

基于小波变换的 NDVI 与地形因子多尺度空间相关分析

李双成¹,高伟明²,周巧富¹,刘逢媛¹

(1. 北京大学环境学院 地表过程分析与模拟教育部重点实验室,北京 100871;2. 河北师范大学资源与环境学院,石家庄,050016)

摘要:以西藏高原生态系统的 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)及其地形影响因子为分析对象,使用小波变换揭示了其多尺度空间格局。通过小波方差尺度图可以辨识出,在研究区域内 NDVI 及其地形因子存在着 4、12 km 和 25 km 等多尺度变异格局。小波多尺度相关分析是对普通相关的一种拓展,使用小波系数分尺度计算了 NDVI 及其影响因素的相关系数,并与普通相关进行了比较。结果表明,4 种地形因子(海拔高度、坡度、坡向和 CTI)不论是正相关还是负相关,在较小尺度上与 NDVI 的相关系数都比较小,一般情况是尺度增大,相关性增大。这反映了地形因子作为大的宏观制约因素对 NDVI 起作用。实践证明,小波分析对于揭示自然要素的多尺度空间结构和各向异性是一种强有力的工具。

关键词:小波变换;多尺度空间分析;NDVI;DEM;西藏高原

文章编号:1000-0933(2006)12-4198-06 **中图分类号:**Q148 **文献标识码:**A

Multi-scale spatial analysis on NDVI and topographical factors using wavelet transform

LI Shuang-Cheng¹, GAO Wei-Ming², ZHOU Qiao-Fu¹, LIU Feng-Yuan¹ (1. College of Environmental Sciences, Peking University; The Key Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, Beijing 100871, China; 2. College of Environmental Sciences and Resource, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12): 4198 ~ 4203.

Abstract: It is now widely recognized that ecological analysis results are sensitive to the resolution of the source data. Wavelet transform is a fashionable tool of solving scale transform in geosciences and ecology due to their advantages of multi-resolution. In this study, the wavelet transform was applied to analyze the correlations between NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and topographic factors on different scales in the Tibet Plateau. By discrete wavelet transform for spatial sampling data along longitude 87°E and 90°E, latitude 30°N and 33°N, multi-scale patterns of NDVI and DEM were examined. Daubechies wavelet, a compactly supported wavelet with extremal phase and highest number of vanishing moments, was chosen as a mother function to decompose the NDVI and the geographical factors into multi-scale wavelet coefficients respectively according to the source data pattern. The results of wavelet coefficient variograms show that NDVI spatial patterns exist two dominant scales of 4 km and 25 km, and a co-dominant scale of 12 km in longitude and latitude directions. Topographical indicator DEM exhibits a dominant spatial scale of 12 km in latitude direction, and a dominant spatial scale of 25 km in longitude direction. The fact of synchronous variance peak of 25 km in 93°E suggests that tightly-coupled relationship exists between NDVI and DEM.

Multi-scale correlation relationships among NDVI and geographical factors were also examined by using sampling data of spatial resolution 0.1°. Results suggest that the correlation is scale-dependent, i. e. different scales have different coefficients among the factors. The coefficient values between NDVI and topographical factors such as elevation, CTI (Compound Topographic

基金项目:国家自然科学基金资助项目(90202012);中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX3-SW-339)

收稿日期:2005-10-26;**修订日期:**2006-10-25

作者简介:李双成(1961~),男,河北平山人,副教授,主要从事区域开发生态效应评价与建模研究. E-mail: scl_i@urban.pku.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 90202012); The Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX3-SW-339)

Received date: 2005-10-26; **Accepted date:** 2006-10-25

Biography: LI Shuang-Cheng, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in evaluating and modeling ecological response of regional development. E-mail: scl_i@urban.pku.edu.cn

Index), aspect and slope are larger in coarser scales than those in finer scales, which suggest that topographical factors have important roles on controlling NDVI patterns in a larger scale.

