

黄土高原地区植被与气候的关系

李 斌^{1,2}, 张金屯¹

(1. 山西大学黄土高原研究所, 太原 030006; 2. 太原理工大学环境工程系, 太原 030024)

摘要:利用地理信息系统技术结合典范对应分析和数量区划的方法,研究了黄土高原地区植被与气候之间的关系。排序结果表明:CCA 的第一轴代表黄土高原植被和气候梯度的纬向性变化,水分梯度是决定植被分布的最主要气候因子,热量梯度中的全年月平均最低气温、月平均最高气温、年均温也对植被的纬向性分布有较大的影响,黄土高原植被与气候梯度表现出明显的纬向性;CCA 的第二轴代表黄土高原植被和气候梯度的经向性变化,热量梯度是决定植被经向性分布的最主要气候因子,水分梯度中的全年最大蒸散量对植被的经向性分布有较大的影响。黄土高原植被与气候梯度表现出明显的经向分布规律性。

关键词:黄土高原; 地理信息系统; 典范对应分析; 植被分析; 气候因子

Analysis of relationships between vegetation and climate variables in Loess Plateau

LI Bin^{1,2}, ZHANG Jin-Tun¹ (1. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006; 2. Department of Environmental Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(1): 82~89.

Abstract: Many ecological methods are available in micro-scale studies, however, the studies in Loess Plateau use landscape scale. Quantitative ecological method is a group technique of multivariate analyses and becomes more and more important in vegetation studies. Geographical Information System (GIS) can not only store and manage spatial data, but also provide easy ways of spatial analyses, which may meet the demands of ecological researches in landscape scale with a lot of spatial data. A new technique combining GIS and quantitative ecological method is presented in this paper.

The relationships between vegetation and climatic variables in Loess Plateau are analyzed by using GIS combining the canonical correspondence analysis (CCA). Loess Plateau, situated at E100°52'~114°33', N33°41'~41°16', is a part of Northwest China. For a long time, severe erosion not only has produced a great impact to agriculture in this area, but also silted up the reservoirs and riverbeds in the lower reaches, so it has been becoming the most important cause seriously damaging the ecological system of the Loess Plateau and the near areas. Loess Plateau is the basis of the GIS to produce electronic pool of vegetation maps of Loess Plateau. Two methods were adopted: Digitization Method and Analytical Method. Loess Plateau is divided into 257 districts by using the net of altitude 30' and longitude 30' in the diagram of Loess Plateau vegetation types. It includes 171 vegetation types. Based on climatic materials in the Loess Plateau, 9 climatic variables are selected. Vegetation data matrix of 257×171 and climatic data

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30070140)

收稿日期:2001-08-05; **修订日期:**2002-02-10

作者简介:李 斌(1972~),男,山西太原人,博士生,讲师。主要从事环境生态学研究。libin_1429@163.com

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China(37000140)

Received date:2001-08-05; **Accepted date:**2002-02-10

Biography: LI Bin, Ph. D. candidate, Lecturer, Major research field in environmental ecology. libin_1429@163.com

matrix of 257×9 are got by using Digitization Method and Analytical Method. Ordination is a group technique of multivariate analyses and becomes more and more important in vegetation studies. Many ordination methods are available in modern ecology, however most of them analyze vegetation composition only. Based on Reciprocal Averaging (RA), this method is named CCA. It combines vegetation data and environment data by the way of multi-regression. CCA is applied to the study of the relationships between vegetation and climate in Loess Plateau. The outcome illustrates that CCA describes the relationships between vegetation and climate clearly and is an effective and time-saved methodology. The ordination results are as follows; the results of ordination indicate that the geographical distribution of vegetation in Loess Plateau is closely related to ecological gradients, i. e. to climate variables. The first CCA axis express the variation of vegetation and climate along latitude in Loess Plateau. It shows the variation of temperature and water-conditions. Moisture is the main factor that decides the latitude distribution of vegetation. In addition, the monthly mean lowest temperature, the monthly mean highest temperature, and annually means temperature also play an important role in latitude distribution. There are obvious trends in longitude for vegetation and climate distribution in Loess Plateau. The second CCA axis express the variation of vegetation and climate along longitude in Loess Plateau. It illustrates the gradient of temperature and water-conditions as well, however the latter more apparent, and it also illustrate the effects of elevation. Temperature is the main factor influencing longitude distribution of vegetation, and the maximum evaporation is also important. The distribution of vegetation and climate variables along longitude is obvious. The vegetation of Loess Plateau is regionized by TWINSpan (Two-way indicator species analysis). Four vegetation regions and five sub-regions of Loess Plateau are recognized by TWINSpan. From southeast to northwest, the four vegetation regions are forest region, forest-steppe region, temperate steppe region, desert and semi-desert region. Two sub-regions of forest region are warm temperate deciduous forest sub-regions and temperate deciduous forest sub-region. The temperate steppe region includes three sub-regions: Meadow steppe sub-region, typical steppe sub-region and desert-steppe sub-region. Vegetation types also vary from warm temperate forests to desert and semi-desert vegetation.

