

基于空间小波变换的生态地理界线识别与定位

李双成¹, 赵志强^{1,2}, 高江波¹

(1. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871; 2. 北京大学深圳研究生院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055)

摘要: 为了提高生态地理分界线识别和定位的客观性, 探讨了通过空间小波变换获取多尺度模极大值定位过渡带的方法。以 NDVI 和降水作为小波多尺度分解的对象, 应用 db3 小波核函数分别对 49 条样带的模极大值进行了多尺度检测, 并在 GIS 中确定其地理坐标。研究表明: 识别半干旱半湿润生态地理分界线的最佳空间尺度为 20 ~ 40 km, 小于这一尺度定位过程容易受到局部地表覆被因素如城市区域或地形的影响, 大于这一尺度由于要素被过度平滑, 造成定位不准; 从定位点的聚集度分析, NDVI 的定位效果好于降水, 特别是在较大空间尺度上。而与综合自然地理区划方案中的半干旱半湿润分界线比较, 从定位点的方向性、平均最短距离以及均衡度三项指标综合判断, 小波变换对于降水过渡带的定位优于对 NDVI 的定位。研究证实, 空间小波变换与 GIS 结合是提高生态地理分界线识别与定位科学性的重要途径, 是对专家系统划分界线方法的有力补充和完善。

关键词: 生态地理界线; 空间小波变换; 多尺度分解; GIS

文章编号: 1000-0933(2008)09-4313-10 中图分类号: Q149 文献标识码: A

Identifying eco-geographical boundary using spatial wavelet transform

LI Shuang-Cheng¹, ZHAO Zhi-Qiang^{1,2}, GAO Jiang-Bo¹

1 College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2 The Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(9): 4313 ~ 4322.

Abstract: This paper attempts to use spatial wavelet transformation derived multi-scale module maximum as a geographical locator to objectively identify eco-geographical transition zone and its boundary. Employing the spatial patterns of NDVI and precipitation, we decomposed 49 transects with wavelet transformation of db3 kernel function. The geographical coordinates of all singularity points were located and marked in GIS. The results show that optimal spatial scale for identifying eco-geographical boundary of semiarid-subhumid transition zone is about 20—40 km. When the scale is less than this threshold value, the locating process is likely influenced by local scale ground structure such as built-up areas or fine scale landforms. On contrary, when the scale is larger than 20—40 km, the accuracy of locating points will drop sharply owing to over-smoothing treatment. In spite of the higher concentration degree of NDVI derived locating points than that of precipitation derived, the comprehensive locating accuracy for precipitation transition zone is superior to that of NDVI spatial pattern in terms of long axis direction coherence, mean minimum distance and point balance degree indicates. Our results suggest that the combination of spatial wavelet transformation and GIS is a powerful complement approach to expert based eco-geographical transition zone identification and locating.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40771001); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2005CB422006)

收稿日期: 2008-03-17; 修订日期: 2008-06-21

作者简介: 李双成(1961 ~), 男, 河北平山人, 博士, 副教授, 主要从事地表格局与过程复杂性计算和模拟研究。E-mail: scli@urban.pku.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China(No. 40771001) and National Key Research Development Plan, China (No. 2005CB422006)

Received date: 2008-03-17; **Accepted date:** 2008-06-21

Biography: LI Shuang-Cheng, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in modelling and computing the complexity of surface patterns and processes. E-mail: scli@urban.pku.edu.cn

Key Words: eco-geographical boundary; spatial wavelet transformation; multi-scale decomposition; GIS

生态地理过渡带是各种自然过程和格局剧烈变化的区域,对其进行研究具有重要的科学和实践价值。首先,过渡带是不同生态地理区域的邻接区域,各种生态地理过程相互作用,呈现出异质性和复杂性,对其定位与识别有利于深化格局与过程及其相互关系研究;其次,过渡带物种分布较为集中,边缘种尤其丰富,对生境的异质性和物种分布关系的研究有助于科学管理生物多样性;第三,过渡带常常是生态脆弱带,而且对于全球气候变化的响应敏感,对其研究可以为生态恢复与重建,以及应对全球变化区域响应决策提供科学依据^[1~4]。

近年来,在生态地理界线的识别和划分方面一些学者尝试新的技术和方法,如晏路明和张军涛等人应用可拓工程法对南亚热带北界和中温带半湿润、半干旱区之间的界线进行了确认^[5,6],匡乐红、刘宝琛和姚京成应用模糊可拓工程法完成了泥石流危险度区划^[7],史舟、吴宏海、王人潮探索了图论树算法在区划中的应用^[8],匡乐红等人用粗糙集算法筛选了泥石流危险度的区划指标^[9],李双成、郑度、张懿铨用 SOFM 网络对青藏高原生态资产进行了区域划分^[10],范泽孟和岳天祥等构建了生态区边界的智能识别模型^[11]。Fortin 等人评述了生态边界探测和区分的遥感、统计和数值模拟等方法^[12]。

归纳起来,目前生态地理界线识别的方法主要有两大类。一类是基于 GIS 平台的空间叠置法,即利用 GIS 的空间分析功能,将单一要素或多个要素图层叠置,分析其过渡带或过渡界线的位置。这是传统区划专家方法的进一步发展;另一类是基于的统计方法,即通过采样获取生态地理要素的样本数据,采用统计模型完成生态地理界线的识别和定位。早期的统计方法主要是聚类分析、因子判别分析和主成分分析等,近年来已逐步拓展到一些非参数化的机器学习算法,如人工神经网络、支撑矢量机、粗糙集方法等。尽管已有的方法和技术提高了生态地理界线识别与定位的科学性,但仍有一些需要改进的地方。GIS 空间叠置法虽能准确定位,但缺乏多尺度的表达,而且数理基础不够,泛化程度较低。统计方法的分析结果需要借助 GIS 才能准确定位,并且识别精度也需进一步提高。大量的研究证实,许多生态地理过程与格局是尺度依存的^[13~15],每一自然过程都有其作用的时间和空间范围,因而需要多尺度透视其变化过程及其空间特征才能寻找到准确的分界线。由此看来,采用新的方法和技术进行生态地理界线的研究仍是具有挑战性的课题。

