

基于小波变换的 NDVI 区域特征尺度

李小梅¹, 沙晋明^{2,*}, 连江龙³

(1. 福建师范大学环境科学与工程学院; 2. 福建师范大学中欧景观与环境管理中心; 3. 福州电子职业学校)

摘要:尺度是生态环境研究领域的热点问题。以福州市为研究区,选择 6 个生态样线,提取 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index),以小波变换为工具进行尺度分解,得到 $2^1 \times 900 \text{ m}^2$ 、 $2^2 \times 900 \text{ m}^2 \cdots 2^8 \times 900 \text{ m}^2$ 系列尺度上的 NDVI 信息。以小波细节信息方差和小波细节信息熵为特征尺度的度量指标,得到 6 个生态样线的 NDVI 特征尺度,进一步得到区域特征尺度。研究发现福州地区纬度方向的特征尺度域为 $2^4 \times 900 \text{ m}^2 \cdots 2^6 \times 900 \text{ m}^2$,纬度对生态样线的 NDVI 特征尺度影响较小,不同纬度生态样线的 NDVI 特征尺度与样线的景观多样性和受人类活动干扰的程度有关;经度方向的特征尺度域为 $2^5 \times 900 \text{ m}^2 \cdots 2^7 \times 900 \text{ m}^2$ 尺度,不同经度 NDVI 特征尺度域自西向东存在明显的递增梯度,该梯度与 DEM、坡度和地形起伏度梯度相吻合;NDVI 生态样线的特征尺度域大小受控于研究区北北东-南南西走向的地质构造体系,该因素导致 NDVI 样线特征尺度的空间变异范围为 $2^1 \times 900 \text{ m}^2 \cdots 2^3 \times 900 \text{ m}^2$ 。

关键词:特征尺度;福州市;小波分析;NDVI

Regional characteristic scale of NDVI based on wavelet analysis

LI Xiaomei¹, SHA Jinming^{2,*}, LIAN Jianglong³

1 College of Environmental Science & Environmental Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 China-European Center of Landscape & Environmental Management, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China 3 Fuzhou electronic vocational school, Fuzhou 350007, China

Abstract: Scale is the highlight of the eco-environment, Characteristic scale is the optimized spatial measurement size to identify the heterogeneity of landscape. The study selects 6 ecological sampling lines including three latitudinal lines and three longitude lines as the research area in Fuzhou city. By use of Landsat TM image, the study gets the information of the Normalized vegetation index(NDVI) for 6 sampling lines. Then wavelet is applied as the multi-scale analysis tool, the regional NDVI information can be decomposed into a scale series: $2^1 \times 900 \text{ m}^2$, $2^2 \times 900 \text{ m}^2 \cdots 2^8 \times 900 \text{ m}^2$. After calculating the variance coefficient and entropy of wavelet detailed information in different scales, the results show that the corresponding scales to the maximum of wavelet variance and entropy may make up the domain characteristic scale of NDVI. By the way, NDVI domain characteristic scale for every ecological lines is clearly demonstrated. Finally, the study shows that the domain characteristic scale of ecological lines in different latitudes is between $2^4 \times 900 \text{ m}^2 \cdots 2^6 \times 900 \text{ m}^2$, latitude plays little role on the NDVI characteristic scale while the landscape diversity or complexity and disturbance from human activity play important roles for the NDVI characteristic scale size in ecological lines. For ecological lines with different longitudes, the domain characteristic scale is $2^5 \times 900 \text{ m}^2 \cdots 2^7 \times 900 \text{ m}^2$. From west to east, the characteristic scale increases gradually, it accords with the decreasing gradients of DEM, slope and relief. Furthermore, the study promotes that the regional NDVI domain characteristic scale in Fuzhou is under the control of the local NNE-SSW geological structure direction which impacts on the change of local characteristic scales in the spatial range of $2^1 \times 900 \text{ m}^2 \cdots 2^3 \times 900 \text{ m}^2$.

Key Words: characteristic scale; Fuzhou City; wavelet analysis; NDVI

基金项目:福建省国际合作重点资助项目(2009I006);中国-保加利亚政府间合作项目(国科外字[2008]221号);福建省重点项目“海峡西岸经济区生态文明理论与技术支撑体系研究”

收稿日期:2009-04-15; **修订日期:**2009-11-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jmsa@fjnu.edu.cn

尺度是生态环境研究领域的一个热点问题,目前生态环境尺度研究对象涉及到水土流失与侵蚀产沙^[1-3]、地理空间^[4-5]空间信息^[6]、植被群落^[7]、动物活动与资源^[8]、景观格局^[9]、生态因子关系^[10-11]和土地利用^[12]等。尺度研究量化方法包括:观测地点上的统计分析,空间自相关分析^[12]、半方差分析,谱分析、小波分析^[11,13]等。传统的点上的统计分析不适合区域景观尺度分析;空间自相关和半方差分析适合区域空间尺度分析,但是不能准确提出特征尺度范围;谱分析是基于傅里叶变换的固定时间-频率域上的信息变换;而小波分析是具有自适应特征、可以伸缩的时间-频率域上的信息变换(这里作空间-频率域变换),小波分析特点是具有伸缩特性,信息变换结果使局部特征信号突出。在生态环境空间分析中,同样可以利用小波多尺度分析方法监测特征空间尺度和突变空间信息。特征尺度指在一定区域内能表征景观异质性的最佳斑块大小,或者描述景观异质性的最适宜空间度量。归一化植被指数 NDVI 作为典型生态因子,可以综合反映区域生态环境状况。NDVI 常常用于植被覆盖率、植被分类、植被动态变化、植被净第一性生产力、植被生物量、湿度、土壤热状况等的估算模型中^[14-19]。

