

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米湘成¹, 上官铁梁², 张金屯², 张 峰²

(1. 湖南农业大学农学系, 长沙 410128; 2. 山西大学生命科学系, 太原 030006)

摘要:介绍一种综合趋势面的分析方法——典范趋势面分析。典范趋势面分析是典范相关分析与趋势面分析的结合, 它克服了趋势面分析的缺陷, 能同时对单母体空间上的多变量进行分析, 拟合一个综合趋势面。通过对山西沙棘灌丛水平格局的分析介绍了典范趋势面分析的应用, 并比较了趋势面分析与典范趋势面分析。

关键词:典范趋势面分析; 趋势面分析; 沙棘灌丛; 水平格局分析

Canonical trend surface analysis and its application in a horizontal
pattern analysis of form. *Hippophae rhamnoides* in Shanxi Province

MI Xiang-Cheng¹, SHANGGUAN Tie-Liang², ZHANG Jin-Tun², ZHANG Feng² (1. Department of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Department of Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: The canonical trend surface analysis (CTSA) was introduced into ecological study. CTSA is the combination of a canonical correlation analysis and trend surface analysis (TSA). The horizontal pattern of Form. *Hippophae rhamnoides* was analyzed with CTSA. The patterns of 6 species was analyzed simultaneously and the result reflected the pattern variation of *Hippophae rhamnoides*, *Rosa Xanthina*, *Ostrgopsis* spp. correctly. The importance value of *Hippophae rhamnoides* increased from southeast to northwest. *Rosa Xanthina* was the main companions in the south and *Ostrgopsis* spp. in the north. The change of formation pattern was reflected with the variation of climate. The result produced by CTSA is better than the combination of DCA and TSA.

Key words: canonical trend surface analysis; trend surface analysis; Form. *Hippophae rhamnoides*; horizontal pattern analysis

文章编号: 1000-0933(1999)06-0798-05 中图分类号: Q948.114 文献标识码: A

趋势面分析(trend surface analysis, TSA)的主要功能是找出研究区域内变量的空间分布格局。TSA由Gittins^[1]引入生态学研究之后, 由于该法简单明了, 计算方便等优点, 在生态学研究中得到了广泛的应用^[2~4]。趋势面分析虽然是一种多元分析的数学工具, 实际上却只能对单一的原始数据进行处理, 基本上是一种一元分析方法。在实际研究中, 往往是对样方内的多个种群或环境因子进行观测, 并对所取得的多项原始数据进行分析处理, 但趋势面分析对信息综合、共同趋势等方面的分析显得无能为力, 因而限制了它的应用。为了避开这个缺陷, 一般先用排序的方法进行信息综合, 再以排序坐标为基础进行趋势面分析^[5]。但是排序过程中生态信息的综合和它们的分布趋势的推算两个完全独立、互不相干的过程, 所以分析结果往往不是很理想^[6]。而且由于排序轴是对整个群落信息的综合, 排序轴的趋势面分析只反应整个群落的格局, 而单个种群对群落格局的影响就无法判定了。Lee^[7, 8]针对这个问题, 提出了典范趋势面分析法(canonical trend surface analysis, CTSA)。所谓“典范趋势面”, 就是应用典范相关分析原理, 同时表现一组

收稿日期: 1997-11-15; 修订日期: 1998-08-29

生态变量共同的空间变化格局。目前国内外尚无把典范趋势面分析引入生态研究的文献,本文试图通过对典范趋势面分析的一些介绍及其在生态学中应用的实例,把该法引入生态研究中。

1 方法及数据来源

1.1 方法

典范趋势面分析是典范相关分析(canonical correlection analysis)和趋势面分析的结合。典范相关分析是一种研究两组变量之间相关关系的一种多元分析方法。典范相关分析的要求是找出诸环境因素 P 个线性组合函数和植物种的 Q 个线性组合函数:

$$U = a_1X_1 + a_2X_2 + \cdots + a_pX_p \quad (1)$$

$$V = b_1Y_1 + b_2Y_2 + \cdots + b_qY_q \quad (2)$$

其中 $a_1, a_2, \cdots, a_p$ 和 $b_1, b_2, \cdots, b_q$ 是待定系数,使得 U 和 V 之间具有最大的相关系数,这个相关系数就是“典范相关系数”(canonical correlation coefficient),它用来度量两个线性函数之间的联系强度,这种方法在生态研究中已有广泛的应用^[9,10]。