1 技术与方法

1.1 生态地理界线定位与识别原理

生态地理过渡带是各种自然过程或要素的空间分布呈现不连续性或奇异性的区域。一般来说,这种不连续或奇异性表现为两种型式^[16](图 1),一种为显性不连续,表现为生态系统的某种特征(如种类数量、覆盖度、生物量、生产力等)或外在影响因子(自然或人文)呈现明显的升高或降低,出现间断点;第二类不连续是上述生态系统特征或影响因子的空间分布平稳,呈现光滑性,没有明显的升高或下降,但对其进行一阶微分,可以发现其奇异性。如果一个函数 $f(t)$ 在 t_0 有不连续度 $k, k=0,1,\dots$ 。如果对这一函数进行 k 阶左右求导,即:

$$f^{(k)}(t_0+) \neq f^{(k)}(t_0-) \quad (1)$$

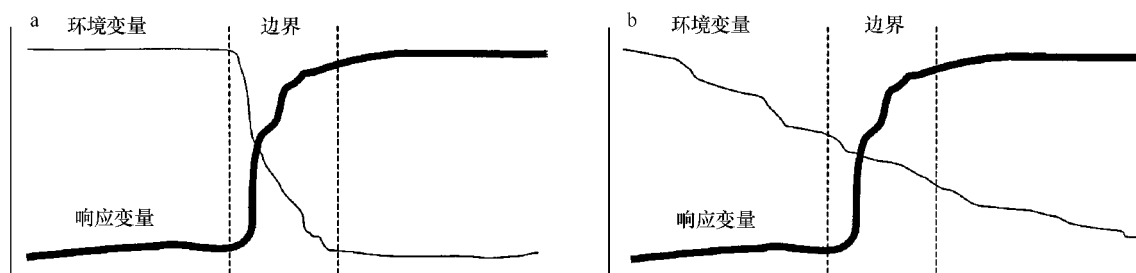
则两者的差值 $f^{(k)}(t_0+) - f^{(k)}(t_0-)$ 就是它的不连续度 k ^[17]。

通常,第一类间断点或称奇异点容易识别,对某一特征值在 GIS 平台上做空间分布图或剖面线就能发现。第二类间断点比较难发现,通常需要对采样数据进行微分变换,并在多尺度分析工具下检测和定位。

1.2 空间小波变换

Otnes 和 Enochson 等人把小波变换应用到空间分布信号的奇异性检测上,即通过简单的变换,将时间域变量 t 替换为空间变量 x ^[18,19]。如果地理空间某一要素空间采样成的系列为 $S(x)$,则与时间域小波变换类似,生态地理界线识别的空间连续小波变换(Spatial continuous wavelet transform, SCWT)形如下式:

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi_{a,b}\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (2)$$

图1 生态地理过渡带的两种类型^[16]Fig. 1 The types of eco-geographical transition zone and boundary^[16]

a 环境变量梯度陡,变化迅速,对应于第一类间断点 steep gradient in the environmental variable, corresponding to the first singularity; b 环境变量梯度小,呈缓慢变化,对应于第二类不连续类型 gradual environmental gradient, corresponding to the second singularity

$$\text{SCWT}(a, b, x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_0^k S(x) \psi_{a,b} \left(\frac{x-b}{a} \right) dx \quad (3)$$

本研究采用 Daubechies 小波核函数(db)。Daubechies 小波是一类二进小波,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 $\Psi(\omega=0)=0$ 上,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:

$$\psi(t) = \sum_k g_k \phi(2t-k) \quad (4)$$

图2是 Daubechies 小波簇中的 db3。之所以选择 db3 是因为其对待分解的对象具有良好的分解、重构和局部定位能力(具有紧支撑集)。国内外许多奇异点或不连续的检测工作大多是用 db3 来完成的。

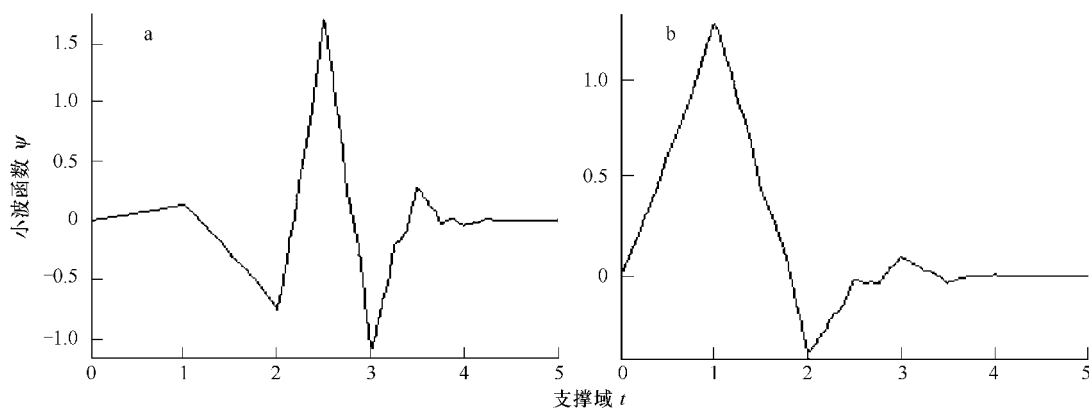


图2 db3 小波示意图

Fig. 2 wavelet function psi of db3

a db3 核函数 the kernel function of db3, b db3 尺度函数 db3 scaling function

2 数据和模型计算

2.1 研究区概况

研究区位于我国华北地区,地理范围为 $42^{\circ}27'05'' \sim 36^{\circ}19'07''$ N, $109^{\circ}18'36'' \sim 119^{\circ}40'36''$ E。地貌类型齐全,从东南部的平原,向西和向北依次为丘陵、山地和高原,海拔高度在 $0 \sim 3200$ m。气候类型属暖温带大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季炎热多雨。区内气候特征分异明显,年均降水量 $170 \sim 866$ mm,年均温在 $-4 \sim 15^{\circ}\text{C}$ 。平原区的地表覆盖受人为影响显著,多为农用地和城镇建设用地,自然植被已经稀少;太行山和燕山区自然植被类型为温带落叶阔叶林,建群种为山地桦杨林和栎类林,常绿针叶林也混生期间;高原区的自然植被为典型草原和草甸草原,但多有垦殖。

在本区的山地与高原过渡区域是半湿润半干旱分界线,也是我国重要的农牧交错带。脆弱的生态环境以及不尽合理的生产方式,使得这一区域成为生态敏感区。在气候大背景的作用下,近年沙尘灾害频发,直接影响到这一地区的社会经济发展,同时对首都生态安全构成一定威胁。

2.2 数据来源

2.2.1 NDVI

本研究所采用的 2006 年 NDVI 数据来自 SPOT-VEGETATION 逐旬数据,经过取最大值和平均得到。VEGETATION 传感器由 SPOT-4 于 1998 年 3 月搭载升空,并于该年 4 月由瑞典的 Kiruna 地面站开始接受 SPOT VGT 数据。影像质量监控由法国 Toulouse 图像中心负责,数据处理由比利时佛莱芒技术研究所 (Flemish Institute for Technological Research, Vito) VEGETATION 影像处理中心 (VEGETATION Processing Centre, CTIV) 完成,处理成逐日 1km 的全球数据,提供给用户。预处理包括大气校正、辐射校正、几何校正,并将 NDVI 指数 -1 到 -0.1 的值设置为 -0.1,再通过公式 $Y_{DN} = (I_{NDVI} + 0.1) / 0.004$ 拉伸为 0 ~ 255 的灰度图像^[20]。

