

宜昌百里荒草山草坡群落物种分布的空间趋势分析

辛晓平¹, 王宗礼², 李向林³

(1. 中国农业科学院农业自然资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 中国农业科学院草原研究所, 呼和浩特 010010; 3. 中国农业科学院畜牧研究所, 北京 100091)

摘要:通过基于 CCA 的趋势面分析和空间插值方法,研究了宜昌百里荒山地草场的群落结构空间变化,以及群落结构空间趋势与主要环境因子的相关性。结果表明,该群落物种空间中的群落结构面和物理空间中的空间趋势面可以很好地吻合,说明该群落的结构由一种具有强烈空间结构化特征的机制控制。对群落结构和空间趋势影响最显著的环境因素是土壤有效磷。

关键词:CCA 排序; 趋势面分析; 群落结构

Trend surface analysis on community structure of a grassland in Baili Huang, Yichang county

XIN Xiao-Ping¹, WANG Zong-Li², LI Xiang-Lin³ (1. *Institute of Natural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China*; 2. *Institute of Grassland Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Huhhot 010010, China*; 3. *Institute of Animal Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100091, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(8): 1519~1525.

Abstract: Spatial structure influenced the organization of community and ecosystem as a functional variable, other than the background in which biological and environmental factors act on community and ecosystem. This is why present-day ecologists and bio-geologists are interested in detecting the spatial arrangement of population and community. A large set of quantitative ecological methods related with spatial heterogeneity, spatial autocorrelation, spatial scales were developed in recent decades. Spatial trend surface analysis is one of the quantitative ecological methods that study the relation between spatial structure and species abundance distribution in community. In Canonical Correspondence Analysis (CCA), environmental variables can be instead by the spatial coordinates (x, y) of data points. In such case, an ordination of the species data can be obtained that will be constrained to be consistent with the spatial distribution of sampling localities. A high-degree polynomial of the x, y, x^2, y^2, xy and possible higher powers of basic coordinates can be used to fit to the species data in the manner of trend surface regression. A biplot of species and spatial coordinates of data points should indicate what species have the most important spatial structures.

This paper studied the relation between community structure and spatial variability of a grassland in

基金项目: 国家重点科技攻关资助项目(960160202); 国家“863”计划基金资助项目(2002AA243021)

收稿日期: 2002-04-24; 修订日期: 2003-05-26

作者简介: 辛晓平(1970~), 女, 甘肃天水人, 博士, 副研究员, 主要从事景观生态学研究。

Foundation item: Key Technologies R and D Programme (No. 960160202); Hi-TECH Research and Development Programme of China (No. 2002AA243021)

Received date: 2002-04-24 Accepted date: 2003-05-26

Biography: XIN Xiao-Ping, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in the study of landscape ecology.

subtropical mid-mountainous region using trend surface analysis based on CCA ordination. In this paper a canonical ordination analysis on the species abundance data constrained by the spatial position of sampling localities was conducted. The first two eigenvalues are 0.116 and 0.056 respectively, they measure the species data that is explained by the first and the second canonical axes and, hence, by the spatial position of sampling localities. The first two canonical axes together account for 55.3% of the variance of 27-species-spatial localities relation, and for 18% of the total variance of species data.

The community structure surface is obtained by kriging the sample scores which are weighted averages of species, while the data values for the spatial trend surface maps is based on trend surface regression function. For the canonical axis 1, the first community structure surface is pretty well approximated (correction = 87.6%) by the first spatial trend surface map. In other words, the trend surface regression function predicts the community structure from the simple knowledge of the sampling localities. The same goes for axis 2, the second community structure surface is well fitted (correction = 82.4%) with the second spatial trend surface map. This result suggests a community organization mechanism which is strongly spatial structured.

Correlation between spatial trend of community structure and main environmental factors was also studied. Soil effective phosphor is significantly positively related with the first community structure surface and the first spatial trend surface, and significantly negatively related with the second community structure surface and the second spatial trend surface. That means the distribution of soil effective phosphor is spatial correlated, and soil effective phosphor affected the species combination and species abundance variance. The spatial structured distribution of soil effective phosphor is one reason of the spatial correlated community structure.