The results presented have clearly demonstrated the diversity of the vegetation and climatic variables and the relationships between vegetation and climatic variables. The distribution of vegetation is based on very complicated relationships between vegetation and climatic variables. This study of the relationships between vegetation and climate in Loess Plateau by combination of GIS and quantitative ecological method in landscape scale is the first trial in this field. The ordination releases the relationships between vegetation and climate successfully. The result suggests that this way is very effective. It can provide scientific evidences for the protection, utilization, recovery and reconstruction of vegetation in Loess Plateau.

Key words: Loess Plateau; geographical information system; canonical correspondence analysis; vegetation analysis; climatic factors

文章编号: 1000-0933(2003)01-0082-08 中图分类号: Q948.1 文献标识码: A

随着计算机的普遍应用,处理数据能力的剧增,植被与环境关系的分析方法也由较简单的统计学方法,发展为能处理大型数据的多元分析方法,如对应分析(Correspondence Analysis, CA)、典范分析(Canonical analysis)、除趋势对应分析(Detrended Correspondence Analysis, DCA)等,它们都曾在我国植被和环境的关系分析中进行过应用^[1-4]。近年来专为植被与环境关系分析而设计的典范对应分析(Canonical correspondence analysis, CCA)和除趋势典范对应分析(Detrended Canonical Correspondence Analysis, DCCA),由于能同时结合多个环境因子,包含的信息量大,结果明确、直观、效果好等优点而受到

重视^[9]。而黄土高原作为景观是一个宏观系统,其观测尺度要比生态学其它分支(如生态系统生态学)大得多,大量空间数据的获取、分析和处理是景观尺度研究的重要特征。地理信息系统具有对空间数据的存贮和管理能力,还提供强大的空间分析手段,利用地理信息系统技术和数量生态学方法研究黄土高原景观尺度上植被与气候的关系,满足了现代生态学往往要研究大量的庞杂的空间信息的要求。本文试图用地理信息系统技术结合 DCA、CCA、DCCA 等排序方法,研究黄土高原地区植被与气候之间的关系。以期为黄土高原地区的植被保护、合理利用、恢复与重建,为西部大开发提供科学依据。

1 数据的收集

黄土高原位于东经 100°52′~114°33′,北纬 33°41′~41°16′,具大陆性气候特征,从东南向西北,依次为湿润半湿润暖温带、半湿润半干旱温带、干旱半干旱温带气候区。黄土高原地区地势西北高东南低,海拔一般在 1000m 以上,最高点位于祁连山脉的冷龙岭,海拔 5254m,最低点在河南省荥阳县境内,仅 98m,高度悬殊。黄土高原地区气候和地形的特点造成水热条件的显著差异,与之相适应的植被类型复杂多样,黄土高原植被有 11 个植被型组,23 个植被型,171 个群系。这 11 个植被型组分别是针叶林、阔叶林、灌丛、草丛、草原、草甸、荒漠、沼泽、沙生植被、栽培植被、荒漠及高山稀疏植被。植被类型自东南向西北,依次为森林植被、森林草原植被、温性草原植被、荒漠半荒漠植被,将《黄土高原植被类型图》(1:50 万)^[9]利用数字化仪输入计算机,根据需要对各类要素进行增、删、编辑,并在特征属性表中增加关键的对应数据项,使空间数据与外部属性库建立起严格一致的关联^[10]。依经纬网格将黄土高原分成经度为 30′,纬度为 30′的小区,面积不足标准小区 50%的边界上的小区合并到相邻的小区中,共得 257 个小区,即为研究的实体,将植被图上各植被类型的实际面积作为实体的属性,利用 GIS 的基本功能通过图形量算得到植被数据。这样得到 257×171 的植被数据矩阵。

气候数据引用小区所在县(市、区)或邻近县(市、区)的气象资料,选用 9 个气候因子,即年平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温、全年日照时数、全年最大蒸散量、无霜期、≥10℃积温、年降水量、平均风速,这样就可以得到 257×9 的气候数据矩阵。