2.2.2 降水量

年均降水量的数据来自高空间分辨率的 Worldclim 数据库^[21]。该数据库包括月降水量、月最高气温和最低气温以及 19 个派生的生物气候变量,由全球 1950 ~ 2000 年的 47554 降水记录、24542 平均气温记录和 14835 最高和最低气温记录内插而成。基于以经度、纬度和海拔高度为自变量的二阶样条 ANUSPLIN-SPLINA 程序,将气候变量内插成空间分辨率为 30" (在赤道为 $0.93 \times 0.93 = 0.86 \text{ km}^2$,在中高纬度近似 1 km^2)、2.5'、5'和 10'等 4 种形式的栅格数据,有一般栅格和 ESRI 栅格两种格式。投影为经纬度,大地基准面 (datum) 为 WGS84。

所有栅格的气候数据均可在 <http://www.worldclim.org/> 免费下载。为与 NDVI 和数字地形高程数据匹配,本研究采用 30"分辨率的数据。

2.3 计算过程

2.3.1 空间采样

要进行小波尺度变换,首先要进行空间重采样,构建分析所用的系列数据。在 ArcGIS 9 (ESRI Inc. 1999 ~ 2006) 中按照纬线生成 49 条东西方向的样带,每一样带有 600 个样点。为了消除样点小带来的取样误差,每一样点设置成 $1 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 大小。然后利用 Spatial analyst 中的 Zonal statistics 命令分别提取年均 NDVI 和降水量,并获取每个样点的经纬度坐标值。最后,将分别构建好的 NDVI 和年降水量系列存成 Excel 数据格式备用。

2.3.2 模极大值检测

采用小波变换来检测系列或过程的突变点,其原理是分析小波变换系数模的特性。一般来说,信号过程的突变点在小波变换域常对应于小波变换系数模的极值点或过零点,并且在不同的尺度上,小波系数的极值点与信号突变性的大小和位置相互对应 (图 3)。因此,通过比较不同尺度上的小波系数的极值 ($a_1, a_2, \dots, a_n$)、李氏指数 α (Lipschitz index) 和平滑因子 σ ,就可以判定信号突变点的位置,并计算出幅度大小 k ^[22]。上述介绍的方法是针对过程序列而言的,对于空间格局数据的分析需要变换一定的形式。原理为将时间性的平移因子替换成某一地理要素的空间位置 (地理坐标),形如。大多数地理要素的空间分布是连续的,与过程分析一样,在实际计算时需要进行空间重采样。在完成 NDVI 和降水的空间采样后,用 db3 小波获取每一样带所有尺度的极大模值点 (图 3)。

2.3.3 小波方差图

将时间 (空间) 域上所有小波系数的平方进行积分,可得到小波方差,其随尺度变化过程为小波方差图。小波方差图能反映系列中所包含的各种尺度 (周期) 的波动及其强弱 (能量大小) 随尺度变化的特性。因此,通过小波方差图可直观地确定一个序列中起主要作用的尺度 (周期)。如果在小波尺度方差图上发现明显的

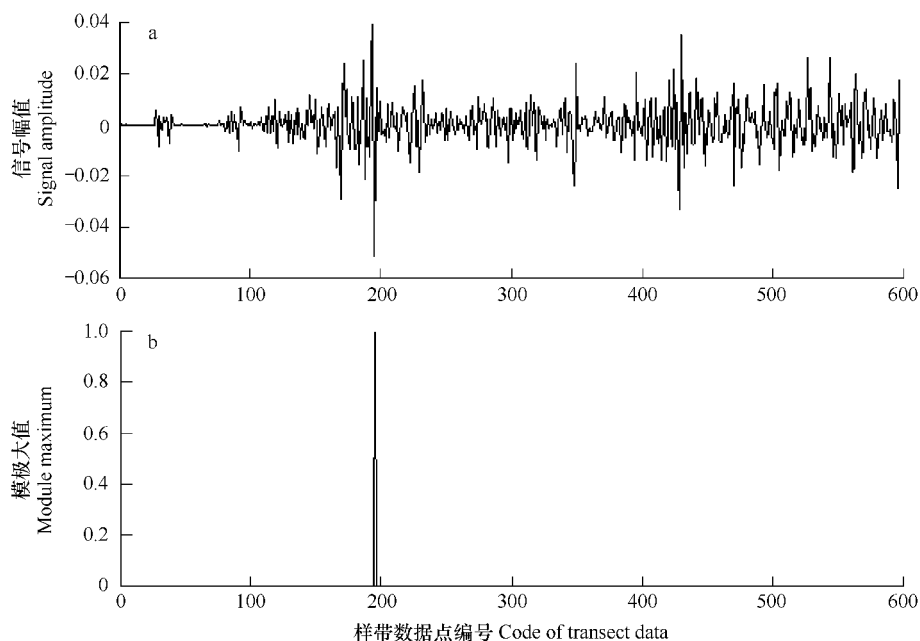


图3 样带检测模极大值点示例

Fig. 3 Illustration of detecting module maximum value in transect

a 原始信号 signal, b 模极大值位置 the location of module maximum

拐点,则说明格局或过程具有显著的尺度域转换。

利用公式3,分别对 NDVI 和年降水系列进行多尺度分解,最大分解尺度为小波尺度 128(由于 db3 小波的中心频率为 0.8,故换算成空间尺度约为 160 km。有关小波尺度与空间尺度的换算关系,下同。),已达到样带长度的四分之一强。在实际工作中,为了获得无偏的估计量,在计算小波方差时应当删除所有受周期性边界条件影响的小波系数,所以有:

$$\hat{v}_x^2(\tau_j) \equiv \frac{1}{\tilde{N}_j} \sum_{t=L_j-1}^{N-1} \hat{w}_{j,t}^2 \quad (5)$$

这里, $\tilde{N}_j = N - L_j + 1$, 以及 $L_j = (2^j - 1)(L - 1) + 1$ 是尺度为 τ_j 的小波滤波器的长度。

图4为49条样带中其中一条的NDVI和降水小波方差示意图。为了表示方便,降水的小波方差进行了1/10缩放。从图中可以看出,无论是NDVI还是降水,其主要尺度域在8~24db3小波尺度范围内。

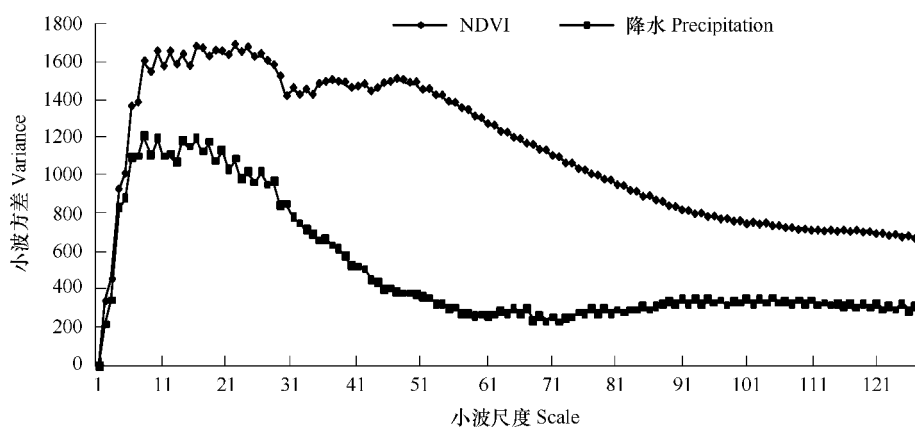


图4 小波方差图示例

Fig. 4 Illustration of wavelet variogram

3 结果与检验

3.1 模极大值点位空间格局

应用 db3 作为小波核函数,分别将 NDVI 和降水的所有样带进行多尺度分解,应用模极大值方法检测和定位突变点,并在 GIS 下标出其地理位置,结果如图 5 和图 6。