Key words:CCA ordination; trend surface analysis; community structure

文章编号:1000-0933(2003)08-1519-07 中图分类号:S812.8 文献标识码:A

群落中物种的分布一方面取决于环境变量的影响,一方面受其它因子例如历史事件,物理空间本身结构方式的影响^[1~3]。环境对于物种分布的影响是一种自下而上的过程,已有成熟的数量生态技术进行群落结构-环境关系分析及解释。而物理空间本身对群落分布的控制是一种自上而下的生态学过程,该过程常常和环境变量无关,在经典的植被数量分析中,这部分作用常被忽略不计,所以虽然大多数情况下在物理空间结构简单的群落中,不考虑空间结构而直接进行环境-群落关系分析,环境变量可以解释大部分的物种变异,然而总有一部分环境变量影响由于空间因素的干扰而不能提取出来^[4,5]。

随着空间技术和空间理论的发展,空间理论也被应用于植被-环境多元分析中^[6~8]。物理空间在生态系统的形成和群落结构组建中是有生态功能的,而不是随机作用的或仅仅是生态学过程的空间背景,这是许多生物地理学家现在对于植被或群落分布的空间分析感兴趣的原因。近年来与空间有关的数量生态学方法得到了迅速的发展,如空间异质性分析,空间自相关分析,趋势面分析,以及地统计学方法和分形方法等等^[9~14]。

趋势面分析是拟合数学面的一种统计方法,趋势面是用来拟合数据中区域性变化的数学曲面。利用趋势面分析,通过对生态数据和空间坐标进行回归,可以消除大尺度上的梯度变异。研究物种-环境关系时,可以在趋势面分析回归残差的基础上展开,从而巧妙地去除由于空间自相关引起的变化,得到环境变量和群落物种分布的真实关系。

趋势面分析计算方便,能够简单明了地描述研究区域内生态变量的空间分布格局,自从引入到生态学研究中之后,得到了广泛的应用^[21~24]。米湘成等应用典范趋势面分析研究了山西沙棘灌丛水平格局,将典范相关分析和趋势面分析结合起来,对生态空间的多变量变化格局进行综合分析^[25]。其思路和 Legendra 基于空间坐标约束的 CCA 排序进行的空间趋势面分析是一致的。这两种方法的共同优点在于,拟合的综

合趋势面与空间坐标之间达到最大相关,从而可以体现一组生态变量在不同空间位置上的变化格局。本文通过基于 CCA 的空间趋势面分析和图形方法,研究了宜昌百里荒山地草场的群落物种结构的空間趋势,试图探究群落结构形成的主要原因。

1 原理及实验方法

1.1 原理 利用 CCA 排序进行空间趋势面分析

植物群落的多元分析在早期是以用环境因子定量解释群落分布为主要内容和目的,如排序分析和数量分类。在排序分析中,人们从群落样方的多盖度矩阵中,提取特征向量和特征值,据此得出群落的主要变化方向和趋势,然后结合环境量得到群落变化的环境解释^[15~17]。

20 世纪 80 年代中期,Ter braak 在对应分析 CA(Conrespondance Analysis)的叠代运算中引入了环境变量限制,一步实现了排序和环境解释,这种分析被称之为典范对应分析 CCA(Canonical Conrespondance Analysis)。在 CCA 排序中,环境变量表可以是实测的环境数据,也可以是样方的空间坐标。在后一种情形下,物种数据的排序通过由取样地点的位置约束而得到,排序结果可以反映群落样方与空间位置的关系。空间坐标数据表可以包含 x^2 、 y^2 、 xy 项和更高次的项,这样可以保证物种数据能以多变量高次多项式(趋势面方程)拟合空间坐标^[19,18]。趋势面回归方程包含地理数据表的所有项:

$$Z = b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4xy + b_5y^2 + b_6y^3 + b_7y^2x + b_8yx^2 + b_9x^3$$

基于 CCA 排序,可以得到群落样方在物种空间(用物种为权重计算群落样方得分)和真实空间(用空间趋势方程拟合群落样方得分)中的分布图,通过物种空间和真实空间中的群落趋势图进行对比,可以分析群落空间结构产生的原因。