Key words: wavelet transform; spatial multi-scale analysis; DEM; NDVI; Tibet Plateau

自然体系是一个多层次的复杂系统,它除了受到不同时空尺度的外界周期的或非周期强迫作用外,内部之间还进行不同时空尺度的线性和非线性的相互作用,从而出现复杂的时空尺度耦合现象。大量的观测和研究证实,生态学研究对象格局与过程的发生、时空分布及其相互耦合特征具有尺度依存(scale dependent)特性。也就是说,这些对象表现出来的特征是具有时间和空间抑或时空尺度特征的。因而,只有对其进行多尺度考察和研究,才能把握其内在的变化规律^[1~4]

图示法是尺度分析中常用的方法,它是将表征尺度变化的各种变量和特征值以不同空间和时间取样单位表现在图上,通过检视其中的曲线规律来获得尺度信息。图示法中,表征尺度变化的特征值可以在研究中直接观测得到数值,如地形高程、生物种类数量、NDVI、生物量、土壤养分含量等等,也可以是这些数值的统计参量,如方差、(空间)相关系数、孔隙度指数、各种熵值等。张颖等最近采用直方图作为特征值来表征地物空间关系的尺度效应^[5]。图示法的最显著特点是其直观性,能以可视化的形式展现尺度转换过程中多个尺度上生态学格局和过程及其相互作用特征的变化规律^[6]。除了图示法以外,空间自相关、谱分析方法以及区域性变量和半方差分析等也常用于揭示自然要素的空间和时间格局^[7~9]。

作为一种多尺度分析的数学工具,近年来小波分析被较多地应用到地学和生态学研究,试图揭示自然或生态因子的多尺度格局。S. C. Saunders 等^[10]在样带上通过重采样获得了 14 个样点的斑块长度、群落结构、地表温度和土壤温度的序列,然后使用小波变换对其方差进行关联比较,揭示了群落结构与温度的层次关系,并发现了温度的尺度依存性^[10]。T. Clemen^[11]使用墨西哥帽小波对知更鸟的平均能量消耗过程进行了多尺度分析,并用小波方差、小波能量等指标加以表征^[11]。G. Katul 等^[12]应用 Haar 小波对地表通量参数如碳、水和热分别从秒到小时、小时到天以及周到年 3 个时间尺度进行了分析^[12]。M. Nakken 使用连续小波变换分析了同一区域降雨和径流两个序列的多尺度趋势和它们之间的相关关系,并试图从中分离出人类活动的影响效应^[13]。A. Prokoph 和 J. Veizer^[14]使用 Morlet 二进小波检测了地质时期海水中的同位素信号的趋势、周期和非平稳特性,并将各个时期的循环周期与重构相空间的关联维结合起来,更具分析深度^[14]。然而,已有研究多侧重于过程,对于空间格局尤其是空间格局要素之间的多尺度相关缺乏应有的关注。本研究以小波变换为基本手段,分析西藏高原大尺度植被分布格局与地形之间的多尺度关系,试图探索小波变换在自然和生态要素的各向异性、要素间的多尺度相关等分析上的应用途径。

1 研究区概况

西藏自治区横亘于我国西南边陲,位于东经 78°25'~99°06',北纬 26°50'~36°53'(图 1)。东西最长约 2000 km,南北最宽约 1000 km,土地总面积近 120.48 万 km²。西藏自治区是青藏高原的主体,平均海拔在 4500 m 以上。其中海拔 4000 m 以上的区域占 86.1%,5000 m 以上的区域占 45.6%,并有海拔 7000 m 以上的山峰 50 余座。其宏观地形格局是辽阔的高原面、高耸的山脉、星罗棋布的湖盆和为数众多的内外流水系等多种地貌的水平排列和组合。地形大体上是西北向东南倾斜,大致从平均海拔 5000 m 以上,渐次降至 4000 m 左右。与高大山脉和高海拔高原面形成鲜明对照的是低海拔的深切河谷,如在雅鲁藏布江河谷以及藏中谷地的海拔多为 3200~3900 m,向南至国境线一带降至 1000 m 以下,而在出境处江面的最低海拔仅 110 m。

巨大的相对高差和大气环流状况是造成生态系统空间格局差异的主要动力。作为全球海拔最高的一个巨型构造地貌单元,青藏高原具有独特的自然环境和空间分异规律,其地表环境与生态系统有着明显的区域差异。受大气环流和高原地势格局的制约,形成了温度、水分条件地域组合的不同,呈现从东南暖热湿润向西北寒冷干旱递变的趋势。在环境与生态系统空间格局上表现为由山地森林-山地/高山草原-山地/高山荒漠的带状更迭。许多科学家多年来致力于西藏高原生态系统的空间分布格局研究,对环境与生态系统的地带性及