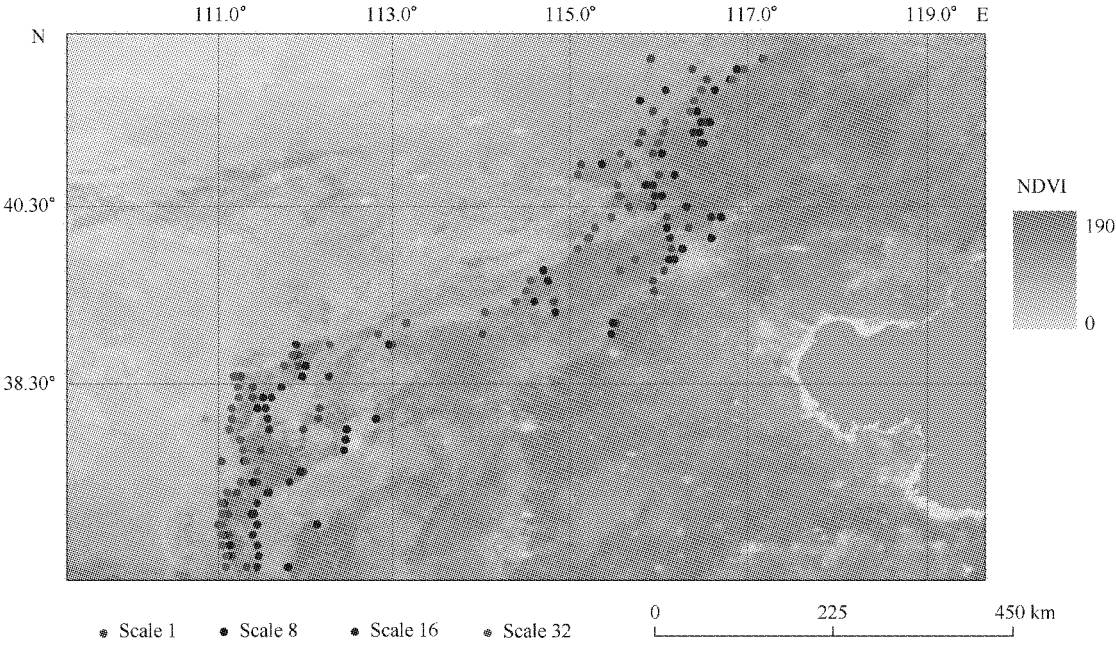


图 5 不同尺度下 NDVI 模极大值的空间分布

Fig. 5 The spatial patterns of NDVI module maximum values on different wavelet scales

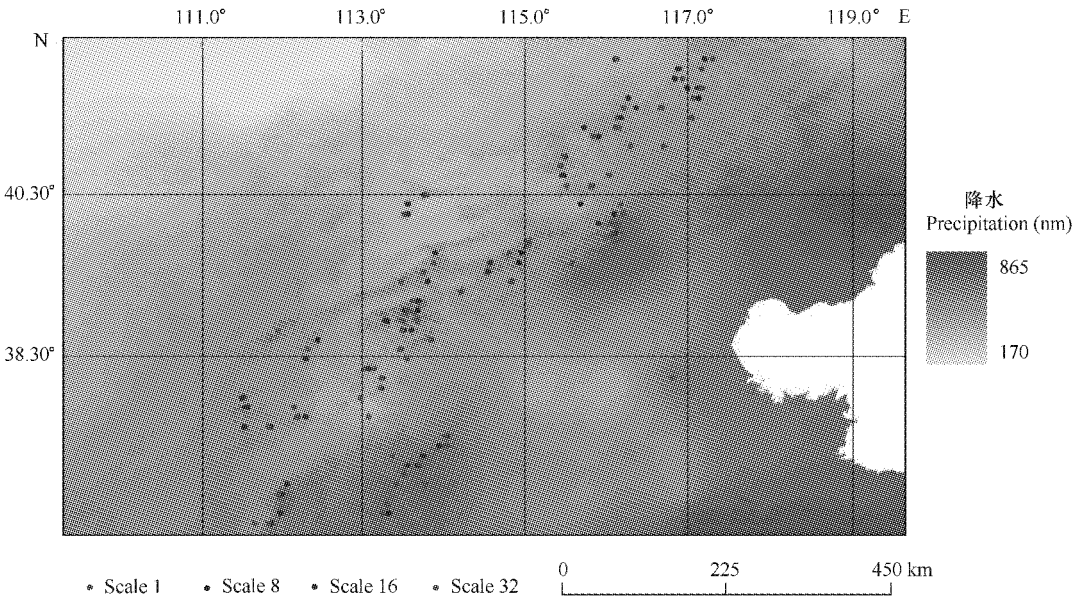


图 6 不同尺度下降降水模极大值的空间分布

Fig. 6 The spatial patterns of precipitation module maximum values on different wavelet scales

从图 5 中可以看出,不同尺度下检测到的 NDVI 的模极大值点的位置及空间格局是不同的。小尺度下(小波尺度 1 和尺度 8)这些位置点比较分散,整体分布偏东。这是因为小尺度下容易检测到局部的扰动点,

东部地区有一些大城市引起 NDVI 空间分布的不连续,出现突变点在大中城市附近积聚的现象;而在较大尺度下(小波尺度 16 和尺度 32)突变点分布比较规则,集中程度加强。同时,这些点位受大中城市的“束缚”效应减弱。这是因为,在较大尺度下一些局部小的扰动被作为“噪声”滤掉,只有一些全局性的突变点才能表现出来。

图 6 是在不同尺度下检测到的降水模极大值出现的空间位置和分布状况。与 NDVI 的分布格局相似,在中小尺度上降水的模极大值出现的点位较为分散,而在较大尺度下点位分布相对集中,以尺度 16 分布最为规则。

为了判定小波多尺度定位结果的性能,采用 ArcGIS 中的高/低聚类分析工具(high/low clustering)来测定每一尺度 NDVI 和降水上定位点的聚合程度。G index 值越高,越趋向于高聚类,相反为分散格局。Z 值为正且越大,点位分布趋向于高度聚类,相反为弥散分布。显然,聚合程度高说明定位性能较优,相反点位分散说明结果较差。从分析结果(表 1)可以看出,对于 NDVI 格局来说,采用 db3 小波变换在尺度 16 和尺度 32(空间尺度约 20~40 km)上表现出较高的聚集度。对于降水格局来说,尺度 16(空间尺度约 20 km)的聚集度最高。