典范相关分析揭示了两组“指标”之间的内部联系,而两组指标的内容可以不同,CTSA 就是把典范相关分析的理论和趋势面分析的理论结合起来,对某一研究区域的一组多元相关变量的共同变化规律拟合一个多重趋势面。这个趋势面具有综合趋势与地理坐标之间的最大相关,因此可以求得一组变量在不同地理位置上的变化格局。

典范趋势面分析的基本原理是使一组生态变量和坐标之间的协变量达到最大值,这就意味着典范趋势面是对于一组特定变量的最优曲面。典范趋势面分析的方法证明及计算过程请参考文献^[8~9,11]。CTSA 对被测区的一组多元相关变量的综合效应拟合一个多项式曲面,来拟合单变量观测数据的趋势面值(V),得到两个线性方程:

$$U = a_1x_1 + a_2x_2 + \cdots + a_px_p \quad (3)$$

$$V = f(x, y) \quad (4)$$

(4)式中 x, y 为样方的坐标值。两个综合变量 U 和 V 具有最大相关系数,即典范相关系数 r_1 。倘若 r_1 接近于 1,说明两组变量密切相关,可以建立典型相关变量 U 和 V 的线性回归方程 $U = b_0 + b_1V_1$,因此,可以由自变量(地理坐标 x, y)预报出因变量(多个生态变量的综合趋势)在一个区域上的变化趋势,这样可做出趋势等值图,此即典范趋势面。趋势面并不表示每一条等值线,而是表示多变量的一般趋势。典范变量对地理坐标 X, Y 的函数,可以是一到多次,但样方的数目必须大于多项式的项数减 1。如果第 1 个典范相关系数得不到足够多的空间分布信息,则第 2 个典范相关变量及以后的典范相关变量将提供剩余的一部分信息。

对于实际变量的拟合还可以用拟合度(goodness of fit)表示^[7]。拟合度介于 0 和 1 之间,拟合度越高,越能真实地反映变量的空间变化格局。拟合度越高时,由典范趋势面所拟合研究区域内的格局也就越趋近于实际情况。

1.2 数据的收集

山西是沙棘灌丛的现代分布中心,资源丰富,群集度高,占全国沙棘总面积的近 1/2,成为沙棘的主产区。沙棘在山西常以优势植被类型出现,在山西山地落叶阔叶灌丛中占有重要地位。本文使用的数据来自对山西省境内沙棘灌丛的调查^[12],在沙棘不同的分布区选择典型地段,用 $5\text{m} \times 4\text{m}$ 的样方,调查样方内各个种的多度、高度、盖度等,并记录样方所在地的海拔高度及环境情况,共得 98 个样方。最后对资料进行整理,为分析山西沙棘灌丛分布的水平格局,取各地区基带海拔所在的样方,晋南以 1200m 左右为准,晋北以 1500m 左右为准,主要根据实际分布来选取样方,最后得到 35 个样方,用以分析山西省沙棘灌丛分布的水平规律性。

从沙棘灌丛中的选取 6 个主要种:沙棘(*Hippophae rhamnoides*, sp1)、黄刺玫(*Rosa Xanthina*, sp2)、三裂绣线菊(*Spiraea trilobata*, sp3)、虎榛子(*Ostryopsis* spp., sp4)、灰栒子(*Cotoneaster multiflora*, sp5)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*, sp6)进行 CTSA 分析,分析采用样方中各个种的重要值。重要值=相对高度+相对

多度+相对盖度。得到一个 35×6 的矩阵,用 CTSA 对这个矩阵进行分析,以获得沙棘灌丛的综合格局。然后先用 DCA 对这个矩阵进行排序,再用 TSA 对排序轴进行 TSA 分析,与 CTSA 的分析结果进行比较。其中 CTSA 与 TSA 程序用 FORTRAN 语言编写并通过调试,DCA 采用 CANOCO 软件^[12]的标准程序,等值图用工具软件 GRAFTOOL 完成。

2 结果分析

2.1 6 个种的典范趋势面分析结果

用 CTSA 对沙棘灌丛的 6 个主要种进行分析,经过 3 次迭代,所得的最大典范相关系数是 0.9525。表 1 是 6 个种 3 次典范趋势面分析的迭代结果。从表 1 看,3 次典范趋势面是最适宜的拟合曲面。