小波分析被称为“数学显微镜”,可以通过变焦手段来观察研究对象,在信号分析和图像处理领域得到人们的关注^[20]。本文对生态环境定量数据,应用小波分析工具进行尺度分解。以福州市为研究区,选择 6 个典型生态样线,利用 TM 影像提取 NDVI 数值,然后进行小波变换得到 8 个尺度上的 NDVI 数值变化,对小波信息进一步分析,得到每个生态样线的特征尺度,最后讨论整个研究区的特征尺度。该研究是进一步分析 NDVI 空间分布格局-尺度、生态环境因子关系的尺度响应、生态环境阈值带等问题讨论的前提和基础。

1 研究资料与方法

1.1 数据资料

研究区为福州市,数据资料为 TM 遥感影像(2000 年 5 月 4 日)、1:100 000 县界图、1:100000 地形图、生态环境地面调查数据(包括地表植被覆盖类型、地貌类型)。TM 影像处理方法:投影转换→影像与地形之间校正→研究区提取。

1.2 生态样区和样线选择

福州市具有中亚热带典型气候,背山面水,东部临海,受人类活动强烈;西部山区,仍保持较天然的生态环境特征;南部为中亚热带向南亚热带的过渡地带,植被类型具有明显的垂直地带性分布规律;中部为福建省最大河流——闽江的干流区域和入海口。选择该区域作为 NDVI 特征尺度研究区,原因在于其生态环境的典型性和多样性。

进一步选择典型生态样线进行分析(图 1 和表 1)。样线 1 代表北部低山丘陵景观,样线 2 代表戴云山脉横向切割山地和闽江下游平原的城市景观特征,样线 3 代表南部的低山-中山景观特征,样线 1—样线 3 自西向东存在高程梯度;样线 4 代表福建省中部戴云山脉纵向切割景观,样线 5 代表近海丘陵景观,带 6 代表沿海平原丘陵景观,样线 4—样线 6 与区域地貌走向相似。将 6 个生态样线共 18870 个像元看作表达研究区特征的总样本,近似反映出研究区总体生态环境特征。各个生态样线的景观特征见表 1 和图 2—图 7。

表 1 生态样线地理位置
Table 1 Location of ecological sampling lines

样线编号 Sampling lines	地理坐标 Geographical coordinates	样线方向 Sampling lines direction	样线长度/m Length of sampling lines	样线宽度/m Width of sampling lines
Line1	26°26'29", 118°52'8"—26°25'50", 119°33'34"	自西向东	68970	30
Line2	26°5'11", 118°35'30"—26°4'15", 119°38'47"	自西向东	105630	30
Line3	25°46'16", 118°26'16"—25°45'17", 119°36'40"	自西向东	117810	30
Line4	26°26'8", 118°48'14"—25°42'57", 118°47'34"	自北向南	79830	30
Line5	26°34'29", 119°17'26"—25°33'47", 119°16'16"	自北向南	112230	30
Line6	26°34'29", 119°17'26"—25°33'47", 119°16'16"	自北向南	81630	30

1.3 研究方法

1.3.1 小波分析

小波分析是 20 世纪 80 年代后期发展起来的新数学分支,小波母函数是平方可积函数,具有紧支集或近似紧支集(时域的局部性),且具有正则性(频域的局部性)。小波母函数有多种,本文使用 DB4 小波母函数。

小波分析是将信号分解成一系列小波函数的叠加,而这些小波函数都是由一个母小波函数经过平移与尺度伸缩得来的。本文采用一维离散正交小波变换,经过变换,输出小波序列系数(包括细节系数和近似系数信息),提供信号全部信息和不同尺度下局部能量估计,正交小波变换不会有任何信息损失^[21]。小波变换分析在计算机上实现是通过 Mallat 算法即快速小波算法(FWA),FWA 通过调节尺度因子实施对信号由细至粗的分解和由粗至细的重构。

小波变换相当于一组高通和低通滤波器,对空间序

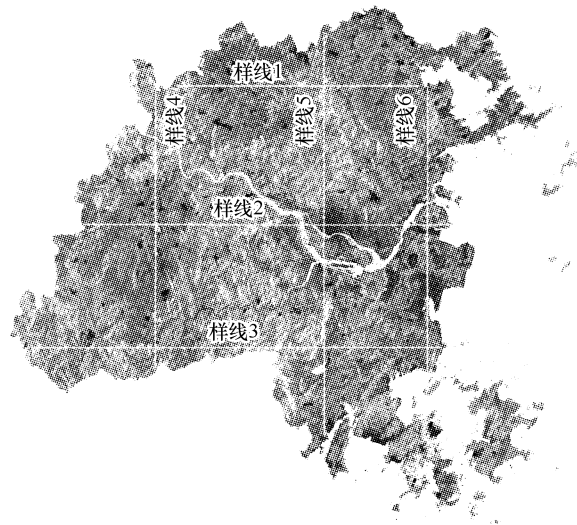


图1 研究区生态样线位置图

Fig. 1 Location of selected ecological sampling lines in research region

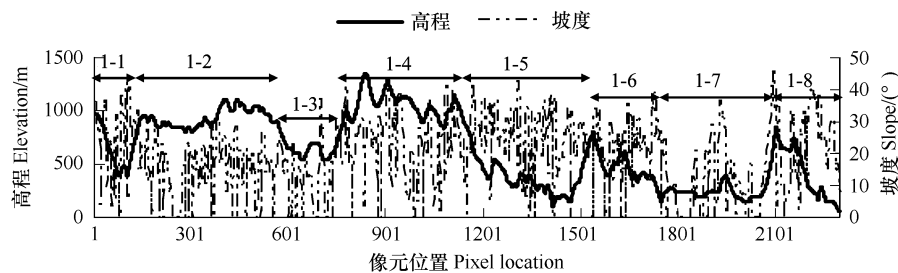


图2 生态样线1的生态景观序列

Fig. 2 Ecological landscape series of ecological line 1

1-1:峡谷陡坡马尾松林,1-2:低山缓坡灌草丛,1-3:峡谷盆地稻田,1-4:低山缓坡灌草丛,1-5:丘陵陡坡常绿阔叶林、灌草丛,1-6 丘陵陡坡马尾松、灌草丛,1-7:沿海平原、缓坡农田,1-8:沿海低丘灌草丛、马尾松林