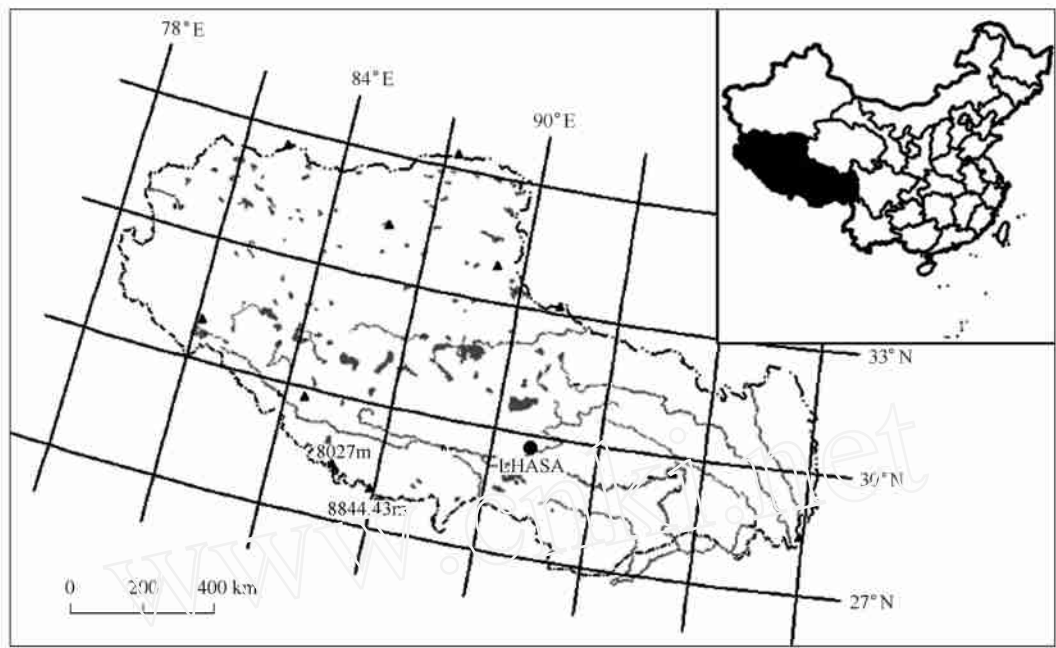


图 1 工作区位置图

Fig. 1 The location of study region

空间差异有了比较清楚的了解^[15]。

2 数据及其来源

2.1 NDVI

在本研究中,采用 NDVI 作为表征生态系统特征的指标。数据源为 NOAA 卫星影像。NDVI 值是 1998 年夏季(6~8 月份)的平均值。NDVI 的计算公式为:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

式中,NIR 为近红外的亮度值,RED 为红可见光的亮度值。NDVI 的分辨率为 1.1 km。

2.2 地形数据

地形数据源于美国地质调查局(USGS) EROS 数据中心的 HYDRO1k。主要的数据项有数字高程(DEM)、坡度(SLOPE)、坡向(ASPECT)、合成地形指数(Compound Topographic Index CTI)等。其中,CTI 又称为湿度指数(Wetness Index),是上游汇流面积(FA)和景观坡度(SLOPE)的函数,计算公式为^[29]:

$$CTI = \ln(FA / \tan(SLOPE))$$

以上各地形数据指标的空间分辨率为 1km,在 ARCVIEW 3.2a 下均转换为 GRID 格式,便于空间重采样。

2.3 多尺度分析数据处理

2.3.1 各向异性分析的重采样 为了更加准确地表征 NDVI 和 DEM 的多尺度空间格局,本研究分别沿 30°N、33°N 和 87°E、93°E 设置 1000 m ×1000 m 分辨率的采样带(已达到 NDVI 和 DEM 的最大分辨率),分别采样 1600 个、1173 个、930 个和 644 个。

2.3.2 多尺度相关分析的重采样 为了取得适合小波变换的数据序列格式,必须进行空间重采样。因变量是 NDVI,自变量包括 CTI、海拔高度、坡度和坡向。考虑到分析精度和工作量两方面因素,本次研究采取网格取样方法,精度为 0.25°×0.25°。在青藏高原范围内共设置 1950 个网格,表 1 是其中部分数据。