6 个种的典范趋势变量可用线性函数表示为:

$$U' = 0.9809sp1 - 0.0624sp2 - 0.1094sp3 - 0.0024sp4 - 0.0895sp5 - 0.1177sp6 \quad (5)$$

多项式典范变量也可用性线函数表示为:

$$V = 0.7479x + 0.4462y - 0.4328x^2 - 0.1953xy - 0.1053y^2 \\ + 0.0453x^3 + 0.0228x^2y - 0.0485xy^2 - 0.0051y^3 \quad (6)$$

表 1 6 个种的典范趋势面的逐次计算结果

Table 1 Record of successive evaluation of order of polynomial for six species

趋势面的次数 Order of polynomial	典范相关系数 Correlation coefficient	拟合度(%) Goodness of fit(%)
1	0.5027	26.705
2	0.7968	80.272
3	0.9525	87.495

典范相关系数为 0.9525,(5)式是 6 个种典范变量线性函数。它对表现单一母体的多变量空间分布的一组趋势面进行了简明的概括。各项系数分别表示各个种的负荷值,它们的平方分别是它们对方差的贡献,贡献值总和为 1。(5)式表明沙棘的负荷值最大,对趋势贡献为 90.626%。CTSA 所得到的图 1a 也主要反映了沙棘种群在灌丛中的变化格局,其它 5 个种的负荷值相对较小,对趋势贡献较小,图中反映不出它们的变化格局。线性函数(6)式

说明了线性函数(5)式方差的 90.72%,后者是 0.9525 的平方。如果仅由第 1 个典范相关系数得不到足够的多变量空间分布的信息,则第 2 个典范相关系数将提供剩余的一部分。3 次典范趋势面的第 2 个典范相关系数是 0.8378,6 个种的第 2 个典范变量是:

$$U = -0.0988sp1 - 0.5939sp2 + 0.2839sp3 + 0.7120sp4 - 0.0359sp5 - 0.2209sp6 \quad (7)$$

多项式的典范变量是:

$$V = 0.1143x - 0.3160y - 0.3286x^2 + 0.7511xy - 0.1168y^2 \\ - 0.0949x^3 - 0.2647x^2y - 0.2894xy^2 - 0.0663y^3 \quad (8)$$

方程(7)主要概括了黄刺玫和虎榛子两个种群的变化格局,它们的负荷值分别是 0.5939,0.7120,两个种群对趋势贡献分别是 35.27%、50.69%。方程(7)中也表现了部分三裂绣线菊和胡枝子的变化格局,但是它们的负荷值比前两个种群要小得多,分别为 0.2839 及 0.2209,对趋势的贡献只有 8.05%和 4.87%,说明了二者在水平地带的沙棘灌丛中只是偶见种。方程(8)概括了(7)式方差中的 70.191%。图 1b 的拟合度为 54.26%。(7)式中黄刺玫和虎榛子都有较大的负荷值,但是符号相反,因而这两个种群在图 1b 中呈相反的方向变化。虎榛子、三裂绣线菊负荷值为正,变化趋势与图 1b 一致;而黄刺玫和胡枝子的符号为负,变化格局与图 1b 表示的趋势大致相反。

从图 1a、图 1b 可以看出沙棘灌丛中,群落的水平格局主要取决于沙棘种群的变化。在晋东南地区沙棘分布虽然面积小,分布零散,但是由于沙棘是晋东南地区分布的海拔相对较高,样地的生境温度较低,因此晋东南地区沙棘在灌丛中的重要值较大;在晋西南、晋中等地区的太岳山、吕梁山及晋西的黄土丘陵区沙棘灌丛中沙棘的主要伴生种是黄刺玫、虎榛子等,伴生种群的重要值也较大,沙棘的优势并不十分明显;随着纬度的增加,气候向干旱、寒冷过渡,面积增大,沙棘群集度和重要值在群落中也逐渐增大;晋西北地区气候更干旱、寒冷,晋西北地区分布面积大,群集度高,沙棘成为灌丛中的单优种。

