. V. Biomass, production and biodiversity along an elevational gradient [J]. *Ecology*, 1975, 56: 771-790.
- [2] Ohsawa M. Structural comparison of tropical montane rain forests along latitudinal and altitudinal gradients in South and East Asia [J]. *Vegetation*, 1991, 97: 1-10.
- [3] Ohsawa M. Latitudinal comparison of altitudinal changes in forest structure, leaf-type, and species richness in humid monsoon Asia [J]. *Vegetation*, 1995, 121: 3-10.
- [4] Kessler M. Elevational gradients in species richness and endemism of selected plant groups in the central Bolivian Andes [J]. *Plant Ecol*, 2000, 149: 191-193.
- [5] Wang G H(王国宏). Species diversity of plant communities along an altitudinal gradient in the middle section of northern slopes of Qilian Mountains, Zhangye, Gansu, China [J]. *Biodiv Sci(生物多样性)*, 2002, 10(1): 7-14.(in Chinese)
- [6] Hao Q N(郝占庆), Yu D Y(于德永), Ye J(叶吉). The estimation of species richness at different altitudes on the northern slope of Changbai Mountain [J]. *J For Res(林业研究)*, 2002, 13(3): 191-195. (in Chinese)
- [7] Wang Z H(王志恒), Chen A P(陈安平), Piao S L(朴世龙). Pattern of species richness along an altitudinal gradient on Gaoligong Mountains, Southwest China [J]. *Biodiv Sci(生物多样性)*, 2004, 12(1): 82-88. (in Chinese)
- [8] Ren H B(任海保), Zhang L Y(张林艳), Ma K P(马克平). Comparison of fractal characteristics of species richness patterns between different plant taxonomic groups along an altitudinal gradient [J]. *Acta Phytocool Sin(植物生态学报)*, 2005, 29(6):901-909.(in Chinese)
- [9] Feng JM(冯建孟), Wang X P(王襄平), Fang J Y(方精云). Altitudinal pattern of species richness and test of the rapoport's rules in the Drung River Area, Southwest China [J].*Acta Sci Nat Univ Pekinensis(北京大学学报: 自然科学版)*, 2006, 42(4): 515-520.(in Chinese)
- [10] Write Group of "Comprehensive Agricultural Regional Planning of Bijie Prefecture" (《毕节地区综合农业区划》编写组). *Comprehensive Agricultural Regional Planning of Bijie Prefecture [M]*. Guiyang Guizhou People's Press, 1989: 5-91.(in Chinese)
- [11] Jiang M X(江明喜), Deng H B(邓红兵), Tang T(唐涛). On spatial pattern of species richness in plant communities along riparian zone in Xiangxi River watershed [J]. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, 2002, 22(5): 629-635.(in Chinese)
- [12] Li H B(李海滨), Wang Z Q(王政权), Wang Q C(王庆成). Theory and methodology of spatial quantification [J]. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 1998, 9(6): 651-657.(in Chinese)
- [13] Wang Z Q(王政权). *Geostatistics and Its Application in Ecology [M]*? Beijing: Science Press, 1999: 5-91.(in Chinese)
- [14] Goovaerts P. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico chemical soil prorerties [J]. *Biol Fertil Soil*, 1998, 27: 315-334.
- [15] Rossi R E, Mulla D J. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological dependende [J]. *Ecol Monograp*, 1992, 62(2): 277-314.
- [16] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils [J]. *Soil Sci Amer J*, 1994, 58: 1501-1511.