1.2 实验方法

研究工作在湖北宜昌百里荒亚热带中山试范牧场(110°29'30"E, 30°56'20"N)进行。海拔 1200~1300m,年降水 1250mm 左右,土壤为山地黄壤,pH 为 5~6。实验中发现,即使在同一面看上去很平坦的草坡上,物种的空间分布和组合也很复杂,除了由于土壤变量、地形因子和生物干扰引起的物种变化外,还有一部分(约 23%)与空间因素有关^[19]。这反映了群落中空间位置本身可能在群落组建过程中通过某种自上而下的过程对群落空间结构起一定作用。趋势面分析的目的是为了明确空间因素对于群落影响的细节。

实验于 1998 年 7 月下旬进行,在一面坡度 5~10°之间的西北坡上,取样方法采用系统取样(图 1)。样方空间坐标的确定以山坡最低处中心点为原点,水平方向为 X 轴,山坡方向为 Y 轴,在后文中 X、Y 的含义不再另外给出解释。

首先自坡底到坡顶选取一条样线,在样线上每 1~2m 取一个样,样方间隔依微地形而异。垂直于该样线设置 5 个间隔 10m 的水平带,每个水平带上在样线两侧各取样方 2 个,样方间隔 10m。总取样数量 53,样方大小 50×50cm²。记录每个样方的空间位置调查样方内物种组成和各物种的盖度、高度。样方中物种重要值计算采用公式:

$$\text{重要值} = (\text{相对频度} + \text{相对株高} + \text{相对盖度})/300$$

在野外采样和室内分析基础上,形成物种多度矩阵和空间坐标矩阵。两矩阵均为 53 行,即 53 个样方,空间坐标矩阵为 9 列,分别代表样方相对于同一参考点的横坐标 x 、纵坐标 y ,平方项 x^2 、 y^2 和平方交叉项 xy ,以及立方项 x^3 、 y^3 和交叉项 x^2y 、 xy^2 。其中立方项和平方项是为了保证考虑与空间位置有关的线性过程之外,还考虑更复杂的非线性空间生态学特征。

在每个样方的表土根系层(0~15cm)取土样,分析土壤全氮、全磷、全钾、水解氮、有效磷、有效钾、pH 值和有机质含量等指标,以便研究群落结构空间趋势和主要环境因子的关系。土壤分析委托中国科学院地理研究所土壤分析中心完成。

2 结果和分析

2.1 以地理坐标约束的 CCA 排序结果

表 1 给出物种数据矩阵进行约束的 CCA 排序结果,第一轴和第二轴的特征值 λ_1 、 λ_2 分别为 0.116 和 0.056,度量了第一、第二 CCA 排序轴可以解释物种数据变异的总量。第一排序轴包含的信息量比较大,可

以解释物种数据变化的 12.1%，第二排序轴共可以解释物种数据变化的 5.9%。排序结果前两轴可以解释群落总变化的 18%。从表中数据可以看出，空间坐标和物种多度具有较高相关性。此排序结果表明，样方的空间位置和物种多度分布有较为密切的关系。

在排序结果对物种-空间位置关系的解释方面，前两排序轴可解释物种-空间位置关系的 55.3%，其中第一排序轴起的作用比较大，可单独解释物种-空间位置关系的 37.2%。说明第一排序轴所表达的物种信息具有比较强的空间相关性。

2.2 群落结构的空間趋势面分析

表 2 给出了 CCA 排序前两轴的物种得分和空间变量得分。

CCA 排序中空间变量得分体现了排序轴与各空间变量的相关性，因此被用做各空间变量在空间趋势方程中的权重。由表 2 数据可见，第一、二排序轴与 Y^2 、 Y^3 的相关性都很高，这说明沿山坡方向空间相关性强，群落物种结构受空间位置的影响大；非线性空间因素（如斑块状空间结构）对群落结构的影响比线性空间因素（如梯度分布）要大。