以上两个数据矩阵用于植被与气候关系的排序分析。

2 数量分析方法

排序应用 DCA、CCA 和 DCCA 等,其中 CCA 和 DCCA 是专为分析环境与植被间关系而设计的。CCA 是由 CA/RA 修改而产生的新方法。它是把 CA/RA 和多元回归结合起来,每一步计算结果都与环境因子进行回归,而详细地研究植被与环境的关系^[11-13]。

全部数据采用北京资信电子技术开发公司研制的地理信息系统基础软件(View GIS 2.5)和北京长地数字化仪公司的 CD-9600L 型数字化仪输入,再用 VESPAN 软件包和 CANOCO 软件包的标准程序进行分析。

3 植被与气候关系的排序结果分析

DCA、CCA 和 DCCA 等 3 种排序方法对黄土高原植被与气候关系的分析结果一致。表 1 是 DCA、CCA 和 DCCA 3 种方法所得前 3 个轴的特征值及植被类型排序轴与环境排序轴之间的相关系数。从表 1 可以看出,DCA 前 3 个轴的特征值较高,表明它的对植被区之间的关系分析较好;但是 CCA 和 DCCA 所得的植被类型排序轴和环境排序轴之间的相关系数较高,表明 CCA 及 DCCA 的排序轴与环境因子的相关性较高,即它们对植被与气候之间的关系分析较好^[11]。本文分析数据庞大,由于篇幅所限这里仅列出 CCA 的分析结果(图 1,图 2)。

对植被数据矩阵先用 TWINSpan 分析对 257 个小区进行分类,实际上是对黄土高原植被区进行划分。结果黄土高原被划分为 7 个植被区:Ⅰ₁,暖温性落叶阔叶林亚区;Ⅰ₂,温性落叶阔叶林亚区;Ⅱ,森林草原区;Ⅲ₁,典型草原亚区;Ⅲ₂,荒漠化草原亚区;Ⅲ₃,草甸草原亚区;Ⅳ,荒漠半荒漠植被区。

接下来用 CCA 分析方法,把植被数据矩阵和气候数据矩阵结合起来。图 1 是黄土高原植被区 257 个小区的 CCA 排序图。因为 CCA 排序结合了气候因子,其应反映出气候因子的作用。在排序图中各气候因子符号的意义为:AMT,年平均气温;MHT,月平均最高气温;MLT,月平均最低气温;ASH,全年日照时

数: AME , 全年最大蒸散量; FP , 无霜期; AT , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温; AP , 年降水量; MWS , 平均风速。图中, 环境因子用箭头表示, 箭头连线的长短表示植被区或植被类型的分布与该因子关系的大小, 如全年最大蒸散量对植被分布的影响明显大于全年日照时数, 无霜期对植被分布的影响略大于 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温。箭头连线与排序轴的角度表明环境因子与该排序轴相关性的强弱, 如月平均最高气温距第一轴远比第二轴近, 说明它对第一轴的影响远比第二轴的影响大。箭头所处的象限表示环境因子与排序轴的正负相关关系。所以 CCA 的排序图直观地反映了植被与环境之间的关系。

从表 1 可以看出, CCA 排序轴与环境因子的相关性较高, 第一排序轴达到 0.933, 第二排序轴达到 0.888。进一步分析(从图 1)可以看出, 气候因子中对第一轴影响最大的是热量和水分因子, 热量因子中的月平均最高气温($AX_1 = 516$)、月平均最低气温($AX_1 = 525$)、年平均气温($AX_1 = -269$)对第一轴都有较大的影响; 水分因子中的年降水量($AX_1 = 903$)对第一轴的制约作用也较明显。其它如全年日照时数、全年最大蒸散量、无霜期、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、平均风速对第一轴的作用就较小。沿 CCA 第一轴由右至左, 月平均最高气温、月平均最低气温、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、无霜期等热量指标以