2.3.3 多尺度相关分析的工作步骤

- (1) 选择合适的基本小波:考虑到小波的正交归一性,本节选用的基本小波为 db6。
- (2) 计算采样数据的小波系数:本次研究采用 6 级分解,提取的小波系数为详细系数(detailed coefficients)。

(3) 计算相关系数:对提取的相关系数进行多尺度的相关分析,计算相关系数。

3 小波变换原理

小波变换就是通过“小波(wavelet)”与待分析函数“相乘”(内积),以达到分解原函数的目的。小波变换的含义是:把某一被称为基本小波(母小波,mother wavelet)的函数 $\psi(t)$ 作位移 τ 后,再在不同尺度 a 下与待分析函数 $f(t)$ 作内积,形如:

$$C(a,\tau)=\frac{1}{\sqrt{a}}\int_{-\infty}^{+\infty}f(t)\psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right)dt\quad a>0$$

式中, a 为尺度因子, τ 为平移因子, C 为小波系数。这里 $\psi(t)$ 为一平方可积函数,即 $\psi(t)\in L^2(R)$ 。经过基本小波与待分析函数作内积之后,可分解得到不同尺度下的小波系数。

根据各种小波的性能及研究工作的性质,本研究采用 db6 小波作为基本小波类型。Daubechies(db)小波是法国学者构建的一类二进小波,具有时域上的有限支撑, $\psi(t)$ 和它的整数位移正交归一,在频域上 $\Psi(\omega=0)=0$,具备尺度函数(scaling function) $\phi(t)$ 。 $\phi(t)$ 长度有限,支撑域在 $t=0\sim(2N-1)$ 范围内。其时域关系为:

$$\psi(t)=\sum g_k\phi(2t-k)$$

式中, $\psi(t)$ 是 $\phi(2t)$ 的移位加权和, g_k 为权值。图 2 是 db6 母小波的图形示意。

4 结果分析与讨论

4.1 结果分析

4.1.1 NDVI 的空间各向异性 利用小波变换分别计算不同尺度下 NDVI 的小波方差。小波变换的参数是:小波类型为 db6,分解层次为 6,分别获取详细小波系数和近似系数,取详细系数计算小波方差,结果见图 3。

分析 NDVI 小波尺度方差图可以看出,NDVI 的尺度方差曲线分别在南北两条纬线和东西两条经线有大致相似的波形和走势。小波方差变化幅度在南部(30°N)和东部(93°E)明显比北部(33°N)和西部(87°E)大,说明南部和东部 NDVI 空间格局的变异程度较大。一个合理的解释是,南部和东部地形破碎,单位面积内高度差较大,造成生态条件和生境的多样性,使得 NDVI 空间差异加大。与此相反,北部和西部,地势相对平坦,生态环境比较单调,造成 NDVI 的空间变异不大。

图 3a 和图 3b 均显现了几个不同的 NDVI 尺度结构。两个可以清楚辨认的尺度是 4 km 和 25 km,只不过在 30°N 和 93°E 两条曲线上表现得更为明显。除了以上两个尺度外,在 30°N 和 93°E 两条曲线上还有大约 12