图 1b 可以看出黄刺玫、虎榛子对群落的格局也有重要的作用。黄刺玫和胡枝子的重要值在灌丛中由

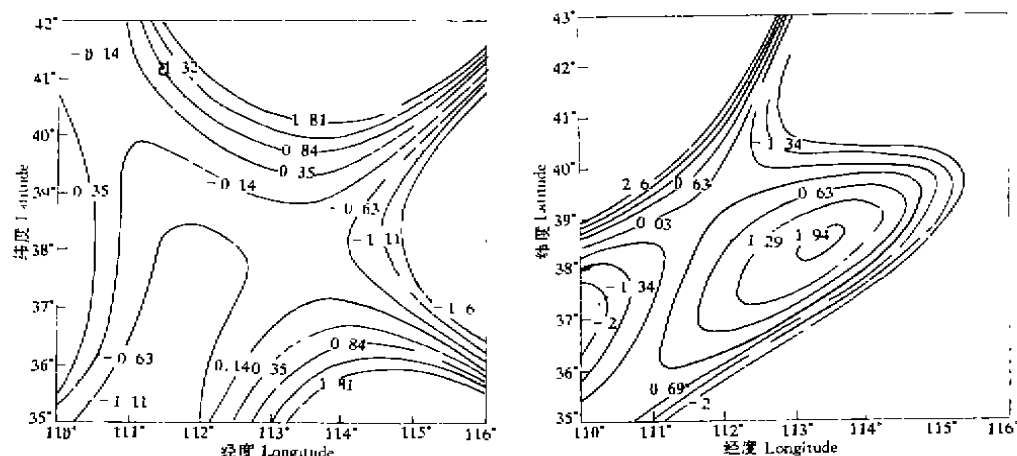


图 1 山西沙棘灌丛水平格局的典范趋势面图

Fig. 1 The canonical trend surface of horizontal pattern of Form. *Hippophae rhamnoides* in Shanxi Province produced by CTSA

a. 第 1 个典范变量的趋势面图 The trend surface of the first canonical variate

b. 第 2 个典范变量的趋势面图 The trend surface of the second canonical variate

西北向东南方向增大,而虎榛子、三裂绣线菊则呈相反的趋势,由东南向西北方向增大,这与实际情况一致:以黄棘玫、胡枝子为主要伴生种的沙棘灌丛分布在晋南的中条山、太行山南部、太岳山等地区;以虎榛子、三裂绣线菊为主要伴生种的沙棘灌丛主要分布在晋北的五台山、恒山、太行山北段和晋西黄土丘陵区等地区。

从图 1a、b 也可以看出山西沙棘灌丛群落格局的变化。由于山西整个地势由东南向西北成台阶式上升,又由于山西太行山、五台山及吕梁山的阻挡,温度及降水量都由东南向西北递减。沙棘作为先锋植物,具有耐寒、耐旱、耐贫瘠的广幅生态种,所以山西沙棘灌丛受水热条件和南北地势的综合作用,总体分布特点表现南部面积小,分布零散,群集度较低;晋西、晋西北、晋北黄土丘陵区和中、北部山地,分布集中连片,面积大,群集度也高,在晋东南由于受暖湿气候的影响,沙棘灌丛的类型主要是沙棘+黄刺玫灌丛,灌丛中的伴生种较多,沙棘的重要值一般在 80~100 之间,该类型主要分布在山西的落叶阔叶林地带,五台山、恒山及太行山北段主要分布着沙棘+虎榛子灌丛及沙棘+三裂绣线菊灌丛。由于沙棘+绣线菊灌丛分布在海拔较低的河谷和黄土缓坡丘陵中、下部,在该地区基带分布较少,所以对群落的水平格局影响不大。沙棘+虎榛子灌丛中,沙棘的重要值一般在 100~150 左右,群落中的伴生种减少。在恒山以北的晋西北、晋西北地区沙棘往往形成单优群落。

3 讨论

为了验证本文的分析结果,并比较 CTSA 与 TSA,对以上 6 个种首先用 DCA 进行信息综合,DCA 第一轴的特征值为 0.2629,综合了整个信息量的 92.6%,然后用 DCA 第一轴进行 TSA 分析,得到 3 次趋势面图(如图 2),趋势面的拟合度为 33.06%。与沙棘灌丛的实际分布相比较,图 2 大致反映了沙棘灌丛中沙棘从晋东南到晋西北的主要变化趋势用 DCA 第二轴所作的 TSA 分析,由于 DCA 第二轴综合的信息较少,所得出的结论模糊,这里不予列出。

从以上的比较可以看到,与 TSA 比较,CTSA 具有以下优点:

(1)能同时对研究区域内的多个变量进行分析,对多变量空间分布的一组趋势面进行简明的概括。

(2)CTSA 通过 1 次计算就可以得出群落的分布格局,群落中主要种群的分布格局及各种群对群落的负荷值、贡献值,由负荷值可以直接看出种群在群落中的地位,结果直观、明了;TSA 对群落中各种群的分布格局需要进行多次计算,并需要根据实际情况对种群在群落中的作用进行分析。CTSA 计算量小,且得到的信息量大。在群落不复杂的情况下,CTSA 提供的群落格局变化比 DCA 与趋势面合用的结果要好。

(3)CTSA 由于空间分布与趋势面分析相结合,对群落格局的拟合程度高,而利用排序与趋势面结合对群落格局的分析,由于排序计算与空间分布的隔离,所得的趋势面图往往有些形变。如本文中用 CTSA 对沙棘灌丛的格局进行分析,拟合度为 87.495% 而用 TSA 对沙棘灌丛的格局进行分析,只能拟合排序信息的 33.06%。

理论上,每次典范趋势面分析可以处理任意数目的变量,但若同时分析许多变量,则对所得结果解释变得困难得多, Lee^[7] 曾建议变量数目以不超过 4 个为宜,这也限制了典范趋势面分析的应用。但从本文的实例来看,只要能解释清楚就可以多于 4 个。针对这个问题, Lee^[8] 又提出了最优预测成图法 (the most predictable surface mapping technique, MPS), 以解决这个问题。MPS 和 CTSA 原理大致相似,在计算步骤上主要的不同是,首先可以用许多变量同时参加分析,作出等值图,要以根据已有的理论和认识,检验等值图,剔除一些变量。反复这个过程就可以选择到少数适合的变量,得到较为满意趋势面。本文中对沙棘灌丛的分析就可以考虑采用这种方法,删除 6 个种中的灰胡

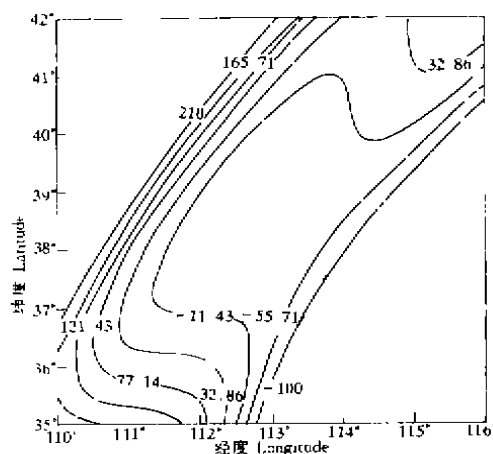


图 2 山西沙棘灌丛水平格局 DCA 排序趋势面图

Fig. 2 The trend surface of the first DCA axis of Form. *Hippophae rhamnoides* in Shanxi Province

参考文献

- [1] Gittins. Trend-surface analysis of ecological data. *J. Ecol.*, 1968, **58**: 845~861.
- [2] Hall J B & Swaine M D. Classification and ecology of closed canopy forest in Ghara. *J. Ecol.*, 1976, **64**: 913~951.
- [3] Lawson 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.
- [4] Hayati A A & Proctor M C F. Plant distribution in relation to nutrient availability and uptake on a wet heath site south-west England. *J. Ecol.*, 1990, **78**: 134~151.
- [5] 张金屯. 植被数量生态学的方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1995. 294~298.
- [6] 张启锐. 地质趋势面分析. 北京: 科学出版社, 1990. 57~304.
- [7] Lee P J. The theory and application of canonical trend surfaces. *J. Geol.*, 1969, **77**: 303~318.
- [8] Lee P J. The most predictable surface mapping method in petroleum exploration. *AAPG Bulletin.*, 1981, **29**: 224~240.
- [9] 李兴东. 典范分析在黄河三角洲莱州湾滨海区盐生植物研究中的应用. *植物生态学与地植物学学报*, 1998, **12** (4): 300~305.
- [10] 夏冰, 等. 典范分析在江苏沿岸带盐土植物排序中的应用. *应用生态学报*, 1991, **2**(3): 264~268.
- [11] 王学仁. 地质变量的多元统计分析. 北京: 科学出版社, 1982. 40~286.
- [12] 上官铁梁, 等. 山西沙棘丛的群落学特征及合理利用. *武汉植物学研究*, 1996, **14**(2): 153~160.
- [13] Braak C J F. ter. CANOCO-a FORTRAN program for canonical community ordination by [partial][canonical] correspondence analysis, principal components analysis and redundancy analysis (Version 2.1). Agriculture Mathematics Group. The Netherlands, 1988.