及降水量依次递减, 年平均气温、全年最大蒸散量、全年日照时数增加, 植被区也由暖温带落叶阔叶林亚区 I_1 ($AX_1 = 203 \sim 213$)、温带落叶阔叶林亚区 I_2 ($AX_1 = 156 \sim 131$) 和森林草原区 II、典型草原亚区 III_1 过渡到荒漠半荒漠植被区 IV ($AX_1 = -103 \sim -175$)。由于黄土高原地域辽阔, 南北跨度大, 这种趋势非常明显, 代表黄土高原从半湿润的森林草原植被区到半干旱的荒漠半荒漠植被区的递变系列。CCA 第一轴代表黄土高原植被和气候的纬向性变化。CCA 第二轴代表黄土高原植被的经向性变化。气候因子中对第二轴影响最大的是热量、水分因子和大风。热量因子中的全年日照时数($AX_2 = -172$)、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温($AX_2 = -623$)对第二轴有较大的影响; 水分因子中全年最大蒸散量($AX_2 = -591$)对第二轴的制约作用也较明显。平均风速($AX_2 = -539$)对第二轴有较强的制约作用。其它如年平均气温($AX_2 = -188$)、年降雨量($AX_2 = 297$)、月平均最高气温($AX_2 = 25$)对第二轴的作用就比较小。沿 CCA 第二轴由下向上, 全年最大蒸散量、全年日照时数、无霜期、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温依次降低, 月平均最低气温、年降水量增加。同时在西部由于青藏高原的隆起, 山势高耸, 且加以地势南高北低, 南依高山, 北面向大陆干旱的中心。植被地带分布的正常格局被破坏, 无法充分展现。从总体趋势看, 植被区也由暖温带落叶阔叶林亚区 I_1 ($AX_2 = -29 \sim -1$)、温带落叶阔叶林亚区 I_2 ($AX_2 = -37 \sim 17$)、草甸草原亚区 III_3 ($AX_2 = 75 \sim 413$)、典型草原亚区 III_1 ($AX_2 = -43 \sim 93$) 过渡到荒漠化草原亚区 III_2 ($AX_2 = -134 \sim -17$)、荒漠半荒漠植被区 IV ($AX_2 = -164 \sim -16$)。由于黄土高原东西方向跨度大, 导致经向上植被和气候的变化梯度也较明显, 所以沿第二轴变化梯度也较大。

中国大陆西北部的黄土高原, 属中国东南季风往西北大陆性气候的过渡地带, 区内光热资源优越, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 期间的太阳总辐射为 $40 \times 10^8 \sim 48 \times 10^8 \text{J}/\text{m}^2$, 这比热量状况相当的我国东北地区 $30 \times 10^8 \sim 40 \times 10^8 \text{J}/\text{m}^2$, 高 $8 \times 10^8 \sim 10 \times 10^8 \text{J}/\text{m}^2$ 。同时由于处在东南季风与西北大陆性气候的过度地带, 因此, 年降水量较少, 即使本区东南部多雨地带的年降水量, 也不过 600 余 mm, 往西北至银川平原减少到 200mm 左右。又因大气干旱、风大; 农田最大蒸散量较高, 除了区域西部, 大多数地区高达 800~1000mm。年降水量与年最大蒸散量之间所构成的这种极不平衡的条件下, 土壤水分亏缺量就必然很大, 如在东南部半湿润地区, 提亏量 200~400mm, 往西北到半干旱地区增大到 400~500mm, 再往西北至宁夏平原半干旱气候地区, 增加到 700mm 以上。这种土壤水分亏缺极其严重的现象, 引起自然植被的变化。自然植被从区域东南部半湿润的森林植被区, 森林草原区(干燥度 1.00~1.99), 往西北转变成轻半干旱的典型草原亚区(2.00~2.99)、重半干旱的荒漠草原区(3.00~3.99)和干旱的荒漠半荒漠植被区(>4.00)。

表 1 DCA、CCA 和 DCCA 排序轴特征值及排序轴与环境排序轴之间的相关系数

Table 1 Eigenvalues and vegetation-environment coefficients for the first three axes using of DCA, CCA and DCCA

Axes	第一轴 1	第二轴 2	第三轴 3
特征值 Eigen values			
DCA	0.837	0.567	0.385
CCA	0.708	0.525	0.298
DCCA	0.708	0.478	0.102
植被排序轴与环境排序轴之间的相关系数 Vegetation-environment correlations			
CCA	0.933	0.888	0.780
DCCA	0.935	0.892	0.706