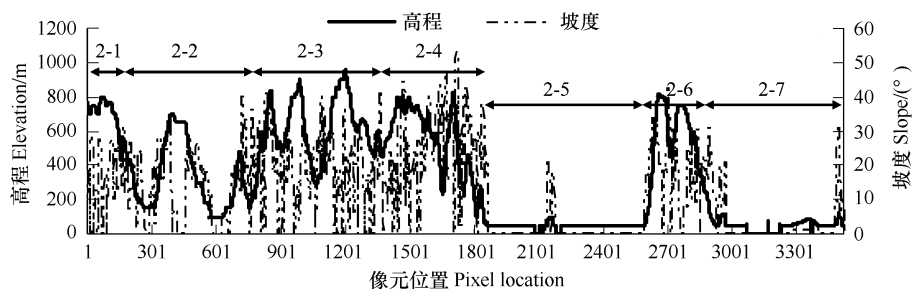


图3 生态样线2的生态景观序列

Fig. 3 Ecological landscape series of ecological line 2

2-1:低山缓坡灌草丛,2-2:溪谷两岸缓坡农田、果园,2-3:低山缓坡灌草丛、马尾松,2-4:低山陡坡常绿阔叶林、马尾松林,2-5:平原城市景观(福州市区)2-6:城郊低山马尾松林2-7:闽江入海口,沿海岛屿农田

列信号进行逐步分解,高、低通滤波器产生的信号分别为高、低频逼近分量。两分量占频带宽度相等,各占50%;每次分解后,信号的采样频率降低1倍,再重复上述过程依次分解下去。如此可以得到 2^0 、 2^1 、 $2^2 \dots 2^8$ 系列尺度上的信号高频、低频信息(即细节和近似信息),利用小波重构算法可以得到系列尺度上的信号细节和

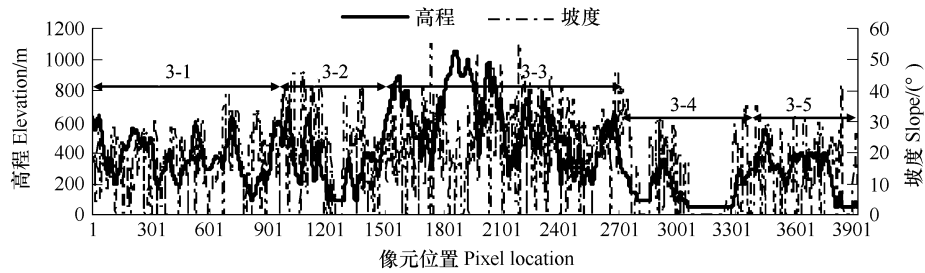


图4 生态样线3的生态景观序列

Fig. 4 Ecological landscape series of ecological line 3

3-1:低丘缓坡马尾松、灌草丛、农田相间, 3-2:河谷陡坡马尾松、竹林、果园相间, 3-3:中山陡坡常绿阔叶林、少量南亚热带雨林, 3-4:平原居民区、农田, 3-5:沿海低丘灌草丛、木麻黄防护林

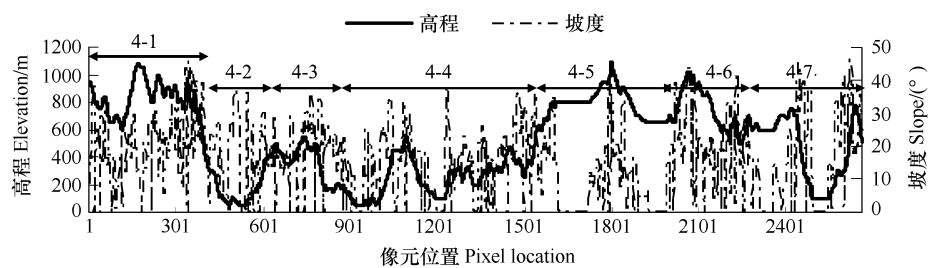


图5 生态样线4的生态景观序列

Fig. 5 Ecological landscape series of ecological line 4

4-1:中山陡坡常绿阔叶林, 4-2:闽江两岸缓坡马尾松林, 4-3:低丘陡坡马尾松、灌草丛, 4-4:低丘缓坡农田、果园、灌草丛, 4-5:中山台地草灌丛, 4-6:中山陡坡杉木林、灌丛, 4-7:大樟溪两岸农田、果园

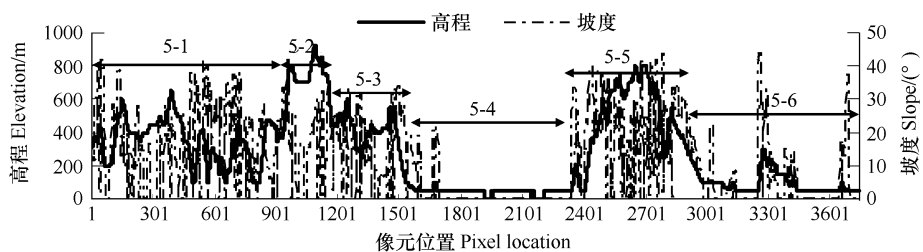


图6 生态样线5的生态景观序列

Fig. 6 Ecological landscape series of ecological line 5

5-1:低丘陡坡灌草丛-马尾松林, 5-2:中山缓坡常绿阔叶林, 5-3:低山陡坡马尾松林, 5-4:平原城市景观(福州市区), 5-5:城郊低山马尾松林、灌草丛, 5-6:沿海平原乡村居住区、农田

近似重构信息。本文的多尺度下 NDVI 细节和近似信息就是通过上述变换得到的。根据小波信号分析过程, 可以知道小波细节信息是针对生态环境因子局部空间位置上的变异性特征, 而近似信息反应了经过尺度变换滤去细节后所余剩的生态环境因子轮廓信息, 是生态环境因子趋势变化的表达。