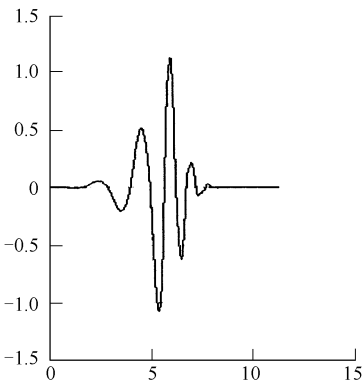


图 2 db6 小波图形示意
Fig.2 Waveform of db6

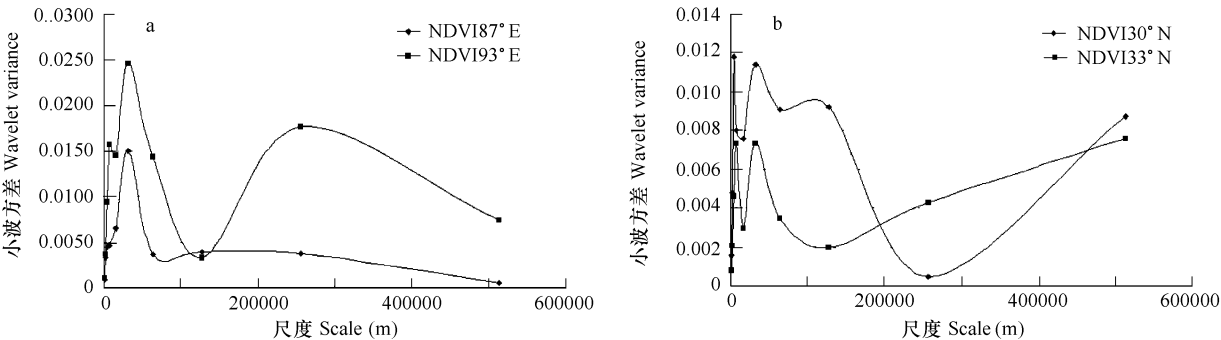


图 3 NDVI 沿经纬线多尺度分布格局
Fig.3 Multi-scale pattern of NDVI along longitude and latitude direction

km 的一个尺度。

与 NDVI 沿经纬线多尺度分布格局大致相似,DEM 空间格局(图 4)在整个尺度域上的变异强度南部明显比北部强,东部比西部明显。在纬度曲线上凸显 12 km 的尺度,而 25 km 和 4 km 的尺度表现得不甚明显。在经度曲线上,25 km 的尺度非常突出。比较 NDVI 和 DEM 的 93 °E 样带尺度方差曲线(图 3b,图 4b),可以看出两者在 25 km 的尺度上吻合较好,说明了两者在这一尺度上相互耦合紧密。

4.1.2 NDVI 与地形因子的多尺度相关 表 1 是列举了用于相关分析的部分采样点的数据。依据 2.3.3 节中的工作步骤,完成多尺度相关分析。结果列在表 2 中。

与单尺度相关分析相比,本研究使用的多尺度相关分析能发现因素之间相关最大的尺度。表 2 揭示的规律是:4 种地形因子不论是正相关还是负相关,在较小尺度上与 NDVI 的相关系数都比较小,一般情况是尺度增大,相关性增大。这反映了地形因子作为大的宏观制约因素对 NDVI 起作用。具体到每一种因素,海拔高度与 NDVI 为负相关关系。这种关系仅在青藏高原地区存在。因为那里的平均海拔已在 4000 m 以上。在 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的尺度上,DEM 与 NDVI 出现最大负相关。一般认为,坡向是较小尺度上发挥作用的因子,而在小波多尺度分析中,它与 NDVI 的最大负相关出现在较大的尺度上。这说明,在较小尺度上,由坡向引起的热量分异在较为平坦的西藏高原面上不明显,而变换成较大尺度时,坡向的作用有可能集聚成汇流区的效应。坡度的尺度效应与坡向相似,不过它与 NDVI 之间均为正相关,且随着尺度的增大,出现一定的波动,具体原因尚待进一步分析。CTI 与 NDVI 的关系比较特殊,在中小尺度上,两者表现为弱的负相关,而在较大尺度上,两者呈正相关,且相关系数增加较快。CTI 又称基于地形的湿度指数,它与 NDVI 的相关性告诉人们,在小尺度上,由汇水区面积和坡度决定的湿度指数,对 NDVI 的空间分布基本不起作用,而在较大尺度上,它是制约 NDVI 空间格局的主要因素。

为了增加对比性,计算单尺度 NDVI 与其地形因子的相关系数,结果为海拔高度为 - 0.45,坡向为 - 0.26,坡度为 0.39,CTI 为 0.1。单尺度相关分析结果与小波多尺度相关分析揭示出来的大致趋势基本一致,但它没有多尺度特性。

4.2 讨论

本文和其他相关研究证实,小波转换是生态学与地理学中多尺度分析的强有力工具。与加窗的傅里叶变换相比其优势在于:(1)空间-尺度局部化。小波变换具有局部化性能,使得小波系数空间的局部性守恒。在分析信号的高频部分时,其窗口较窄,在低频时,窗口加宽;(2)多尺度分辨率。小波变换提供了一种由粗及细的多尺度分辨率。当尺度较大时,得到信号的整体特征,而尺度较小时,能提取信号的细节特征,具有优良的