样方在物种空间中的得分是以表 2 中物种得分为权重对物种数据进行加权平均得到的。对样方得分进行插值可以得到群落的物种结构面（图 2a,c）。

根据空间趋势面方程，即用表 2 中空间坐标变量的得分值对空间坐标变量各项进行加权平均，可以得到群落的空间趋势面方程（图 2b,d）。

对比图 2a、图 2b 可见，图 2a 中 CCA 第一排序轴代表的群落结构成分可以很好地与图 2b 中的趋势面图相吻合（相关性 87.6%）。两图中，群落得分高值在右上角，低值在图左侧。本研究中，CCA 第一排序轴群落结构面中较高数值的等值线上群落结构比较复杂，大叶胡枝子、荩草、风轮草等物种成分密度高；较低得分的样方则是结构相对简单、人工成分为主，图中的凹点（低值处）三叶草、黑麦草、密叶苔草、茅茅、蝇子草、山莴苣等密度高。CCA 第一排序轴空间结构面上，较高数值等值线表示该位置高次（3 次）的空间相关性显著，即空间非线性强烈。如上对比分析说明，在 CCA 排序第一轴所代表的抽象轴中，仅和样方空间位置有关的空间趋势面方程对于群落结构基本上能够准确描述。

图 2c、图 2d 的对比分析可以得到类似结论，即第二群落结构面可以较好地第二趋势面描述，相关性 82.4%。但是从相关系数以及从图中直接判断，都可以发现第二排序轴的空间趋势面和群落结构面的吻合度比第一排序轴差。第二群落面上，图右下角和图左侧与空间趋势面吻合较好，此外还有许多区别于空间趋势面的斑状群落结构成分，第二群落面体现的物种-样方关系不是很明显。CCA 第二排序轴空间结

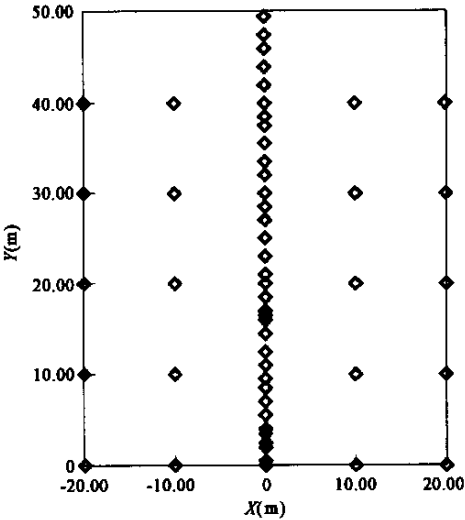


图 1 取样分布图

Fig. 1 Distribution of samples

X 为水平方向，X is the horizontal direction，Y 为山坡方向 Y is the hillside direction

表 1 以空间坐标进行约束的群落 CCA 排序结果

Table 1 CCA ordination summary constrained by geographic coordinate

排序轴 CCA axes	1	2	3	4	总惯量 Total inertia
约束排序特征值①	0.116	0.056	0.043	0.026	
物种-空间相关性②	0.876	0.824	0.850	0.713	
排序轴对物种数据总 变量解释的贡献率③	12.1	18.0	22.5	25.3	
排序轴对物种-空间关 系的解释的贡献率④	37.2	55.3	69.3	77.6	
非约束特征值的总和⑤					0.956
典型特征值的总和⑥					0.311

① Canonical eigenvalues, ② Species-environment correlations, ③Cumulative percentage variance of species data, ④ Cumulative percentage variance of species-environment relation, ⑤ Sum of all unconstrained eigenvalues, ⑥Sum of all canonical eigenvalues