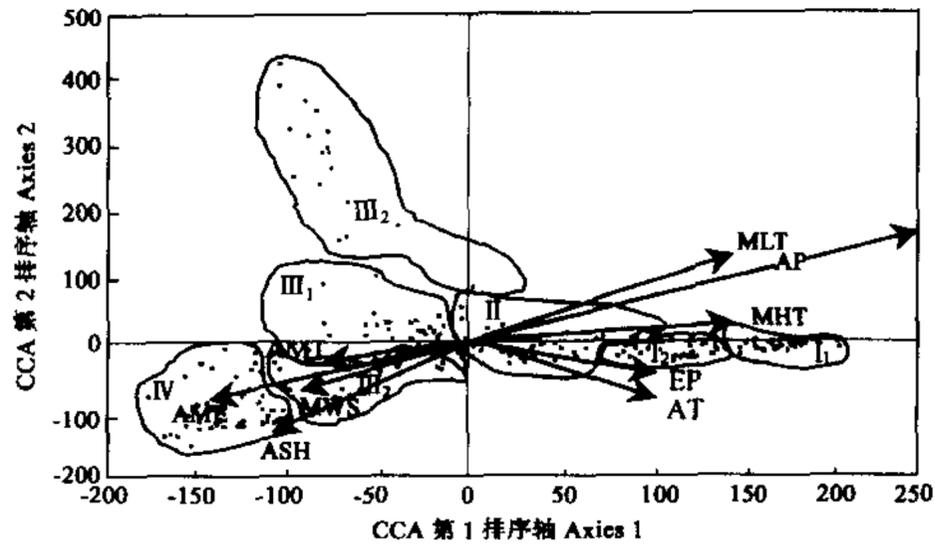


图1 黄土高原 257 个小区与气候因子的 CCA 排序

Fig. 1 CCA ordination diagram of 257 district combined with climatic variables

I₁ 暖温性落叶阔叶林亚区 Warm temperate deciduous forest sub-region; I₂ 温性落叶阔叶林亚区 Temperate deciduous forest sub-region; I 森林草原区 Forest-steppe region; II 典型草原亚区 Typical steppe sub-region; III₁ 荒漠化草原亚区 Desert-steppe sub-region; III₂ 草甸草原亚区 Meadow steppe sub-region; IV 荒漠半荒漠植被区 Desert and semi-desert region

图2是黄土高原植被类型的CCA二维排序图,从171个植被类型中选择了指示植被类型和主要的植被类型表示在图上。从图中可明显地看出与气候梯度相关的植被类型的生态梯度。图中CCA的第一轴、第二轴代表的生态意义与图1相同,箭头代表的气候因子与图1相同。各种植被类型与气候因子的关系都在图上得到表现。如耐寒抗旱的柠条灌丛($AX_1=154, AX_2=-8$),百里香灌丛($AX_1=-15, AX_2=-44$),克氏针茅草原($AX_1=-62, AX_2=21$),达乌里胡枝子草原($AX_1=4, AX_2=16$),杨树林($AX_1=8, AX_2=-29$);喜阴温耐寒的白桦林($AX_1=31, AX_2=-8$),青杆白杆林($AX_1=-1, AX_2=-42$),喜暖的华山松林($AX_1=-15, AX_2=-47$),栓皮栎林($AX_1=-14, AX_2=-136$),黄栌灌丛($AX_1=-51, AX_2=-31$),连翘灌丛($AX_1=-27, AX_2=-10$);喜温湿的鹅耳栎杂木林($AX_1=19, AX_2=-22$)等。

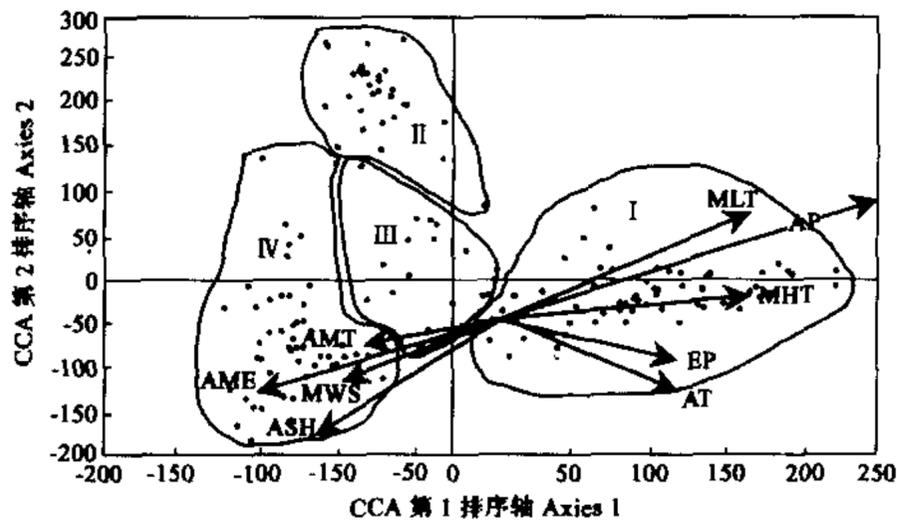


图2 黄土高原主要植被类型与气候因子的 CCA 排序

Fig. 2 CCA ordination diagram of principal vegetation types combined with climatic variables