表 1 小波分析各尺度下定位点聚集度

Table 1 The concentration degree of locating points on differnt wavelet scales

项目 Item	指标 Index	尺度 1Scale 1	尺度 8Scale 8	尺度 16Scale 16	尺度 32Scale 32
NDVI	G index	0.95	0.83	1.08	1.14
	Z-score	7.85	6.37	9.99	9.7
降水 Precipitation	G index	0.86	0.81	0.81	0.73
	Z-score	5.97	5.18	6.24	3.05

比较 NDVI 和降水上的模极大值分布格局可以发现两者的差异之处。整体来看,NDVI 上所有尺度的点位分布比较集中,而降水上的点位相对分散;NDVI 上的点位易受大中城市或水体的影响,因为这些地表覆盖物表现出与植被明显不同的光谱特性,增加了 NDVI 空间分布的异质性。降水上的点位格局受到地形因子的作用明显,这也证实了地形对于降水分布的制约效应。

3.2 结果检验

为了检验小波定位结果的可靠性及可用性,用黄秉维综合自然区划方案中半湿润半干旱分界线作为检验标准^[23]。前面采用高/低聚类分析证实,小波 16 尺度(空间尺度约 20 km)是较佳的定位尺度,因而与综合自然区划界线的比较就采用这一尺度。图 7 是 NDVI 和降水过渡带定位点与综合自然区划半干旱半湿润界线的空间位置关系。因为区划分界线有一明显的折点,采用分段比较更为精确。

使用主方向一致性(long axis direction coherence, *LADC*)、平均最短距离(mean minimum distance, *MMD*)和点位均衡度(point balance degree, *PBD*)3 个指数来比较小波定位结果,分别定义如下:

$$LADC = \cos(R_i - W_i) \quad (6)$$

式中, *LADC* 表示主方向一致性, R_i 和 W_i 分别表示自然综合区划界线与小波定位点(NDVI 与降水)主轴方向(以正北为 0°, 顺时针方向计算)。 *LADC* 值越接近 1, 表示主方向一致性越高。

$$MMD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i \quad (7)$$

式中, *MMD* 表示所有点位距离区划界线的平均最短距离, n 为 NDVI 或降水的定位点数, D_i 为某一定位点到综合区划界线的最短距离。平均最短距离越小表示定位效果越好。

$$PBD = \frac{n_1}{n_2} \times 100\% \quad (8)$$

式中, *PBD* 为点位均衡度, n_1 为区划界线一侧的点位数, n_2 表示线另一侧的点位数, *PBD* 取值范围 0~1, 越大表明定位效果越好。

从图 7 可以直观地看出,不论是 NDVI 还是降水模极大值点位分布的主轴方向与综合自然区划方案基本

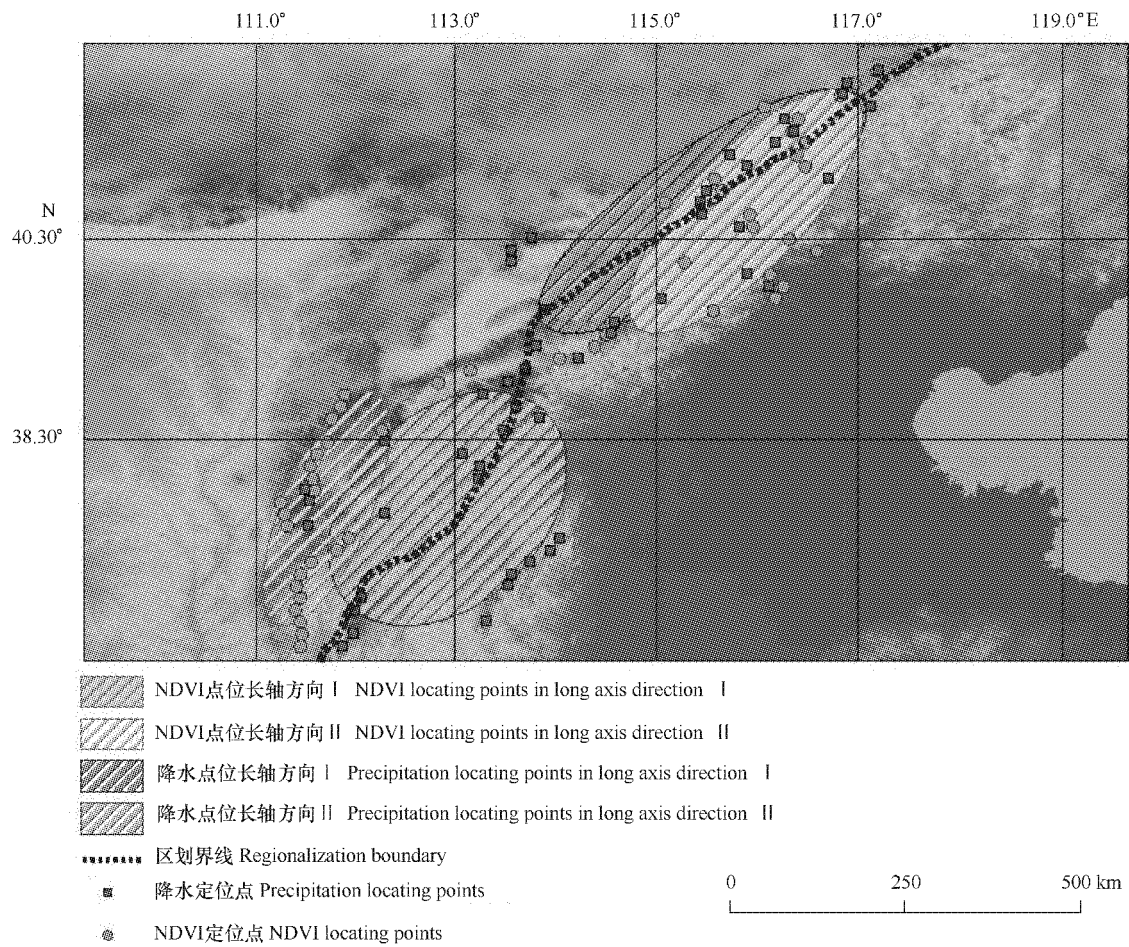


图7 小波尺度16(空间尺度约20 km)下定位点与自然区划界线的比较

Fig. 7 Comparison on locating points on wavelet scale 16 (approximately 20 km) with boundary of physiogeographical regionalization