1.3.2 特征尺度度量

本文选择小波方差和小波信息熵两个度量参数对小波分解后信息处理, 通过比较分析, 可得到 NDVI 特征尺度域。

(1) 小波方差

设 $W(a, b)$ 为信号 $f(n)$ 在尺度 a , 位置 b 上的小波变换系数, 则可定义尺度 a 上的小波尺度方差为:

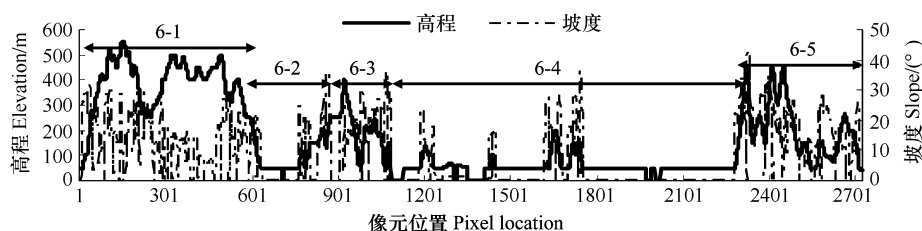


图7 生态样线6的生态景观序列

Fig.7 Ecological landscape series of ecological line 6

6-1:低丘缓坡灌草丛 1 6-2:敖江流域入海口,平原农田 6-3:沿海低丘坡地灌丛 1 6-4:闽江入海口、沿海岛屿、沿海平原农田-滩涂 6-5:沿海低丘木麻黄防护林

$$V(a) = \frac{1}{n} \sum_{b=1}^n |W(a, b)|^2$$

表示所有位置的数据在给定尺度的小波分解下小波系数离开平均位置的量度,用来检验全局结构^[23]。某一尺度的小波方差越大,表明该尺度上结构信息越丰富,可以揭示特征尺度。

(2) 小波信息熵

信息熵可以度量数据信息的不确定性或随机性,一些地学工作者引入信息熵概念研究土地利用结构信息变化^[24]、城乡结合部范围的界定^[25]、地形熵^[26]和坡度熵^[27]等。在多尺度分解空间中各个子空间所包含的信息量同样可以用信息熵进行度量,根据小波变换系数在不同尺度上的概率分布,可以计算信号不同尺度的小波信息熵^[24]。小波信息熵的公式为:

$$WE(a) = - \sum_{i=1}^M P_i \log P_i$$

式中, $P_i (i=1, 2, \dots, M)$ 是某尺度 a 上小波变换系数的近似概率分布, M 为小波系数的区间数目。小波多尺度信息熵可以表示信号不同尺度(频率)分量的信息量大小,熵值大,则所携带的信息量大;熵值小则所携带的信息量小。特征尺度对应于信息量大的空间尺度。

2 结果与讨论

根据生态样线采样方向的不同,分析 NDVI 在不同纬度带、经度带上的小波细节信息方差-尺度关系、小波细节信息熵-尺度关系,得到图 8、图 9 和 表 2、表 3 的生态环境尺度拟合方程,结合不同生态样线的生态景观特征(图 2—图 7),分析 NDVI 区域特征尺度。

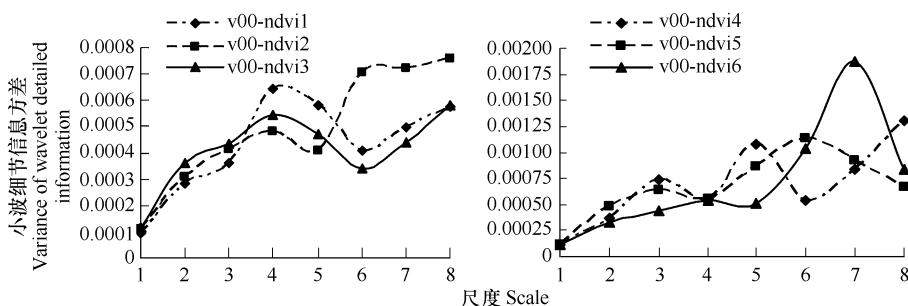


图8 NDVI 小波细节信息方差-尺度图

Fig.8 Comparison of wavelet variance-scale of NDVI between ecological lines

注:尺度 1, 2, ..., 8 分别对应于 $2^1 \times 900 \text{ m}^2 \dots 2^8 \times 900 \text{ m}^2$ 的空间栅格大小

2.1 特征尺度选择

小波细节系数可以识别不同样点上NDVI的差值、极大值和突变点,将隐藏在定量数值背后的敏感尺度

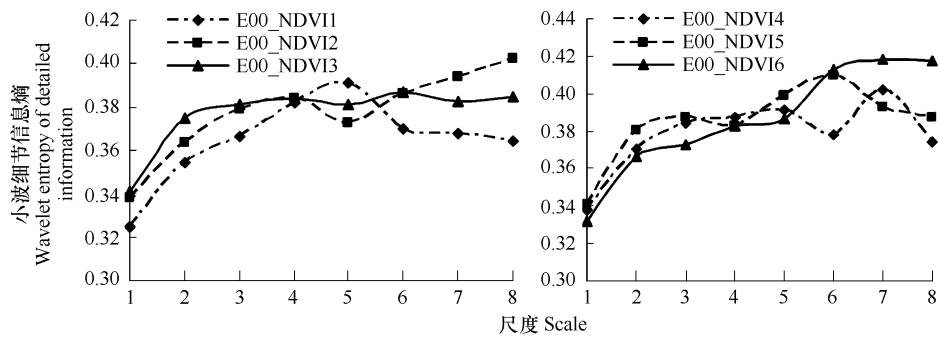


图9 NDVI 小波细节信息熵-尺度图

Fig.9 Comparison of wavelet entropy-scale of NDVI between ecological lines

注:尺度1,2,⋯,8 分别对应于 $2^1 \times 900 \text{ m}^2 \cdots 2^8 \times 900 \text{ m}^2$ 的空间栅格大小