I 森林植被 Forest vegetation; II 森林草原植被 Forest-steppe vegetation; III 温性草原植被 Temperate steppe vegetation; IV 荒漠半荒漠植被 Desert and semi-desert vegetation

黄土高原所在的地理位置和自然条件决定了本区植被生存环境的复杂性和多样性。在 63 万 km² 的范

围内,既有沿着广大的黄土高原面展现的水平地带性植被,也有依据山地环境而逐步更替的垂直地带性植被。加上黄土丘陵地貌造就的沟壑生境,使本区的植被类型及植被的组合结构更加多样化。同时,本区的北部跨入内蒙古草原植被区,西北部进入常绿阔叶林区相邻,西部又向青藏高原过渡。因此,本区的植被不仅复杂多样,而且各种不同区系地理成分的建群种构成的植物区系更加丰富多彩。

黄土高原地区的主要地带性植被类型:暖温性落叶阔叶林植被、温性落叶阔叶林植被、典型草原植被、荒漠化草原植被、草甸草原植被、荒漠半荒漠植被在 CCA 排序图上有规律地分布,从右向左,植被型由暖温性落叶阔叶林植被、温性落叶阔叶林植被、森林草原植被、温性草原植被过渡到荒漠半荒漠植被。由下而上,植被类型体现了草原植被的再分划。植被类型由荒漠化草原、典型草原向草甸草原发展。

表 2 CCA 排序轴与气候因子之间的相关性分析

Table 2 Canonical coefficients and correlation coefficients between CCA ordination axes and climatic variables

气候因子 (Climatic variables)	相关系数 Correlation coefficients			典范系数 Canonical coefficients		
	第一轴	第二轴	第三轴	第一轴	第二轴	第三轴
	axe 1	axe 2	axe 3	axe 1	axe 2	axe 3
年均温 Annual mean temp. (°C)	0.2512	-0.1671	0.2121	-0.0510	-0.0680	0.0380
月平均最高气温 Mean highest temp. (°C)	0.4820	0.0225	-0.5100	0.0620	-0.0150	-0.9230
月平均最低气温 Mean lowest temp. (°C)	0.4897	0.2709	-0.4822	-0.0850	0.5970	-0.5290
全年日照时数 Annual sunshine-hours(h)	-0.4082	-0.6401	0.0139	0.0220	-0.3270	-0.1670
全年最大蒸散量 Annual maximum evaporation(mm)	-0.4994	-0.3250	-0.2266	-0.2440	-0.0680	0.0270
无霜期 Frost-free period(d)	0.3900	-0.4553	-0.3365	0.1130	-0.3880	-0.0280
≥10℃ 积温 Accumulated temp(°C)	0.4349	-0.5530	-0.2956	0.3550	-0.5320	0.5060
年降水量 Annual precipitation(mm)	0.8425	0.2638	0.1510	0.7830	-0.1290	0.3380
平均风速 Mean wind speed(m/s)	-0.3084	-0.4788	-0.2178	0.1250	-0.0710	-0.5340

表 2 是气候因子与排序轴之间的相关系数和典范系数。典范系数是指环境因子数据与植被数据结合时,以多元回归求得的多个环境因子的回归系数,它说明了排序轴与环境因子直线结合的程度,实际上也反映了环境因子与排序轴的关系^[11,12]。从表 2 可以看出和第一轴相关性较大的主要是热量和水分因子,热量因子包括月平均最低气温、月平均最高气温、≥10℃ 积温、无霜期、年均温、全年日照时数;主要是低温限制了暖温带植被向北的分布,年平均 8℃ 气温等值线大致经过原平、离石、神木、榆林、志丹、华池、环县、平凉、泾源等地。此线以南为暖温带,以北为温带。气温的影响,使黄土高原植被表现出了明显的纬向地带性分布。水分梯度中年降水量和第一轴相关性也较大,年降水量自南向北递减,使得植被从半湿润的森林草原植被区到半干旱的荒漠半荒漠植被区的过渡。热量因子中和第二轴相关性较大的有全年日照时数、积温,水分因子中对第二轴制约较大的是全年最大蒸散量,此外平均风速对第二轴也有较强的制约作用。光热资源优越,但降水量少,蒸散量大,农田水分亏缺十分严重,大风是引起风蚀的主要气象因子,大风、降水量、降水强度等综合因子对黄土高原土壤侵蚀的影响很往西北转变成轻干旱的典型草原亚区、重半干旱荒漠化草原亚区和干旱的荒漠半荒漠化植被区。表 2 中的相关系数与图 1、图 2 排序结果的结合分析可以得出较为满意的结果。