构面体现的物种-样方关系不是很明显。CCA 第二排序轴空间结

表 2 以空间坐标进行约束的群落 CCA 排序结果

Table 2 Result of CCA ordination constrained by geographic coordinate

物种名	第一轴 AX1	第二轴 AX2	空间变量名 Geographic variables	第一轴 AX1	第二轴 AX2
白三叶 <i>Trifolium paratense</i>	−5	12	X	33	−4
百脉根 <i>Lotus corniculatus</i>	7	−94	Y	−9	−89
车前 <i>Plantago agiatica</i>	69	−31	X^2	−34	137
东方草莓 <i>Fragaria orientalis</i>	129	−13	Y^2	−254	422
繁缕 <i>Strllaria media</i>	−1	−30	XY	−117	−151
黑麦草 <i>Lolium perenne</i> L.	−9	11	X^3	−2	9
大叶胡枝子 <i>Lespedeza duvidii</i>	501	136	Y^3	285	−315
湖北裂瓜 <i>Schizopepon diocus</i> Cogn.	79	2	X^2Y	74	−76
火绒草 <i>Leotopodium leotopodiodes</i> (willd.) Beauv	126	−59	XY^2	155	142
风轮草 <i>Clinopodium urticifolium</i> (Hance)	165	17			
C. Y. Wu et Hsuan					
苎草 <i>Arthraxon hispidus</i>	409	93			
狼尾草 <i>Pennisetum alopecuroides</i>	−6	−4			
篱打碗花 <i>Calystegia sepium</i> (L.) R. Br.	−7	23			
卵穗苔草 <i>Carex dnriuscula</i> C. A. Mey	−19	−46			
地丁 <i>Gentiana loureirii</i> (D. Don) Griseb	23	−70			
毛茛 <i>Ranunculas japonicus</i>	129	27			
密叶苔草 <i>Carex maubertiana</i> Boott	−34	−69			
蒲公英 <i>Taraxacum Monogolicum</i>	136	−66			
雀稗 <i>Pasalumthun bergii</i>	−10	−9			
乳白香青 <i>Anaphalis lactea</i> Maxim.	−8	−89			
山莴苣 <i>Lactuca indica</i> L.	−19	42			
四叶 <i>Galium bungei</i> Steud	4	−93			
羊茅 <i>Festuca ovina</i> L.	−38	174			
蝇子草 <i>Limonium bicolor</i> (Bunge) O. Kuntze	−75	21			
肾叶山蓼 <i>Oxyria digyna</i> (L.) Hill	−16	−84			
早熟禾 <i>Poa annua</i>	8	76			
珍珠菜 <i>Lysimachia clethroides</i> Duby	53	−55			

构面上,高值处是与 X^2 、 Y^2 、 XY^2 强烈正相关性的样方,由此可以推断,第二轴集中体现与二次空间关系最密切的斑块动态控制的物种信息。CCA 排序第一轴则集中体现了与空间相关性较高、或由高次空间自相关环境因子控制的物种组合信息。

2.3 群落结构空间趋势和主要环境因子的关系

表 3 数据分析表明,对于群落结构和空间趋势影响最显著的土壤因素是土壤有效磷,和第一群落结构面和第一空间趋势面显著负相关,和第二群落结构面和第二空间趋势面显著正相关。和两排序轴的空间趋势面都显著相关说明土壤有效磷的空间分布具有空间相关性,和两排序轴的物种结构面都显著相关表明它影响物种组合和多度分布,所以土壤有效磷的空间相关分布是物种结构面一定空间相关性的主要原因。该地区其他研究也表明,土壤中的磷含量是草地生产力和物种分布的重要制约因素。除了土壤有效磷外,

表 3 群落结构面、空间趋势面与环境因子的相关关系

Table 3 Corelations between environmental factors with community structural surface and trend surface

项目 Item	Species1	Space1	Species2	Space2
坡度①	0.07	0.09	−0.06	−0.22
土壤 pH 值②	0.08	0.03	−0.07	−0.10
土壤有机质③	−0.24	−0.26	−0.05	−0.05
土壤有效磷④	−0.44 **	−0.35 **	0.39 **	0.47 **
土壤有效钾⑤	−0.19	−0.14	0.11	0.12
土壤有效氮⑥	−0.23	−0.18	0.05	0.03
土壤有效氮⑦	−0.24	−0.28 **	0.01	0.03
土壤有效钾⑧	0.09	0.14	−0.50 **	−0.49 **
土壤有效磷⑨	−0.31 **	−0.21	−0.26	−0.30 **

① Slope, ②pH, ③Organism, ④Effective P, ⑤Effective K, ⑥ Effective N, ⑦Total N, ⑧Total K, ⑨Total P