一致(表2)。整体来看,降水定位点的分布方向与区划界线的一致程度高于NDVI定位点,尤其是在北段。降水与区划界线的主方向一致性可达1.0(北段)和0.99(南段),而NDVI与区划界线的主方向一致性亦达到0.98(北段)和0.92(南段)。49个降水点位距分界线的平均最短距离为35.08 km,最大为100.65 km,最短为0 km(点在线上);49个NDVI点位距分界线的平均最短距离为49.25 km,最大为116.89 km,最短为0 km(点在线上)。降水小波点位的均衡度为81.5%,而NDVI点位均衡度为48.5%。由此可见,以专家综合自然区划的分界线作为参照物,小波点位的主方向性、平均最短距离以及分布均衡度三项指标说明,降水的小波定位效果优于NDVI。事实上,综合自然区划的半干旱半湿润分界线是以水分作为划分指标的,降水过渡带的小波定位效果优良也说明了小波多尺度方法的优势。

表2 自然综合区划界线与NDVI和降水小波定位点主轴方向比较(以正北顺时针方向计算)

Table 2 Comparison on long axis of wavelet locating points with boundary of physiogeographical regionalization (clockwise rotation from north 0 degree)

项目 Item	北段方向(°)	南段方向(°)
	Direction of north segment	Direction of south segment
区划界线 Regionalization boundary	56.18	37.69
NDVI定位点 Locating points of NDVI	43.43	22.94
降水定位点 Locating points of precipitation	55.24	46.59

4 结论与讨论

4.1 结论

本文在 GIS 支撑下以 NDVI 和降水作为划分对象,尝试应用空间小波变换进行生态地理分界线的定位和识别,并用专家划分的结果进行了检验,结论为:

(1)经过小波 NDVI 和降水的多尺度检测,可以发现 20 ~ 40 km 是确定半干旱半湿润生态地理分界线的空间尺度域。在这一尺度域内 NDVI 和降水的小波系数的模极值点分布聚集,分布方向与已有的区划界线基本一致;

(2)以综合自然区划方案中半干旱半湿润分界线作为检验标尺,尽管降水小波定位点聚集度小于 NDVI,但综合判断点位方向性、分布均衡度以及与分界线距离综合 3 项指标,小波变换对于降水格局空间过渡性的表达效果优于 NDVI;

(3)研究证实,在 GIS 支撑下空间小波变换能够有效地识别和定位重要的生态地理分界线,特别是对于环境变量空间变换梯度小,其它方法难以识别的地区或要素。如果这种方法辅以专家经验,可以提高界线定位的准确性。

4.2 讨论

通过研究发现,选择合适的空间尺度来识别和定位生态地理分界线是必须要考虑的问题。

(1)小尺度下模极大值点分布比较散乱,而在较大尺度下则分布比较集中。其原因是在小尺度下样线上一些小的波动或奇异点也能被检测出来,而大尺度下一些局部奇异点已被滤掉。一般认为在较大尺度下常能比较可靠的消除误检和检测到真正的边界点,但在大尺度下对边界的定位不准确。相反,在较小尺度下对真正边界点的定位常比较准确。但在小尺度下误检的比例会增加。所以,可考虑先在较大尺度下检测出真正的边界点,再在较小尺度下对真正的边界点进行较精确的定位。

(2)同一尺度下不同样线大于阈值的模极大值点数与样线的复杂性程度有关。样线经过的地区,下垫面覆盖类型越复杂,或地表覆盖差异越大,大于阈值的模极大值点数就越多。在小波分析中如何选择最佳的极值点位置,可以有两途径,一是最短距离法,即考虑与临近点距离最短的极值点。二是根据专家的经验判断。

(3)NDVI 定位点的空间格局容易受到地表覆盖类型的影响,降水定位点的分布则常常受到地形因子的制约。由于本区域大中城市较多,人类活动强度大,故在一定程度上影响了 NDVI 定位效果。而降水点位虽受地形条件的制约,但较大尺度的规则性较大,整体定位性能较高。尽管在空间小波变换中可以考虑提高尺度来消除这些因素的影响,但在实际区划工作中,划分对象不同,考虑的因素及其尺度应当有差别。

(4)不论是 NDVI 还是降水,其空间分布均存在空间自相关。如何避免这一特性对分区界线识别的影响,选择大于自相关距离的小波尺度是一种可以借鉴的做法。

生态地理区域是地表自然界生物因素和非生物因素的综合体,生态地理界线位置受到自然界温度、水分、土壤、植被等多种因素共同作用,对界线的识别和定位是一个复杂而综合的科学问题,本文以 NDVI 和降水数据为例探讨此问题的技术与方法,无疑具有积极意义。

References:

- [1] Zheng D, Ge Q S, Zhang X Q, *et al.* Regionalization in China: retrospect and prospect. *Geographical Research*, 2005, 24(3):330—344.
- [2] Liu Y H, Zheng D, Ge Q S, *et al.* Problems on the research of comprehensive regionalization in China. *Geographical Research*, 24(3):321—329.
- [3] Yang Q Y, Zheng D, Wu S H. Eco-geographic region study in China. *Progress in Nature Science*, 2002, 12(3):287—291.
- [4] Wu S H, Zheng D. New Recognition on Boundary between Tropical and Subtropical Zone in the Middle Section of Ecogeographic System. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(6):689—697.
- [5] Yan L M. Application of extension engineering method to division of physical geography boundary. *Geographical Research*, 1999, 18(1): 53

—58.

- [6] Zhang J T, Li Z, Zheng D. Demarcation of the eco-geographical system based upon the extension engineering method — taking semi arid and sub humid areas in mid temperate as an example. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(1): 24 — 31.
- [7] Kuang L H, Liu B C, Yao J C. Research on regionalization of debris flow risk degree with fuzzy and extension method. *Journal of Catastrophology*, 2006, 21(1): 68 — 72.
- [8] Shi Z, Wu H H, Wang R C. Application of spatial analysis and optimal tree cluster in agricultural division. *Journal of Image and Graphics*, 2000, 5(3): 245 — 248.
- [9] Kuang L H, Xu L R, Liu B S, *et al.* A new method for choosing zonation indicators of mudflow danger degrees based on the rough set theory. *Journal of Geomechanics*, 2006, 12(2): 236 — 242.
- [10] Li S C, Zheng D, Zhang Y L. Application of SOFM neural network to ecological assets regionalization in Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(6): 751 — 756.
- [11] Fan Z M, Yue Tianxiang. Intelligent recognition model of the ecoregion boundary. *Geo-Information Science*, 2007, 9(1): 40 — 45.
- [12] Fortin M J, Olson R J, Ferson S, *et al.* Issues related to the detection of boundaries. *Landscape Ecology*, 2000, 15: 453 — 466.
- [13] Levin S A. The problem of pattern and scale in ecology. *Ecology*, 1992, 73: 1943 — 1967.
- [14] Li Y H, Fu B J. Ecological scale and scaling. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2096 — 2105.
- [15] Li S C, Cai Y L. Some scaling issues of geography. *Geography Research*, 2005, 24(1): 11 — 18.
- [16] Fagan W F, Fortin M J, Soykan C. Integrating edge detection and dynamic modeling in quantitative analyses of ecological boundaries. *BioScience*, 2003, 53(8): 730 — 738.
- [17] Lee. Discontinuity detection and curve fitting. In: Chui C. K. *et al.* eds. *Approximation Theory VI*, Vol. 2, Academic Press, 1989. 373 — 376.
- [18] Otnes R K, Enochson L. *Applied time series analysis*. John Wiley, 1978, N-Y.
- [19] Zhao S, Wang J, Zhou L H. Image retrieval based on multi-scale euler vector. *Infrared Technology*, 2006, 28(12): 704 — 708.
- [20] Song Y, Ma M G. Study on vegetation cover change in northwest china based on SPOT VEGETATION Data. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(1): 89 — 93.
- [21] Hljmans R J, *et al.* Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.*, 2005, 25: 1965 — 1978.
- [22] Peng Y H. *Wavelet Transform and engineering application*. Beijing: Science Press, 1999.
- [23] Huang B W. Draft of the complex physical geographical division of China. *Scientia*, 1959, 4(18): 549 — 602.