表 3 是环境因子之间的相关系数,从表 3 可以明显地看出全年日照时数和全年最大蒸散量相关性较大,相关系数达 0.6276,全年最大蒸散量和平均风速相关性较大,相关系数达 0.7658,年降水量和全年最大蒸散量相关性较大,相关系数达 -0.6484。这是由于黄土高原地区,光热资源优越(如前所述),导致大气干旱,同时由于区内大风日数较多,在区域东南部约 5~10d,由此往西北增加,到了西北半干旱地区,一般在 25d 以上,使得土壤最大蒸散量较高,除了区域西部,大多数地区高达 800~1000mm,由于本区处在东南季风与西北大陆性气候的过渡地带,因此降水量较少。年降水量与年最大蒸散量之间所构成的这种不平衡的条件下,土壤水分亏缺量就必然很大,导致气候干旱,其结果是:本区不但年降水量不大,且降水强度也不大,如区域西北部为半干旱地区,年平均 >50mm 的雨日 <0.5d,由此向东南虽有增加,但是,即使到达区

域东南部的多雨地带,也不过 2d。表 3 与表 2 相互应衬,它们的结合分析结果较好。

4 讨论与结语

(1) 植被与气候的 CCA 结果表明:黄土高原植被在地理分布上具有较强的地带规律性,这种分布与气候梯度之间的关系十分密切。纬向上,生态梯度中主要的制约因子是热量和水分因子,热量因子中的月平均最低气温、月平均最高气温、年均温对植被纬向分布都有很大的限制作用;水分因子中的年降水量对植被纬向分布的限制作用也较大。第一排序轴明确地反映了黄土高原的水热条件,即排序图从左向右,温度逐渐增高,降水量逐渐增加。由于黄土高原南北跨度大,沿南北方向气候的变化明显,使黄土高原植被表现出明显的纬向性递变;在经向上,生态梯度中主要的制约因子是热量因子、水分因子和风因子,热量因子中的全年日照时数、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、无霜期对植被经向分布都有很大的制约作用;水分因子中的全年最大蒸散量对植被经向分布的限制作用也较大。第二轴主要反映了植被区及植被类型的垂直分布,也就是排序图由下而上,海拔逐渐升高,因此水热条件也随之发生变化,植被区及植被类型主要体现了草原区域及草原植被的再分划,即由下而上,植被区由荒漠草原亚区向典型草原亚区再向草甸草原亚区发展。植被类型由荒漠草原植被向典型草原植被再向草甸草原植被发展。由于黄土高原地域广阔、东西跨度大,使黄土高原植被表现出明显的经向性递变。由于本区处在东南季风与西北大陆性气候的过渡地带,黄土高原的植被在气候、地貌等因素共同作用下,自东南向西北,从湿润的森林植被区过渡到干旱的荒漠半荒漠植被区。植被类型也由湿润的暖温性落叶林植被过渡到干旱的荒漠半荒漠植被。

DCA、CCA 和 DCCA 结合使用对黄土高原植被及气候因子进行排序比单独用 DCA 效果要好。用 CCA 分析,不仅对植被分异有明确的环境解释,而且分析过程简单直观。

(2) 本文在景观尺度上对黄土高原植被与气候的关系进行分析。大气候的变化受地貌、地形等的影响较小,因此植被与气候关系十分密切,分析结果较为满意。本文又是在黄土高原区域尺度上对植被与气候关系进行分析的首次尝试,利用 DCA、CCA、DCCA 的研究结果能较好地反映黄土高原植被的生态梯度。

(3) 应用 DCA 虽然也能完成植被与环境关系的分析,但在排序完成之后需要将环境因子的变化以数值等级或等值线的形式表示在排序图上,或借用相关分析或回归分析来实现。而 DCCA 和 CCA 在完成排序之后,一切关系都已经很明显了,因此 CCA 和 DCCA 大大简化了植被与环境关系的分析过程。尤其是国际通用软件 CANOCO 将种和样方排序值、环境因子与排序轴间的相关系数等分析一次完成,比 DCA、CA 等用于环境与植被关系分析具有明显的优越性。