表2 不同生态样线 NDVI 的小波方差-尺度拟合方程

Table 2 Regression equations between wavelet variances and scales of NDVI from different ecological lines

生态样线 Ecological lines	小波信息方差-尺度拟合方程 Regression equations of wavelet variance-scale	R^2	特征尺度 Characteristic scale
1	$y = -2 \times 10^{-6}x^6 + 5 \times 10^{-5}x^5 - 0.0005x^4 + 0.0024x^3 - 0.0061x^2 + 0.0077x - 0.0034$	0.9949	4
2	$y = -3 \times 10^{-6}x^4 + 5 \times 10^{-5}x^3 - 0.0003x^2 + 0.0008x - 0.0005$	0.9428	4,弱特征尺度
3	$y = 1 \times 10^{-6}x^4 - 1 \times 10^{-5}x^3 - 5 \times 10^{-6}x^2 + 0.0003x - 0.0002$	0.9432	4
4	$y = 5 \times 10^{-6}x^4 - 8 \times 10^{-5}x^3 + 0.0003x^2 - 0.0003x + 0.0002$	0.8239	5
5	$y = 2 \times 10^{-6}x^6 - 5 \times 10^{-5}x^5 + 0.0005x^4 - 0.0022x^3 + 0.0051x^2 - 0.0053x + 0.0021$	0.9971	6
6	$y = -7 \times 10^{-6}x^5 + 0.0001x^4 - 0.0009x^3 + 0.003x^2 - 0.0041x + 0.002$	0.9917	7

注:上拟合方程中, x 代表的 2^x 单位像元尺度, y 代表生态因子值尺度变换后信息方差

表3 不同生态样线 NDVI 的小波信息熵-尺度拟合方程

Table 3 Regression equations between wavelet entropies and scales of NDVI from different ecological lines

生态样线 Ecological lines	小波细节信息熵-尺度拟合方程 Regression equations of wavelet entropy-scale	R^2	特征尺度 Characteristic scale
1	$y = -0.0001x^6 + 0.0031x^5 - 0.0336x^4 + 0.178x^3 - 0.4855x^2 + 0.6553x + 0.0076$	0.9916	5
2	$y = 0.0007x^3 - 0.0105x^2 + 0.0517x + 0.2964$	0.9535	4,弱特征尺度
3	$y = 3 \times 10^{-5}x^6 - 0.0007x^5 + 0.0062x^4 - 0.0255x^3 + 0.0385x^2 + 0.0223x + 0.3$	0.9915	6
4	$y = -0.0004x^4 + 0.0068x^3 - 0.0428x^2 + 0.1192x + 0.2494$	0.9890	7
5	$y = 0.0002x^5 - 0.0052x^4 + 0.0461x^3 - 0.1883x^2 + 0.3567x + 0.1308$	0.9787	6
6	$y = -0.0001x^6 + 0.0034x^5 - 0.0337x^4 + 0.1688x^3 - 0.4444x^2 + 0.5954x + 0.0483$	0.9768	7

注:上拟合方程中, x 代表的 2^x 单位像元尺度, y 代表生态因子值尺度变换后信息方差

揭示出来。当尺度较小时,可以辨清局部信息,但是对于整个区域或整个样线内的总体信息是模糊不清的,而当尺度上推到仅保留到原始信息的0.39%(即第八尺度)时,必产生信息失真。根据1.3.2对小波方差或小波信息熵的讨论,小波方差或小波信息熵局部极大值所对应的尺度可作为NDVI特征尺度,明显表达出生态景观斑块的异质性。根据图8、图9的小波信息方差-尺度、小波信息熵-尺度图,可以明显地拟合出相应的多次方程,并选择各个生态样线的特征尺度。在图8、图9中第8尺度上的信息由于尺度上推而产生的信息合并导致方差值和熵值突然变大,不能算为特征尺度。由于小波信息方差和熵所代表的统计内涵不同,对于同一个生态样线,得到的特征尺度数值不尽相同。事实上,对于地形破碎的生态景观区域,特征尺度是一个尺度范围(尺度域),并非简单的特征尺度大小,这是由于生态环境本身具有的空间和时间不确定性而决定的。因此根据图8、图9可以选择出每个生态样线的特征尺度,并得到小波方差-尺度、小波信息熵-尺度多项式拟合方程,进一步得到表4的NDVI特征尺度域。由表4可以发现,NDVI区域特征尺度为第4—7尺

度,即空间分辨率为 $2^4 \times 900\text{—}2^7 \times 900\text{m}^2$ 。

表 4 NDVI 区域特征尺度域

Table 4 The domain characteristic scales of NDVI

生态样线编号 Ecological lines	小波信息方差-尺度分析结果 Results of wavelet variance-scale	小波信息熵-尺度分析结果 Results of wavelet entropy-scale	特征尺度域 Domain characteristic scale
样线 1 Line1	4	5	4—5
样线 2 Line2	4,弱特征尺度	4,弱特征尺度	4,弱特征尺度
样线 3 Line3	4	6	4—6
样线 4 Line4	5	7	5—7
样线 5 Line5	6	6	6
样线 6 Line6	7	7	7

2.2 NDVI 在不同纬度采样线上的特征尺度对比分析

根据表 4,生态样线 1—样线 3 出现的 NDVI 特征尺度不同,样线 1 的特征尺度域为第 4—5 尺度;而样线 2 出现弱特征尺度(第 4 尺度);样线 3 的特征尺度为第 4—6 尺度。各个生态样线特征尺度的差异与样线的景观特征、坡度、高程、地形起伏度和受人类活动干扰的影响等方面有关。