参考文献:

- [1] 郑度, 葛全胜, 张雪芹, 等. 中国区划工作的回顾与展望. *地理研究*, 2005, 24(3): 330 ~ 344.
- [2] 刘燕华, 郑度, 葛全胜, 等. 关于开展中国综合区划研究若干问题的认识. *地理研究*, 2005, 24(3): 321 ~ 329.
- [3] 杨勤业, 郑度, 吴绍洪. 中国的生态地域系统研究. *自然科学进展*, 2002, 12(3): 287 ~ 291.
- [4] 吴绍洪, 郑度. 生态地理区域系统的热带北界中段界线的新认识. *地理学报*, 2000, 55(6): 689 ~ 697.
- [5] 晏路明. 可拓工程方法在自然地理界线划分中的应用. *地理研究*, 1999, 18(1): 53 ~ 58.
- [6] 张军涛, 李哲, 郑度. 基于可拓工程方法的生态地理区域系统界线划分研究——以中温带半湿润, 半干旱区为例. *地理学报*, 2001, 56(1): 24 ~ 31.
- [7] 匡乐红, 刘宝琛, 姚京成. 基于模糊可拓方法的泥石流危险度区划研究. *灾害学*, 2006, 21(1): 68 ~ 72.
- [8] 史舟, 吴宏海, 王人潮. 空间分析技术和图论树算法在农业区划中的应用. *中国图象图形学报*, 2000, 5(3): 245 ~ 248.
- [9] 匡乐红, 徐林荣, 刘宝琛, 等. 基于粗糙集原理的泥石流危险度区划指标选取方法. *地质力学学报*, 2006, 12(2): 236 ~ 242.
- [10] 李双成, 郑度, 张德铨. 青藏高原生态资产地域划分中的 SOFM 网络技术. *自然资源学报*, 2002, 17(6): 751 ~ 756.
- [11] 范泽孟, 岳天祥. 生态区边界智能识别模型构建分析. *地球信息科学*, 2007, 9(1): 40 ~ 45.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [19] 赵珊, 王娟, 周利华. 基于多尺度欧拉矢量的图像检索算法. *红外技术*, 2006, 28(12): 704 ~ 708.
- [20] 宋怡, 马明国. 基于 SPOT VEGETATION 数据的中国西北地区植被覆盖变化分析. *中国沙漠*, 2007, 27(1): 89 ~ 93.
- [22] 彭玉华. *小波变换与工程应用*. 北京: 科学出版社, 1999.
- [23] 黄秉维. 中国综合自然区划草案. *科学通报*, 1959, 4(18): 594 ~ 602.

3 结果与检验

3.1 模极大值点位空间格局

应用 db3 作为小波核函数, 分别将 NDVI 和降水的所有样带进行多尺度分解, 应用模极大值方法检测和定位突变点, 并在 GIS 下标出其地理位置, 结果如图 5 和图 6。

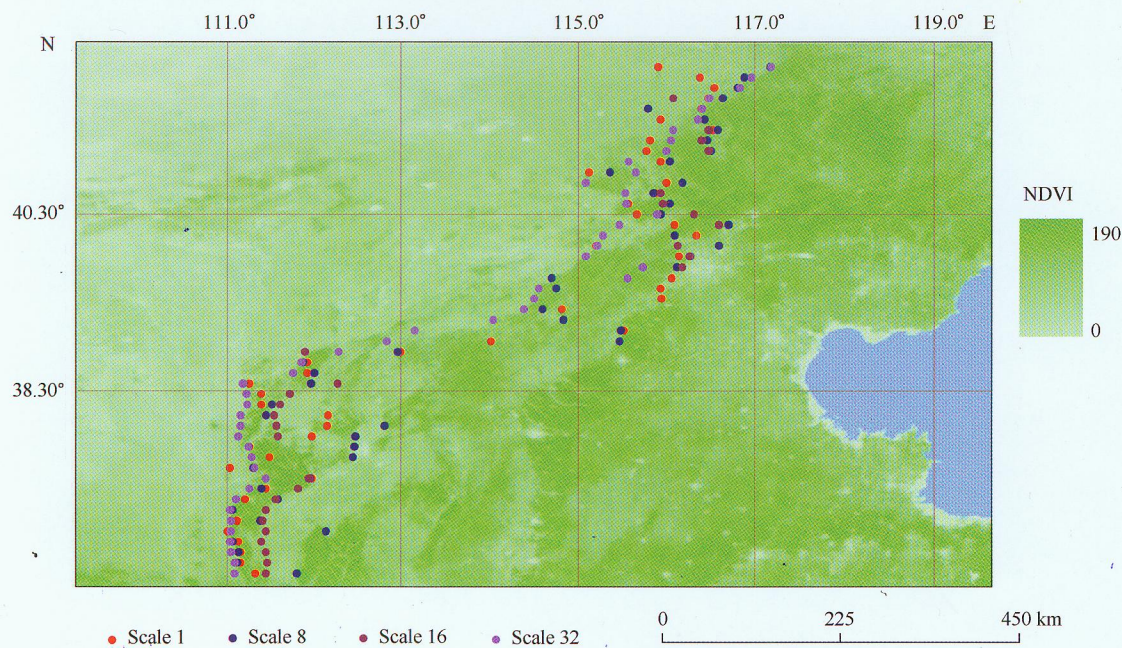


图 5 不同尺度下 NDVI 模极大值的空间分布

Fig. 5 The spatial patterns of NDVI module maximum values on different wavelet scales