表 1 研究区域部分采样数据表

Table 1 Sampling data of study area

取样号 Sample No.	CTI	坡向 Aspect	坡度 Slope	DEM	NDVI
549	296.882	175.731	10.659	5233.725	0.828
610	274.199	174.818	11.276	5255.350	0.625
682	264.515	172.774	14.165	4798.014	0.641
261	298.491	178.710	8.199	5520.975	0.475
306	330.686	179.327	10.108	4866.445	0.442
352	358.851	171.126	8.794	4894.041	0.389
398	298.735	177.228	8.140	5369.443	0.764
611	303.247	168.749	11.527	4867.665	0.899
683	310.257	174.213	12.697	4445.855	0.832
756	277.292	171.562	16.424	4233.277	0.330
833	242.635	184.374	16.053	4677.582	0.159
915	268.455	178.127	13.941	4841.236	0.144
217	394.600	176.771	7.396	5254.185	0.711
262	285.563	176.466	10.618	5528.433	0.299
307	283.444	169.795	11.925	5213.294	0.341
353	355.636	178.552	9.621	4625.211	0.246
399	290.967	177.047	9.773	5046.088	0.264

表 2 基于小波系数的 NDVI 与地形因子的多尺度相关分析结果

Table 2 Multi-scale correlation between NDVI and topographic factors based on wavelet coefficients

小波系数 Wavelet variance	对应尺度 Corresponding scale	高程 DEM	坡向 Slope	坡度 Aspect	CTI
d_1	$0.25 \times 0.25^{\circ}$	- 0.0574	- 0.0861	0.1230	- 0.0133
d_2	$0.5 \times 0.5^{\circ}$	- 0.0840	- 0.0101	0.0449	- 0.0302
d_3	$1 \times 1^{\circ}$	- 0.3578	- 0.0666	0.1189	- 0.1518
d_4	$2 \times 2^{\circ}$	- 0.3300	- 0.2404	0.0603	0.3131
d_5	$4 \times 4^{\circ}$	- 0.1670	- 0.3812	0.2790	0.4900
cd_1	$0.25 \times 0.25^{\circ}$	- 0.0573	- 0.0867	0.1235	- 0.0130
cd_2	$0.5 \times 0.5^{\circ}$	- 0.0842	- 0.0107	0.0459	- 0.0308
cd_3	$1 \times 1^{\circ}$	- 0.3635	- 0.0691	0.1227	- 0.1487
cd_4	$2 \times 2^{\circ}$	- 0.3306	- 0.2405	0.0598	0.3127
cd_5	$4 \times 4^{\circ}$	- 0.1680	- 0.3774	0.2761	0.4889