根据图 2 和表 5,可以看到生态样线 1 的 NDVI、坡度、海拔高程和地形起伏度平均值较高,受人类活动干扰影响较小。生态样线 1 的主导生态景观类型为低山缓坡或低丘灌草丛。基于 TM 土地利用分类图对该生态样线进行统计,发现低山丘陵灌草丛像元面积约占 50%,在整个生态带内均有分布;其次为低山马尾松林像元面积约占 21%,陡坡区域的常绿阔叶林约占 21%,东部的农用地仅占 1% 左右。该样线的特征尺度域为 $2^4 \times 900\text{m}^2 \cdots 2^5 \times 900\text{m}^2$ 。

表 5 各生态样线的生态因子统计值

Table 5 Statistical values of eco-environmental indicators for ecological sampling lines

统计参数 Statistic parameters		样线 1 Line1	样线 2 Line2	样线 3 Line3	样线 4 Line4	样线 5 Line5	样线 6 Line6
NDVI	平均值	0.5786	0.5157	0.5856	0.5493	0.5435	0.5048
	最大值	0.7400	0.7219	0.7417	0.7310	0.7517	0.6974
	最小值	0.2857	0.1830	0.2500	0.1779	0.1793	0.2252
	方差	0.0647	0.1142	0.0711	0.0855	0.1060	0.0970
SLOPE	平均值	17.30	11.02	16.58	14.07	10.39	7.88
	最大值	46.78	53.19	55.19	47.00	44.92	43.00
	最小值	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	方差	10.96	11.70	11.55	10.95	11.55	9.58
DEM	平均值	629.81	329.94	379.18	515.41	279.24	165.55
	最大值	1350.00	963.00	1050.00	1090.00	924.00	550.00
	最小值	66.00	0.00	50.00	50.00	0.00	0.00
	方差	323.42	286.68	227.13	288.50	235.56	151.01
地形起伏度 relief	平均值	97.54	71.19	98.39	81.75	58.11	50.41
	最大值	417.00	395.00	384.00	338.00	314.00	300.00
	最小值	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	方差	64.94	74.23	69.93	62.61	60.83	51.73
主导特征尺度 Leading characteristic scale		4—5	弱 4	4—6	5—7	6	7

注:地形起伏度的计算:以 20 个像元为单元,其中的海拔最高值减去最低值

生态样线 3 优势生态景观为森林景观包括马尾松林、灌草丛、竹林、果园、常绿阔叶林、沿海防护林(图 2 和表 5),整个生态样线地势中等、坡度较陡,植被覆盖度较高,受人为活动影响较小。该生态景观特征尺度域

较宽,为 $2^4 \times 900\text{m}^2 \cdots 2^6 \times 900\text{m}^2$ 。

生态样线 2 与生态样线 1 和 3 截然不同,在整个生态样线内,地势以低丘为主,平原盆地地区比例较大,受人为活动影响较大。生态样线穿越闽江下游及其入海口,同时受河流、海洋的影响,生态景观类型复杂,影响因素较多,其特征尺度不明显。

根据以上对不同纬度的生态样线分析,福州市北部、南部生态样线主导生态景观类型明显,NDVI 平均值较高,海拔高度高,坡度较陡,受人为活动影响较小,其特征尺度易于识别;而中部生态样线受到人类活动干扰影响较大,与闽江干流基本平行,同时受河流、海洋的影响较大,其特征尺度不易识别。由此可见,纬度本身对生态样线的特征尺度影响较小,不同纬度生态样线的特征尺度大小决定于样线本身的景观多样性、复杂性和受人类活动干扰的大小。

2.3 NDVI 在不同经度采样线上的特征尺度对比分析

根据表 4、表 5、图 5—图 7,研究区不同经度带上 NDVI 的空间格局分布存在显著差异,其尺度响应特征是:自西向东,随经度的变化,生态环境因子 NDVI 的特征尺度逐渐增大,小波细节信息方差显示西部样线特征尺度为第 5 尺度,中部样线特征尺度为第 6 尺度,而东部沿海区域的特征尺度为第 7 尺度,存在非常明显的特征尺度递增梯度。根据表 5,自西向东,NDVI 平均值、平均海拔高程、平均坡度和起伏度呈阶梯状依次递减,该梯度与 NDVI 特征尺度梯度吻合。由此可见,平均海拔高程低、坡度小、起伏度小对应于大 NDVI 特征尺度,否则 NDVI 特征尺度较小。这是由于高程低坡度小的沿海区域其景观斑块较大,景观一致性较好,相对应的 NDVI 变化较小,其空间特征尺度较大;而西部山区高程较高坡度较陡,其景观斑块破碎度高,相对应的 NDVI 值变化较大,其特征尺度较小。

2.4 NDVI 特征尺度空间分布的地学原因

整个研究区 6 个生态样线 NDVI 特征尺度大小与研究区的地形骨架(即地貌特征)密切相关。生态样线在不同纬度带上的主导特征尺度集中于第 4—5 尺度,而不同经度带上的特征尺度集中于第 6—7 尺度,这说明生态环境在纬度方向上的差异可以在较小尺度范围内可以被清楚识别,在纬度方向上生态景观的破碎度更高,类型更丰富;而在经度带方向,其差异表现于大尺度上,在经度方向上小尺度上的生态景观相似度较高,而大尺度上 NDVI 界限明显。

生态环境空间格局的成因之一为物理性因素(非生物的)^[28],物理性因素是生态环境格局形成的物理模板,包括地质构造、地貌特征、地形分布、气象条件等。大尺度上的物理性因素(如地质构造、地貌类型和气候因素)为 NDVI 生态环境空间分异性提供了物理模板。福州市 NDVI 特征尺度研究结果与福州市地质构造和地势走向密切相关。

研究区首先受控于福建省大区域地质构造体系,该区域经历了多次地壳运动,形成多种构造体系,但定型于燕山期的新华夏系构造。燕山运动奠定了福建北东向为主的地貌格局和闽西、闽中两大带的地形骨架。根据福建地貌分区,研究区位于闽中中山山原区之下的闽江中游侵蚀低山丘陵亚区、戴云山脉大起伏侵蚀山地和侵蚀剥蚀高位盆谷与丘陵状山原地亚区,闽东闽东南沿海区的闽东北滨海山丘基岩半岛-溺谷型海湾地貌亚区、沿海中段剥蚀山丘地与台地平原交错地貌亚区^[29]。