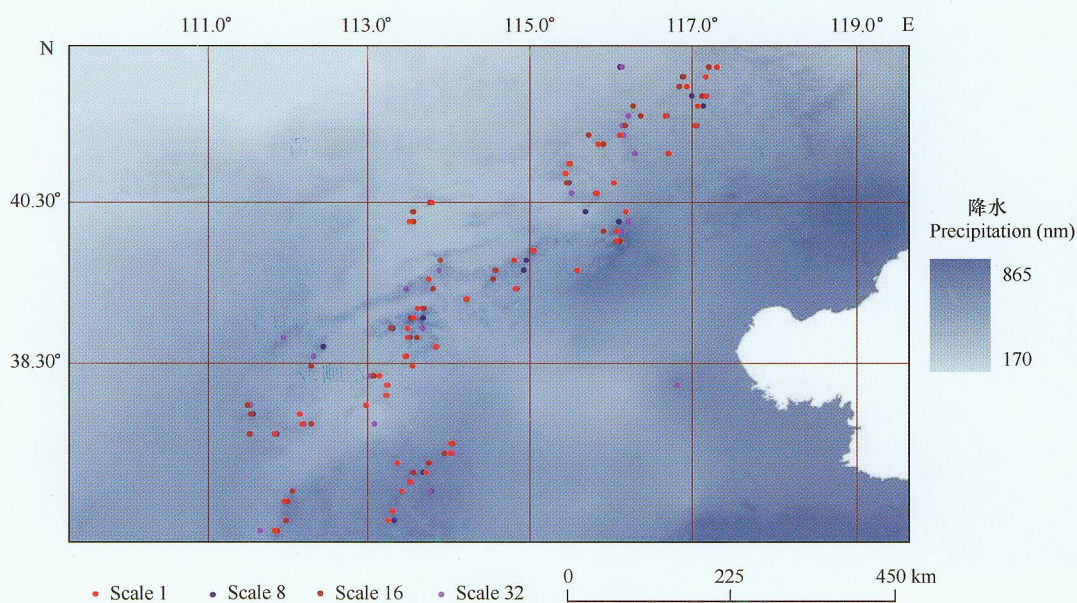


图 6 不同尺度下降水模极大值的空间分布

Fig. 6 The spatial patterns of precipitation module maximum values on different wavelet scales

从图 5 中可以看出, 不同尺度下检测到的 NDVI 的模极大值点的位置及空间格局是不同的。小尺度下 (小波尺度 1 和尺度 8) 这些位置点比较分散, 整体分布偏东。这是因为小尺度下容易检测到局部的扰动点,

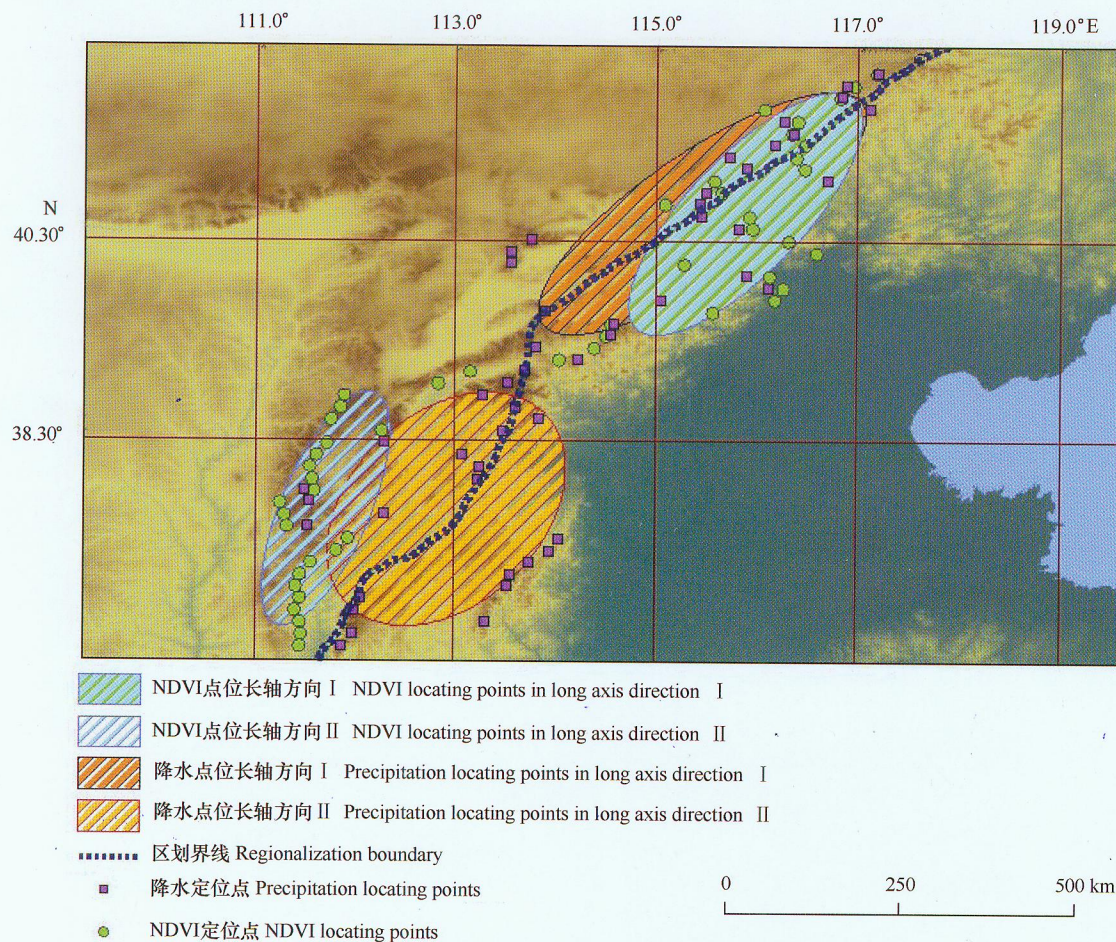


图7 小波尺度16(空间尺度约20 km)下定位点与自然区划界线的比较

Fig. 7 Comparison on locating points on wavelet scale 16 (approximately 20 km) with boundary of physiogeographical regionalization

一致(表2)。整体来看,降水定位点的分布方向与区划界线的一致程度高于NDVI定位点,尤其是在北段。降水与区划界线的主方向一致性可达1.0(北段)和0.99(南段),而NDVI与区划界线的主方向一致性亦达到0.98(北段)和0.92(南段)。49个降水点位距分界线的平均最短距离为35.08 km,最大为100.65 km,最短为0 km(点在线上);49个NDVI点位距分界线的平均最短距离为49.25 km,最大为116.89 km,最短为0 km(点在线上)。降水小波点位的均衡度为81.5%,而NDVI点位均衡度为48.5%。由此可见,以专家综合自然区划的分界线作为参照物,小波点位的主方向性、平均最短距离以及分布均衡度三项指标说明,降水的小波定位效果优于NDVI。事实上,综合自然区划的半干旱半湿润分界线是以水分作为划分指标的,降水过渡带的小波定位效果优良也说明了小波多尺度方法的优势。

表2 自然综合区划界线与NDVI和降水小波定位点主轴方向比较(以正北顺时针方向计算)

Table 2 Comparison on long axis of wavelet locating points with boundary of physiogeographical regionalization (clockwise rotation from north 0 degree)

项目 Item	北段方向(°) Direction of north segment	南段方向(°) Direction of south segment
区划界线 Regionalization boundary	56.18	37.69
NDVI定位点 Locating points of NDVI	43.43	22.94
降水定位点 Locating points of precipitation	55.24	46.59