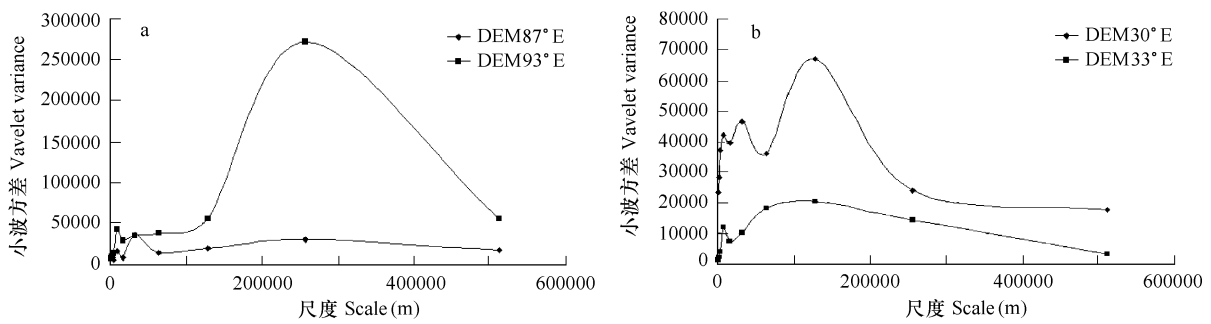


图 4 DEM 沿经纬线多尺度分布格局

Fig. 4 Multi-scale pattern of DEM along longitude and latitude direction

局部检测能力。

小波核函数不同,小波变换的结果略有差异。在本研究中,考虑到 db 小波的特性和波形以及空间采样数据的特征,选择 db6 作为小波变换的母小波。

一般来说,小波变换在多尺度分解生态时间序列数据及其互相关、协相关等计算方面是其优势应用领域。通过选择适当的母小波及分解尺度,可以准确检视出生态序列的随机成分、周期成分和趋势成份,这对于识别主导生态因素(过程)、预测其变化趋势及尺度转换均提供了实现途径。国外曾有应用小波分析识别气候和径流序列自然因素和人为因素的研究案例。本质上,由于小波变换属于时频域的调和分析,在研究具有空间属性的生态格局时,需要进行空间重采样,将连续的空间数据变换成离散的序列数据。

基于小波多尺度相关分析的应用范围还可以进一步拓展。譬如,当发现了各种因素相关的优势尺度域后,在地理区划中可以此结果选取不同区划等级中的主要划区因子。

小波分析技术也并非十全十美,也存在着小波因频谱泄漏而引起的混频现象。另外,小波变换所用的核函数虽具基本正则和必备条件,但波形有一定差异。因而,选择适当的核函数对于多尺度分析也十分重要。

References :

- [1] Levin S A. The problem of pattern and scale in ecology. *Ecology*, 1992, 73:1943 ~ 1967.
- [2] Bergstrom S, Graham L P. On the scale problem in hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 1998, 211:253 ~ 265.
- [3] Brockway D G. Forest plant diversity at local and landscape scales in the Cascade Mountains of southwestern Washington. *Forest Ecology and Management*, 1998, 109:323 ~ 341.
- [4] Bugmann H, *et al.* Scaling issues in forest succession modelling. *Climatic Change*, 2000, 44:265 ~ 289.
- [5] Zhang H. Scaling effect of histogram. *Science in China (Series D)*, 2002, 32(4):307 ~ 316.
- [6] Lv Y H, Fu B J. Ecological scale and scaling. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12):2096 ~ 2105.
- [7] Li S C, Cai Y L. Some scaling issues of geography. *Geographical Research*, 2005, 24(1):11 ~ 18.
- [8] Qi Ye, Wu Jianguo. Effects of changing spatial resolution on the results of landscape pattern analysis using spatial autocorrelation indices. *Landscape Ecology*, 1996, 11 (1):39 ~ 49.
- [9] Wu J G. *Landscape Ecology — Pattern, Process and Class*. Beijing: Higher Education Press, 2000. 119 ~ 184.
- [10] Saunders S C. Hierarchical relationships between landscape structure and temperature in a managed forest landscape. *Landscape Ecology*, 1998, 13: 381 ~ 395.
- [11] Clemen T. The use of scale information for integrating simulation models into environmental information systems. *Ecological Modelling*, 1998, 108:107 ~ 113.
- [12] Katul G, *et al.* 2001. Multiscale analysis of vegetation surface flux: from seconds to years. *Advances in Water Resources*, 24:1119 ~ 1132.
- [13] Nakken M. Wavelet analysis of rainfall-runoff variability isolating climatic from anthropogenic patterns. *Environmental Modelling & Software*, 1999, 14:283 ~ 295.
- [14] Prokoph A, Veizer J. Trends, cycles and nonstationarities in isotope signals of phanerozoic seawater. *Chemical Geology*, 1999, 161:225 ~ 240.
- [15] Zheng D. Research on natural region system of Tibetan Plateau. *Science in China (Series D)*, 1996, 26(4):336 ~ 341.

参考文献:

- [5] 张颢,等. 直方图尺度效应研究. *中国科学(D 辑)*, 2002, 32(4):307 ~ 316.
- [6] 吕一河,傅伯杰. 生态学中的尺度及尺度转换方法. *生态学报*, 2001, 21(12):2096 ~ 2105.
- [7] 李双成,蔡运龙. 地理尺度转换若干问题的初步探讨. *地理研究*, 2005, 24(1):11 ~ 18.
- [8] 邬建国. *景观生态学——格局、过程、尺度与等级*. 北京:高等教育出版社, 2000. 119 ~ 184.
- [15] 郑度. 青藏高原自然地域系统研究. *中国科学(D 辑)*, 1996, 26(4):336 ~ 341.