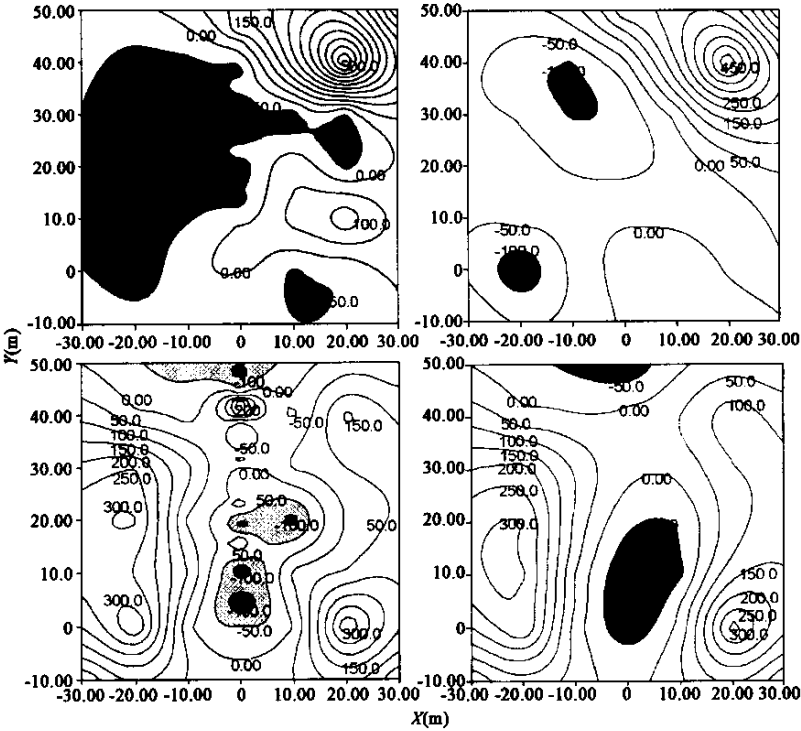


图 2 CCA 第一、第二排序轴得到的群落结构面(a,c)和空间趋势面(b,d)

Fig. 2 Community structural surface and trend surface of CCA Ax1(a,c), Ax2(b,d)

土壤全氮含量对集中体现空间相关性的第一轴空间趋势面有显著的负相关,说明土壤全氮可能存在空间相关分布。土壤全钾和集中体现物种信息的第一轴群落结构面显著负相关,表明土壤全钾影响物种的分布,或者物种的分布可以改变土壤全钾的空间分布。

3 讨论

经典的生态学研究,包括群落结构组建理论,演替理论,区系观点,生物群落的排序与分类研究,都把生物系统所处的物理空间当作生物因素与环境因素相互作用与活动变化的背景,而没有把空间因素看作和环境、生物作用同等重要的生态学过程驱动因子。直到 20 世纪 70 年代,生态空间才被纳入生态学格局与过程的研究范围,在方法上也得到迅速的发展。Legendre 在植被空间数量分析方法方面做了大量开拓性的工作。基于 CCA 排序的空间趋势分析保留了一般趋势面分析的功能,同时利用物种在典范排序轴上的得分,提出了群落结构趋势面的概念,为群落结构与空间、环境关系的研究提供了更直观的方法。该方法适合于群落尺度的趋势研究。

本文分析表明 CCA 排序轴的群落物种结构面可以很好地被仅与样方空间位置有关的空间趋势面方程决定,说明该群落结构由一种具有强烈空间结构化特征的机制控制,例如有些物种及其组合可能受到空间自相关的环境变量影响,而另一些物种的分布则具有斑块化聚集分布。

References :

[1] May R M. An overview: real and apparent patterns in community structure. In: D R Strong ed. *Ecological Communities: Conceptual Issues and the Evidence*. Princeton: Princeton University Press, 1984. 3~16.

[2] Borcard D, Legendre P. Environmental control and spatial structure in ecological community: an example using oribatid mites. *Environmental and Ecological Statistica*, 1994, 1:37~61.