(4) 植被与气候关系的分析受尺度影响很大。景观是一个宏观系统,其观测尺度要比生态学其它分支(如生态系统生态学)大得多,而且它是一个异质性等级系统,许多常用的生态学方法和手段是为研究同质性系统而提出和发展的,不适于景观尺度研究,此外,大量空间数据的获取、分析和处理是景观尺度研究的重要特征。利用地理信息系统技术和数量生态学方法研究黄土高原景观尺度上植被与气候的关系,解决了上述的问题,取得了较为满意的结果。这一分析表明:地理信息系统技术和数量生态学相结合在景观或更大尺度的生态系统的研究中有重要的意义。

References

- [1] Jiang H. DCA ordination, environmental interpretation and geographical distribution model of spruce and fir plant communities in northwest Sichuan and south Gansu. *Acta Phytocologica Sinica*, 1994, 18(3): 209~218.
- [2] Jiang H. Ordination, quantitative classification, and environmental interpretation of plant communities in Dongling Mountain. *Acta Botanica Sinica*, 1994, 36(7): 539~551.
- [3] Li X D. The application of canonical analysis in the study of halophyte communities in the region of Yellow River Delta. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1988, 12(4): 300~305.
- [4] Zhang X S. Indirect gradient analysis, quantitative classification and environmental interpretation of plant communities in Ngari, Xizang(Tibet). *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1991, 15(2): 101~103.
- [5] Zhang J T. The developments of numerical methodologies in vegetation analysis. *Advances in Modern Ecology*, Beijing: Science Press, 1992. 249~265.

- [6] Zhang J T. Analysis of relationships between vegetation and its environmental variables. 1. CCA and DCCA. *Journal of Shanxi University*, 1992, **15**(2): 292~298.
- [7] Zhang J T. Fuzzy set ordination and its application. *Acta Ecologica Sinica*, 1992, **12**(4): 325~331.
- [8] Chen L Z. The ordination and numerical classification of montane coniferous forests in warm-temperate region. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1992, **16**(4): 301~309.
- [9] Institute of Botany of the Chinese Academy of Science. *Vegetation Maps of Loess Plateau* (1:50 thousandth). Beijing: Earthquake Press, 1991.
- [10] Sun Y M, Sun Q H, Qiao Q, et al. Data structure design of DSS system based on GIS technology. *Research of Environmental Science*, 1997, **10**(5): 26~29.
- [11] Braak C J F Ter. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector method for multivariate direct gradient analysis. *Ecology*, 1986, **67**: 1167~1179.
- [12] Braak C J F Ter. Weighted averaging of species indicator values: efficiency in environmental calibration. *Mathematical Biosciences*, 1986, **78**: 57~72.
- [13] Braak C J F Ter. Unimodal models to related species to environment; Agricultural Math. Group. Wageningen, 1987.
- [14] Pan D Y, Kong L S and Jin Q H. DCA, CCA and DCCA ordination analysis of salty meadow community in Hutubi, Xinjiang. *Acta Phytocologica Sinica*, 1995, **19**(2): 115~127.

参考文献

- [1] 江洪. 川西北甘南云冷杉林的 DCA 排序、环境解释和地理分布的模型的研究. *植物生态学报*, 1994, **18**(3): 209~218.
- [2] 江洪. 东灵山植物群落的排序、数量分类与环境解释. *植物学报*, 1994, **36**(7): 539~551.
- [3] 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报*, 1988, **12**(4): 300~305.
- [4] 张新时. 西藏阿里植物群落的间接梯度分析、数量分类与环境解释. *植物生态学与地植物学学报*, 1991, **15**(2): 101~103.
- [5] 张金屯. 植被数量分析方法的发展. 当代生态学博论. 北京: 中国科学技术出版社, 1992. 249~265.
- [6] 张金屯. 植被与环境关系的分析 II, CCA 和 DCCA 限定排序. *山西大学学报(自然科学版)*, 1992, **15**(2): 292~298.
- [7] 张金屯. 模糊数学排序及其应用. *生态学报*, 1992, **12**(4): 325~331.
- [8] 陈灵芝. 暖温带山地针叶林排序和数量分类. *植物生态学与地植物学学报*, 1992, **16**(4): 301~309.
- [9] 中国科学院植物研究所. 黄土高原地区植被类型图(1:50 万). 北京: 地震出版社, 1991.
- [10] 孙益民, 孙启宏, 乔琦等. 基于 GIS 技术开发的 DSS 系统数据结构设计. *环境科学研究*, 1997, **10**(5): 26~29.
- [14] 潘代运, 孔令韶, 金启宏. 新疆呼图壁盐化草甸群落的 DCA、CCA 和 DCCA 分析. *植物生态学报*, 1995, **19**(2): 115~127.