在北北东-南南西走向的构造体系背景控制之下,研究区内的主要地形特征为:西北高、东南低,西北-东南阶梯状地依次分布着中山、低山、丘陵、河谷盆地和沿海平原。根据图 1,以闽江为界限,闽江以北区域其山脉走向与闽江平行,呈西北-东南走向;而闽江以南区域其山脉走向垂直于闽江,平行于闽江支流,呈明显的北东-南西走向。该地势特征明显地影响着研究区各个生态环境样线的主导特征尺度,不同方向上生态样线的特征尺度受地质构造和地势走向的影响可以用地形起伏度来定量说明。

根据表 5,东西走向的生态样线其主导特征尺度为第 4—6 尺度,北北东-南南西走向的构造体系造成纬度方向上的样线割裂和破碎度较高,纬度走向的地形起伏度平均值、最大值和方差值明显高于经度走向的地形起伏度。而经度走向的生态样线其特征尺度集中于第 5—7 尺度,是由于北北东-南南西地质构造体系走向而

造成的割裂和破碎度相对较小,表现为地形起伏度平均值、最大值和方差明显小于纬度走向。由此可见生态样线其主导特征尺度的大小受控于区域构造体系和地势走向,该因素的作用只有在区域范围内得以体现,主导特征尺度受此因素的影响其变异范围在 1—3 个尺度范围内。

2.5 问题讨论

根据上述结论所得到的不同方向上生态样线的特征尺度研究结果,有必要增加生态样线的取样密度,并增加不同方向上的生态采样线进一步验证。此外生态环境区域特征尺度的地面验证问题同时也是一个需要研究的方向。

3 结论

(1)利用小波细节信息方差和信息熵可以构建生态样线的 NDVI 特征尺度域,该特征尺度域对应于可以明显识别生态景观异质性的斑块大小范围,NDVI 区域特征尺度为第 4—7 尺度,即空间分辨率为 $2^4 \times 900\text{m}^2 \dots 2^7 \times 900\text{m}^2$ 。

(2)NDVI 特征尺度域受纬度影响较小,在不同纬度方向上的变异受控于生态样线景观特征的多样性、人类活动对样线的干扰程度,人类活动强烈影响的区域特征尺度不明显,受人类活动影响较小的自然植被景观其特征尺度域明显。

(3)NDVI 特征尺度域自西向东依次递增,该梯度分布与生态样线 NDVI 平均值、平均海拔高程、平均坡度和起伏度自西向东依次递减的梯度相吻合,由此可见研究区东部样线海拔高程低、坡度小,景观斑块较大,所对应的 NDVI 特征尺度大,而海拔高程、地形起伏变化大的西部样线,景观斑块破碎,所对应的 NDVI 特征尺度较小。

(4)福州市 NDVI 特征尺度域在宏观上受限于当地北北东-南南西走向的构造体系背景,主导特征尺度受此因素的影响其变异范围在 1—3 个尺度范围内。

References:

- [1] Yan Y X, Xu J X. A study of scale effect on specific sediment yield in the Loess Plateau, China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(1): 102-112.
- [2] Zhao W W, Fu B J, Lu Y H, Chen L D. Land use and soil erosion at multi-scale. *Progress in Geography*, 2006, 25(1): 24-33.
- [3] Fu B J, Zhao W W, Chen L D, Lu Y H, Wang D. A multiscale soil loss evaluation index. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(4): 448-456.
- [4] Li S C, Cai Y L. Some scaling issues of geography. *Geographical Research*, 2005, 24(1): 11-18.
- [5] Meng B, Zhang B, Ding W H, Zhang H. A Hypothetic investigation about the uncertainty principle in the geography scale. *Geography and Geo-Information Science*, 2005, 21(6): 29-32.
- [6] Ying S, Li L, Yan H W, Zhai L, Wang H. Analysis of spatial scale in GIS. *Science of Surveying and Mapping*, 2006, 31(3): 18-22.
- [7] Zu Y G, Zhao Z H, Cong P T, He W G. An elementary study on the distributional rule of canopy gaps of *Larix gmelinii* forests using wavelet analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(6): 927-931.
- [8] Johnson C J, Boyce M S, Mulders R, Gunn A, Gau R J, Cluff H D, Case R L. Quantifying patch distribution at multiple spatial scales: applications to wildlife-habitat models. *Landscape Ecology*, 2004, 19: 869-882.
- [9] Wu J. Effects of changing scale on landscape pattern analysis: scaling relations. *Landscape Ecology*, 2004, 19: 125-138.
- [10] Zhang M F, Liao K, Zheng D X. A multi-scale analysis on the structure of integrated ecological information tupu based on the wavelet transform. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2007, 2(1): 21-27.
- [11] Keitt T H, Urban D L. Scale-specific inference using wavelets. *Ecology*, 2005, 86(9): 2497-2504.
- [12] Qiu B W. Scale effect analysis of driving forces of land-use patterns in Longhai city of Fujian province?. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(1): 70-78.
- [13] Li S C, Gao W M, Zhou Q F, Liu F Y. Multi-scale spatial analysis on NDVI and topographical factors using wavelet transform. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 4198-4203.
- [14] Li X B, Shi P J. China's major types of vegetation NDVI change research based on NOAA-AVHRR data. *Journal of Plant*, 1999, 41(3): 314-324.
- [15] Chen Y H, Li X B, Shi P J, Zhou H L. Estimating vegetation coverage change using remote sensing data in Haidian district. *Journal of Plant Ecology*, 2001, 25(5): 588-593.