- [3] Legendre P, Fortin M J. Spatial pattern and ecological analysis. *Vegetatio*, 1989, **80**:107~138.
- [4] Borcard D, Legendre P, Drapeau P. Partialling out the spatial component of ecological variation. *Ecology*, 1992, **73**: 1045~1055.
- [5] Meot A, Legendre P, Borcard D. Partialling out the spatial component of ecological variation: questions and propositions in the linear modelling framework. *Environmental and Ecological Statistica*, 1998, **5**:1~27.
- [6] Xiao D N, Bu R C, Li X Z. Spatial ecology and landscape heterogeneity. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, **17**:453~461.
- [7] Legendre P, Legendre L. *Numerical Ecology*. The Netherlands Press, 1998.
- [8] Jongman R H G, Ter Braak C J F, Van Tongeren O F R. *Data analysis in community and landscape ecology*. Cambridge University Press, 1995.
- [9] Li H B, Wu Y G. Quantitative methods in landscape ecology. In: Liu J G, ed. *Advances in Modern Ecology*. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1992. 209~233.
- [10] Kolasa J, Pickett S R A. *Ecological Heterogeneity*. Springer-Verlag: New York, 1991.
- [11] Malanson G P. Spatial autocorrelation and distributions of plant species on environmental gradients. *Oikos*, 1985, **45**(2):278~280.
- [12] Palmer M W. Fractal geometry: a tool for describing spatial patterns of plant communities. *Vegetatio*, 1988, **75**: 91~102.
- [13] Xin X P, Gao Q, Li Y Y, et al. Fractal Analysis of Grass Patches Under Grazing and Flood Disturbance in an Alkaline Grassland. *Acta Botanica Sinica*, 1999, **41**(3): 307~313.
- [14] Wang Z Q. *Application of geostatistics in ecology*. Beijing: Chinese Science Press, 1999.
- [15] Ter Braak C J F. A theory of gradient analysis. In: *Advances in Ecological Research* 18. London: Academic Press Inc., 1988. 271~237.
- [16] Ter Braak C J F. The analysis of vegetation -environment relationships by canonical correspondence analysis. *Vegetatio*, 1987, **69**:69~77.
- [17] Greig-Smith P. *Quantitative plant ecology*, 3rd ed. University of California Press, Berkeley, CA., 1984.
- [18] Ter Braak C J F. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology*, 1986, **67**:1167~1179.
- [19] Legendre P. Quantitative methods and biogeographic analysis. In: Garbary D J, South R R, eds. *Evolutionary biogeography of marine algae of the North Atlantic*. 1989. 9~34.
- [20] Xin X P, Xu B, Li X L. Community Structure and its Relation with Environmental Factors of Sown Grassland in South China. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2000, **13**(4): 449~453.
- [21] Gittins. Trend-surface analysis of ecological data. *Journal of Ecology*, 1968, **56**:845~861.
- [22] Hall J B, Swaine M D. Classification and ecology of closed canopy forest in Ghara. *Journal of Ecology*, 1976, **64**: 913~951.
- [23] Law son G W. The distribution of seaweed floras in the tropical and subtropical Atlantic Ocean: a quantitative approach. *Bot. J. Linn. Soc.*, 1978, **76**:177~193.
- [24] Hayati A A, Proctor M C F. Plant distribution in relation to nutrient availability and uptake on a wet heath site south-west Enland. *J. Ecol.*, 1990, **78**:134~151.
- [25] Mi X C, Shang G T L, Zhang J T, et al. Canonical trend surface analysis and its application in a horizontal pattern analysis of form Hippophae rhamnoides in Shanxi Province. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, **19**(6):798~802.

参考文献:

- [6] 肖笃宁, 布仁仓, 李秀珍. 生态空间理论与景观异质性. *生态学报*, 1997, **17**(5): 453~461.
- [9] 李海滨, 伍业钢. 景观生态学的数量研究方法. 见: 刘建国主编. 当代生态学博论. 北京: 中国科学技术出版社, 1992. 209~233.
- [13] 辛晓平, 高琼, 李宜垠, 等. 放牧和水淹干扰对松嫩平原景观空间格局影响的分形分析. *植物学报*, 1999, **41**(3): 307~313.
- [20] 辛晓平, 徐斌, 李向林. 放牧和刈割条件下草山草坡群落空间格局异质性分析. *应用生态学报*, 2000, **13**(4): 449~453.
- [25] 米湘成, 上官铁梁, 张金屯, 等. 典范趋势面分析及其在山西省沙棘灌丛水平格局分析中的应用. *生态学报*, 1999, **19**(6):798~802.