- [16] Boyd D S, Foody G M, Curran P J. The relationship between the biomass of Cameroonian tropical forests and radiation reflected in middle infrared wavelengths. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20 (5): 1017-1023.
- [17] Chen J, Chen Y H, He Chun Y, Shi P J. Sub-pixel model for vegetation fraction estimation based on land cover classification. *Journal of Remote Sensing*, 2001, 5 (6): 416-422.
- [18] Guo Q X, Zhang F. Estimation of forest biomass based on remote sensing. *Journal of Northeast Forestry University*, 2003, 31 (2): 13-16.
- [19] Li R D, Liu J Y. An estimation of wetland vegetation biomass in the Poyang Lake using landsat ETM data. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56 (5): 532-540.
- [20] Qin Q Q, Yang Z K. *Applied wavelet analysis*. Xian: Xi Dian University Press, 1994: 1, 19-24.
- [21] Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets. *Communications On Pure and Applied Mathematics*, 1988, 41 (7): 909-996.
- [22] Mallat S G. A theory of multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 1989, 11 (7): 674-693.
- [23] Zhou F C, Wang S H, Yi Y, Zhou P C. *Common methods of mathematical statistics and the application*. Beijing: China Measurement Press, 2006: 100-102.
- [24] Liu X F, Zhou B T, Yang Q Y. Application of shannon entropy in the research of land-use composition — A Case Study of Jiangbei, Chongqing. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2004, 29 (6): 1062-1065.
- [25] Qian J P, Zhou Y, Yang X T. Confirmation of urban fringe area based on remote sensing and message entropy — case study of Jingzhou, Hubei Province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, 16 (4): 451-455.
- [26] Wang H, Yan L, Qian X, Zhu M. Integration terrain match algorithm based on terrain entropy and terrain variance entropy. *Computer Technology and Development*, 2007, 17 (9): 25-27.
- [27] Li F Y, Tang G A, Jia Y N. Scale effect and spatial distribution of slope spectrum's information entropy. *Geo-Information Science*, 2007, 9 (4): 13-18.
- [28] Wu J G. *Landscape ecology Pattern, Process, Scale and Hierarchy (2nd edition)*. Beijing: Higher Education Press, 2007: 27-28.
- [29] Zeng C S, Zheng D X, Yu X G. *The ecological environment in Fujian*. Beijing: China Environmental Science Press, 2005: 9-20.

参考文献:

- [2] 赵文武, 傅伯杰, 吕一河, 陈利顶. 多尺度土地利用与土壤侵蚀. *地理科学进展*, 2006, 25 (1): 24-33.
- [4] 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.
- [5] 孟宝, 张勃, 丁文晖, 张华. 地理尺度中不确定性原理的假设探讨. *地理与地理信息科学*, 2005, 21 (6): 29-32.
- [6] 应申, 李霖, 同浩文, 翟亮, 王红. 地理信息科学中的尺度分析. *测绘科学*, 2006, 31 (3): 18-22.
- [7] 祖元刚, 赵则海, 丛沛桐, 何卫国. 兴安落叶松林 (*Larix gmelinii*) 林窗分布规律的小波分析研究. *生态学报*, 1999, 19 (6): 927-931.
- [10] 张明峰, 廖克, 郑达贤. 基于小波变换的生态综合信息图谱的多尺度结构分析. *亚热带资源与环境学报*, 2007, 2 (1): 21-27.
- [12] 邱炳文. 福建省龙海市土地利用空间分布影响因子的尺度效应分析. *自然资源学报*, 2007, 22 (1): 70-78.
- [13] 李双成, 高伟明, 周富强, 刘逢媛. 基于小波变换的 NDVI 与地形因子多尺度空间相关分析. *生态学报*, 2006, 26 (12): 4198-4203.
- [14] 李晓兵, 史培军. 基于 NOAA-AVHRR 数据的中国主要植被类型 NDVI 变化规律研究. *植物学报*, 1999, 41 (3): 314-324.
- [15] 陈云浩, 李晓兵, 史培军, 周海丽. 北京海淀区植被覆盖的遥感动态研究. *植物生态学报*, 2001, 25 (5): 588-593.
- [17] 陈晋, 陈云浩, 何春阳, 史培军. 基于土地覆盖分类的植被覆盖率估算亚像元模型与应用. *遥感学报*, 2001, 5 (6): 416-422.
- [18] 国庆喜, 张锋. 基于遥感信息估测森林的生物量. *东北林业大学学报*, 2003, 31 (2): 13-16.
- [19] 李仁东, 刘纪远. 应用 Landsat ETM 数据估算鄱阳湖湿生植被生物量. *地理学报*, 2001, 56 (5): 532-540.
- [20] 秦前清, 杨宗凯. *实用小波分析*. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994: 1, 19-24.
- [23] 周富臣, 王生辉, 易英, 周鹏翔编著. *常用数理统计方法及应用实例*. 北京: 中国计量出版社, 2006: 100-102.
- [24] 刘筱非, 周宝同, 杨庆媛, 赵娅奇, 周滔. 信息熵在区域土地利用结构研究中的应用——以重庆市江北区为例. *西南师范大学学报 (自然科学版)*, 2004, 29 (6): 1062-1065.
- [25] 钱建平, 周勇, 杨信廷. 基于遥感和信息熵的城乡结合部范围界定——以荆州市为例. *长江流域资源与环境*, 2007, 16 (4): 451-455.
- [26] 王华, 晏磊, 钱旭, 朱明. 基于地形熵和地形差异熵的综合地形匹配算法. *计算机技术与发展*, 2007, 17 (9): 25-27.
- [27] 李发源, 汤国安, 贾旖旎, 曹志冬. 坡谱信息熵尺度效应及空间分异. *地球信息科学*, 2007, 9 (4): 13-18.
- [28] 邬建国. *景观生态学——格局、过程、尺度与等级 (第二版)*. 北京: 高等教育出版社, 2007: 27-28.
- [29] 曾从盛, 郑达贤, 余兴光编著. *福建生态环境*. 北京: 中国环境科学出版社, 2005: 9-20.